

DLR-IB-FA-BS-2016-167

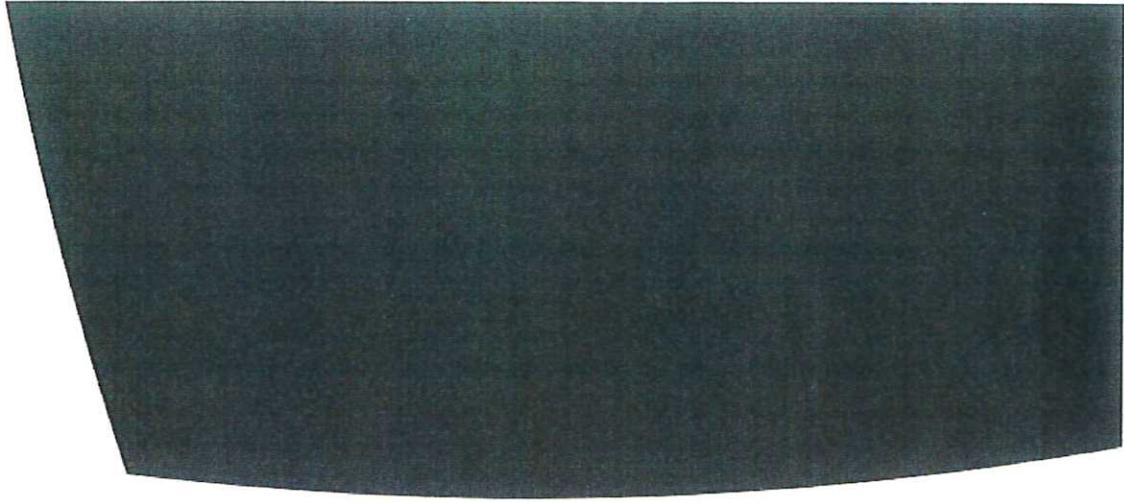
**Numerische Berechnung der
elektrischen Ausgangsspannung
einer applizierten PVDF-Folie bei
bekannter Krafteinwirkung und
Vorhersage für weitere
Belastungsfälle**

Diplomarbeit

Christian Junglewitz
Dipl.-Ing. Christian Mendig



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt



Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

DLR-IB-FA-BS-2016-167

**Numerische Berechnung der elektrischen Ausgangsspannung
einer applizierten PVDF-Folie bei bekannter Krafteinwirkung und
Vorhersage für weitere Belastungsfälle**

Zugänglichkeit: Stufe 1

Braunschweig, August, 2016

Institutsleiter:

Prof. Dr.-Ing. M. Wiedemann



Abteilungsleiter:

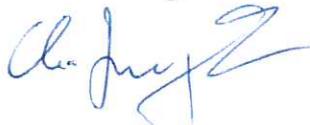
Prof. Dr.-Ing. H. P. Monner



Der Bericht umfasst: 110 Seiten

Autor 1:

Christian Junglewitz



Autor 2 / Betreuer:

Dipl.-Ing. Christian Mendig



DLR

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt



Technische
Universität
Braunschweig



Numerische Berechnung der elektrischen Ausgangsspannung einer applizierten PVDF-Folie bei bekannter Krafteinwirkung und Vorhersage für weitere Belastungsfälle.

Diplomarbeit

an der Technischen Universität Braunschweig

Verfasser: Junglewitz, Christian
im Studiengang: Maschinenbau
Matr.-Nr.: 2848851

Betreuer:

Dipl.-Ing. C. Mendig (DLR)

Erstgutachter:

Prof. Dr.-Ing. M. Sinapius (TU Braunschweig - iAF)

Zweitgutachter:

Prof. Dr.-Ing. M. Wiedemann (TU Braunschweig - iAF)

Bearbeitungszeitraum: 6 Monate

Abgabedatum am: 02.08.2016

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder Sinn nach anderen Werken entnommen sind, wurden unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Braunschweig den 02.08.2016

Christian Junglewitz

Abstract

Die vorliegende Diplomarbeit untersucht die These, dass sich die Aufprallkraft von Wassertropfen auf einer Oberfläche mithilfe eines piezoelektrischen Sensors ermitteln lässt. Dazu wurde im Vorfeld (Bulur, 2015) eine Versuchsreihe für verschiedene Tropfenfallhöhen und Sensoranordnungen durchgeführt. Mithilfe der gemessenen Sensorausgangsspannungen und der piezoelektrischen Empfindlichkeit des Sensors wurde die Tropfenaufprallkraft bestimmt. Die vorliegende Arbeit untersucht zunächst den piezoelektrischen Effekt und insbesondere PVDF als Sensormaterial. Für weiterführende Parameterstudien wird in ANSYS Classic ein voll parametrisiertes Simulationsmodell des verwendeten PVDF-Sensors erstellt. Der Tropfenaufrall wird durch Vorgabe der experimentell ermittelten Tropfenkräfte simuliert und die Ausgangsspannung des Sensors berechnet. Der Einfluss der richtungsabhängigen piezoelektrischen Kraftkonstanten wird für verschiedene Sensoranordnungen und Substratprofile untersucht. In einer transienten Simulation können die Ergebnisse der Experimente in (Bulur, 2015) nicht bestätigt werden. Um die Ursache dafür zu ermitteln, wird der Vorgang des Tropfenaufralls in zwei Experimenten, mithilfe eines Impulshammers und einer Hochgeschwindigkeitskamera weiter untersucht. Die Versuche kommen zu dem Ergebnis, dass die experimentell ermittelten Sensorausgangsspannungen in (Bulur, 2015) korrigiert werden müssen. Da die zeitlichen Verläufe der elektrischen Ausgangsspannung weiterhin nicht durch das Simulationsmodell des PVDF-Sensors bestätigt werden können, wird in einem weiteren Experiment der Einfluss der Tropfentemperatur auf das gemessene Sensorsignal als mögliche Fehlerquelle untersucht. Dieses Experiment führt zu dem Schluss, dass die experimentell ermittelte Sensorausgangsspannung nicht infolge des piezoelektrischen- sondern des pyroelektrischen Effekts gemessen wird. Dies wird durch eine näherungsweise Berechnung der theoretischen Tropfenaufrallkraft und den Vergleich mit der experimentell ermittelten Tropfenaufrallkraft bestätigt. Um den gemessene Verlauf der Sensorausgangsspannung in der Simulation genauer abzubilden wird das Modell um die Messstrecke erweitert. Abschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst und einige Vorschläge für weitere Untersuchungen gegeben.

Inhalt

Eigenständigkeitserklärung	II
Abstract.....	III
Inhalt.....	IV
Tabellenverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	V
1 Einleitung.....	- 11 -
2 Überblick über vorangegangene Arbeit.....	- 12 -
2.1 Versuche und Ergebnisse vorangegangener Untersuchungen	- 12 -
3 Grundlagen.....	- 15 -
3.1 Der piezoelektrische Effekt und seine Anwendung am Beispiel von PVDF .	- 16 -
3.2 Einflussgrößen auf die Sensorempfindlichkeit von PVDF und Störgrößen ..	- 22 -
3.3 Grundlagen FEM /ANSYS®	- 28 -
4 Simulation der Sensorausgangsspannung infolge der Tropfenauflprallkraft in ANSYS Classic.....	- 29 -
4.1 Modellaufbau des piezoelektrischen Sensors in ANSYS.....	- 29 -
4.2 Bestimmung der Parameter	- 38 -
4.3 Modell ebener Sensor mit Elementkoordinatensystem.....	- 39 -
4.4 Modell der Tragflügelvorderkante mit außenliegendem Sensor.....	- 46 -
4.5 Einfluss der Treffergenauigkeit auf die elektrische Ausgangsspannung	- 59 -
4.6 Transiente Analyse des ebenen Sensors auf massivem Aluminiumblock ...	- 66 -
5 Experimentelle Untersuchung des zeitlichen Verlaufs der Sensorausgangsspannung	- 69 -
5.1 Versuch Impulshammer	- 69 -
5.2 Versuch und Aufnahme mit Hochgeschwindigkeitskamera	- 72 -
5.3 Experiment zur Ermittlung der elektrischen Ausgangsspannung eines eben auf einen massiven Aluminiumblock applizierten PVDF-Sensors bei konstanter Fallhöhe für verschiedene Tropfentemperaturen.....	- 80 -
5.4 Einfluss der Messausrüstung auf die gemessene Sensorausgangsspannung	- 85 -
6 Zusammenfassung	- 88 -
7 Ausblick	- 91 -
8 Anhang	- 93 -
9 Literaturverzeichnis.....	- 109 -

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Einige Eigenschaften von PVDF und deren Nutzung für verschiedene Anwendungsbereiche (Wikipedia, 2016) , (Measurment Specialities, Inc., 2008), (Fujitsuka, et al., 1998).....	- 16 -
Tabelle 4-1: Randbedingungen und Anfangsbedingungen für den ebenen Sensor und den gekrümmten Sensor auf dem Profilmodell	- 36 -
Tabelle 4-2: Eingabedaten und Einstellungen für den PVDF-Sensor in ANSYS.....	- 37 -
Tabelle 4-3: Eingabedaten und Einstellungen für das Aluminiumprofil in ANSYS.....	- 38 -
Tabelle 4-4: Einfluss der Netzfeinheit auf die maximale Verschiebung und die ausgegebene Spannung	- 42 -
Tabelle 4-5: Anteile der einzelnen Ladungsverschiebungen an der maximalen Sensorausgangsspannung.....	- 45 -
Tabelle 4-6: Maximale Sensorausgangsspannungen der Simulation im Vergleich zum Experiment für verschiedene Tropfenfallhöhen	- 45 -
Tabelle 4-7: Anteile der einzelnen Ladungsverschiebungen an der maximalen Sensorausgangsspannung.....	- 49 -
Tabelle 4-8: Anteile der einzelnen piezoelektrischen Konstanten an der maximalen Sensorausgangsspannung.....	- 55 -
Tabelle 4-9: Gegenüberstellung der maximalen Sensorausgangsspannung, Richtungsanteile, Knotenverschiebungen und Dehnungen für die drei Simulationsmodelle	- 59 -
Tabelle 4-10: Gegenüberstellung der maximalen Sensorausgangsspannung, Richtungsanteile, Knotenverschiebungen und Dehnungen für den zentralen und den dezentralen Treffer auf dem dünnwandigen Simulationsmodell	- 66 -
Tabelle 5-1: Einstellungen am FFT Analysegerät OnoSokki CF-7200	- 73 -
Tabelle 5-2: Einstellungen an der Hochgeschwindigkeitskamera Phantom V611	- 73 -
Tabelle 5-3: Zeit- und Bildabfolge der in Abbildung 5-6 betrachteten markanten Phasen des Tropfenaufralls.....	- 74 -
Tabelle 5-4: Gegenüberstellung der Versuchsrandbedingungen für das Experiment mit dem eben auf einen massiven Aluminiumblock applizierten Sensor im Vergleich zum gleichen Experiment in (Bulur, 2015).....	- 81 -
Tabelle 5-5: Einstellungen in APDL zur Definition der Messstreckenelemente	- 87 -
Tabelle 8-1: Eigenschaften des simulierten PVDF (Bulur, 2015) (Keppler & Anderson, 1978) ..	- 93 -
Tabelle 8-2: Eigenschaften von biaxial und uniaxial gerecktem PVDF (Nalwa)	- 94 -
Tabelle 8-3: Titel und Quellen der Buchreihe FEM für Praktiker.....	- 94 -
Tabelle 8-4: Anwendungsbereiche von PVDF Foliensensoren (Measurment Specialities, Inc., 2008).....	- 98 -
Tabelle 8-5: Auszug aus dem Datenblatt des Sensorherstellers (Measurment Specialities, Inc., 2008).....	- 100 -
Tabelle 8-6: Kraftübergaberoutine des Simulationsprogramm mit beiden Kraftverläufen	- 101 -
Tabelle 8-7: Messreihe zur Bestimmung der Tropfenmasse	- 106 -
Tabelle 8-8: Temperaturen und Rohdaten- Dateien für den Tropfenfallversuch aus konstanter Höhe mit verschiedenen Wassertemperaturen auf den ebenen Sensor	- 106 -

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Diagramm Ausgangsspannung über Zeit und die Bestimmung der Kontaktdauer des Balls aus einer Fallhöhe von 2 cm (Bulur, 2015).....	- 13 -
Abbildung 2-2: Ergebnisse des Tropfenaufrallversuchs mit dem ebenen Sensor auf dem massiven Aluminiumbalken (Bulur, 2015)	- 14 -

Abbildung 2-3: Ergebnisse des Tropfenaufrallversuchs mit dem außen auf einem Profilmmodell applizierten Sensor (Bulur, 2015)	- 14 -
Abbildung 2-4: Ergebnisse des Tropfenaufrallversuchs mit dem innen im Profilmmodell applizierten Sensor (Bulur, 2015)	- 15 -
Abbildung 3-1: Schichtaufbau des in dieser Arbeit betrachteten PVDF-Sensors nach (Müller, 2013): A-Klebstoff, B-Schutzbeschichtung, C- Silberdruckelektrode, D- PVDF-Film	- 16 -
Abbildung 3-2: Trennung des gemeinsamen Ladungsschwerpunktes und Entstehung eines Dipols durch Krafteinwirkung	- 17 -
Abbildung 3-3: Strukturformel von $C_2H_2F_2$ (Sinapius, 2013).....	- 17 -
Abbildung 3-4: Gitterstrukturmodell der polaren β -Phase (oben) und der unpolaren α -Phase unten (Wang, et al., 1988) schwarz=F, weiß=H.....	- 18 -
Abbildung 3-5: Zugrunde liegendes Koordinatensystem	- 19 -
Abbildung 3-6: Prinzip des Transversaleffekts.....	- 19 -
Abbildung 3-7: Prinzip des Schereffekts	- 20 -
Abbildung 3-8: Prinzip des Longitudinaleffekts	- 20 -
Abbildung 3-9: Wirkprinzip von Sensoren (Hering & Schönfeld, 2012)	- 23 -
Abbildung 3-10: Temperaturabhängig einiger wichtiger Kennwerte von PVDF bei konstanter Frequenz von 10Hz bzw. 1kHz (Poissonzahl), nach (Thompson, 2002).....	- 24 -
Abbildung 3-11: Nachgiebigkeit von PVDF in X-Richtung in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz für verschiedene Temperaturen aus (Thompson, 2002).....	- 25 -
Abbildung 3-12: Piezoelektrische Ladungskonstante d_{31} in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz für verschiedene Temperaturen aus (Thompson, 2002).....	- 25 -
Abbildung 3-13: Permittivität von PVDF in Abhängigkeit von Anregungsfrequenz und Temperatur aus (Thompson, 2002).....	- 26 -
Abbildung 3-14: Dielektrischer Verlustkoeffizient in Abhängigkeit von Temperatur und Anregungsfrequenz aus (Thompson, 2002)	- 26 -
Abbildung 3-15: Beispiel für eine Signalübersteuerung in (PI Ceramic GmbH, 2016)	- 27 -
Abbildung 4-1: Der Modellbildung zugrunde liegende geometrische Zusammenhänge und Größen	- 31 -
Abbildung 4-2: elliptisch idealisierte Tropfenkraft über dem Radius der projizierten Tropfenaufrallfläche auf dem Sensor	- 33 -
Abbildung 4-3: Verlauf der beiden approximierten Tropfenkräfte über dem Radius der idealisierten Aufprallfläche	- 34 -
Abbildung 4-4: Viertelschnitt des ebenen Sensors mit Vernetzung, Begrenzung der Tropfenaufrallfläche. Die Randbedingungen werden anhand eines repräsentativ gewählten Elements veranschaulicht.	- 35 -
Abbildung 4-5: Programmablaufplan der Simulation des ebenen Sensors	- 40 -
Abbildung 4-6: Sensorausschnitt mit zur Komponente " Aufprallfläche " gehörigen Knoten und deren Kraftvektoren.....	- 41 -
Abbildung 4-7: Einfluss der Netzfeinheit auf die berechnete maximale Ausgangsspannung für beide Krafteinleitungsmodelle im Vergleich zu den experimentellen Ergebnissen von (Bulur, 2015)	- 43 -
Abbildung 4-8: Dehnungen in m/m in der PVDF Folie durch die eingeleitete Tropfenkraft	- 44 -
Abbildung 4-9: Vergleich der experimentell in (Bulur, 2015) ermittelten maximalen Ausgangsspannungen mit denen der Simulationen für die 3 untersuchten Fallhöhen	- 46 -
Abbildung 4-10: Schnitt des Simulationsmodells mit Vernetzung und außen appliziertem PVDF-Sensor.....	- 47 -
Abbildung 4-11: Programmablaufplan der Simulation des Profilmodells.....	- 48 -
Abbildung 4-12: Dehnungen in m/m in radialer Richtung der Sensoroberfläche auf dem Profilmmodell mit dünnwandiger Struktur gegenüber den Dehnungen des ebenen Sensors bei gleicher Tropfenkraft und maximaler Krafteinwirkung.	- 51 -

Abbildung 4-13: Dehnungen in m/m in Umfangsrichtung der Sensoroberfläche auf dem Profilmmodell mit dünnwandiger Struktur gegenüber den Dehnungen des ebenen Sensors bei gleicher Tropfenkraft und maximaler Krafteinwirkung.	- 52 -
Abbildung 4-14: Dehnungen in m/m in axialer Richtung der Sensoroberfläche auf dem Profilmmodell mit dünnwandiger Struktur gegenüber den Dehnungen des ebenen Sensors bei gleicher Tropfenkraft und maximaler Krafteinwirkung.	- 53 -
Abbildung 4-15: Knotenverschiebung in m in radialer Richtung am dünnwandigen Profilmmodell bei maximaler Tropfenkraft.....	- 54 -
Abbildung 4-16: Knotenverschiebung in m in radialer Richtung am dickwandigen Profil bei maximaler Tropfenkraft.....	- 55 -
Abbildung 4-17: Dehnungen in m/m in radialer Richtung der Sensoroberfläche auf dem Profilmmodell mit dickwandiger Struktur gegenüber den Dehnungen des ebenen Sensors bei gleicher Tropfenkraft und maximaler Krafteinwirkung.	- 56 -
Abbildung 4-18: Dehnungen in m/m in radialer Richtung der Sensoroberfläche auf dem Profilmmodell mit dickwandiger Struktur gegenüber den Dehnungen des ebenen Sensors bei gleicher Tropfenkraft und maximaler Krafteinwirkung.	- 57 -
Abbildung 4-19: Dehnungen in m/m in radialer Richtung der Sensoroberfläche auf dem Profilmmodell mit dickwandiger Struktur gegenüber den Dehnungen des ebenen Sensors bei gleicher Tropfenkraft und maximaler Krafteinwirkung.	- 58 -
Abbildung 4-20: Kräfte, Winkel und Abmessungen am Profilmmodell zur Bestimmung der orthogonal auf die Sensoroberfläche wirkenden Tropfenkraftkomponente	- 60 -
Abbildung 4-21: Dehnungen in m/m in radialer Richtung der Sensoroberfläche auf dem Profilmmodell mit dünnwandiger Struktur und zentralem Treffer (oben) gegenüber den Dehnungen desselben Profilmodells mit dezentralem Treffer (unten) bei gleicher Tropfenkraft und maximaler Krafteinwirkung	- 62 -
Abbildung 4-22: Dehnungen in m/m in Umfangsrichtung der Sensoroberfläche auf dem Profilmmodell mit dünnwandiger Struktur und zentralem Treffer (oben) gegenüber den Dehnungen desselben Profilmodells mit dezentralem Treffer (unten) bei gleicher Tropfenkraft und maximaler Krafteinwirkung.	- 63 -
Abbildung 4-23: Dehnungen in m/m in axialer Richtung der Sensoroberfläche auf dem Profilmmodell mit dünnwandiger Struktur und zentralem Treffer (oben) gegenüber den Dehnungen desselben Profilmodells mit dezentralem Treffer (unten) bei gleicher Tropfenkraft und maximaler Krafteinwirkung.	- 64 -
Abbildung 4-24: maximale Knotenverschiebungen in m in radialer Richtung bei zentralem (oben) und dezentralem Treffer (unten).....	- 65 -
Abbildung 4-25: Zeitlicher Verlauf der gemessenen Sensorausgangsspannung für den ebenen Sensor auf massivem Aluminiumblock (Bulur, 2015).....	- 67 -
Abbildung 4-26: Zeitlicher Verlauf der Sensorausgangsspannung des ebenen Sensor bei transientser Rechnung	- 68 -
Abbildung 5-1: Impulshammer und Demonstrator mit eben appliziertem PVDF-Sensor.....	- 70 -
Abbildung 5-2: Einstellungen am FFT-Analysegerät OnoSokki CF-7200.....	- 70 -
Abbildung 5-3: Zeitlicher Verlauf der Sensorausgangsspannungen von Impulshammer und ebenem PVDF-Sensor auf massivem Aluminiumbalken.....	- 71 -
Abbildung 5-4: Diagramm Ausgangsspannung über Zeit und die Bestimmung der Kontaktdauer des Balls aus einer Fallhöhe von 2 cm (Bulur, 2015) mit Korrektur nach dem Versuch mit dem Impulshammer	- 71 -
Abbildung 5-5: Zeitlicher Verlauf der mit dem OnoSokki gemessenen Spannungen	- 74 -
Abbildung 5-6: Ausschnitt aus Abbildung 5-5 um die zeitliche Abfolge markanter Stadien des Tropfenaufpralls besser zu erkennen.....	- 75 -
Abbildung 5-7: Aufnahmen der in Abbildung 5-6 dargestellten markanten Punkte mithilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera bei 13 000 Bildern pro Sekunde	- 77 -

Abbildung 5-8: Zeitlicher Verlauf der Sensorausgangsspannung mit und ohne Verwendung eines Hochpassfilters mit einer Grenzfrequenz von 100 Hz	- 79 -
Abbildung 5-9: Zeitlicher Verlauf der Sensorausgangsspannung für den ebenen Sensor auf dem massiven Aluminiumblock ohne Hochpassfilter für unterschiedliche Wassertemperaturen.	- 82 -
Abbildung 5-10: maximale elektrische Ausgangsspannung und Ausgangsspannung des Überschwingers in Abhängigkeit von der Wassertemperatur.....	- 83 -
Abbildung 5-11: Ausschnitt der in der Sensorausgangsspannung enthaltenen Frequenzen und ihre Anteile für Tropfen mit Raumtemperatur.....	- 85 -
Abbildung 5-12: Zeitlicher Verlauf der gemessenen Sensorausgangsspannung aus dem Versuch mit Impulshammer (links) und dem Tischtennisballversuch in (Bulur, 2015)(rechts) vgl. Abbildung 5-3 und Abbildung 2-1	- 85 -
Abbildung 5-13: Ersatzschaltbild der Messstrecke für alle Versuche nach (Measurment Specialities, Inc., 2008).....	- 86 -
Abbildung 5-14: Zeitlicher Verlauf der gemessenen und der berechneten Ausgangsspannung des PVDF-Sensor im Vergleich zum gemessenen Verlauf der Ausgangsspannung des Impulshammers.....	- 87 -
Abbildung 7-1: Prinzipskizze einer einfachen Mimik, zur räumlichen und thermischen Trennung von Wassertropfen und PVDF-Sensor, gleichzeitigen Verstärkung der Tropfenkraft sowie Steigerung der Sensorausgangsspannung durch Verringerung der Sensorfläche und Erhöhung der Sensordicke	- 91 -
Abbildung 8-1: Einfluss der R-C Filtercharakteristik eines PVDF Foliensensors auf ein halbsinusförmiges Signal aus (Measurment Specialities, Inc., 2008)	- 95 -
Abbildung 8-2: Einfluss der R-C Filtercharakteristik eines PVDF Foliensensors auf ein sägezahnförmiges Signal aus (Measurment Specialities, Inc., 2008).....	- 96 -
Abbildung 8-3: Zeigt die maximalen Verschiebungen der Profiloberseite und des Sensors in Sensor X-, Y- und Z-Richtung (von oben nach unten) für das dünnwandige Profilmodell im Halbschnitt.....	- 102 -
Abbildung 8-4: Zeigt die maximalen Verschiebungen der Profiloberseite und des Sensors in Sensor X-, Y- und Z-Richtung (von oben nach unten) für das dickwandige Profilmodell im Halbschnitt.....	- 103 -
Abbildung 8-5: Datenblatt Brüel& Kjaer 8206-002.....	- 105 -
Abbildung 8-6: Bildkorrektureinstellungen im Steuerungsprogramm der Hochgeschwindigkeitskamera Phantom V611.....	- 105 -
Abbildung 8-7: Zeitlicher verlauf der Sensorausgangsspannungen für die 6 untersuchten Temperaturbereiche.....	- 108 -

Zeichen und Symbole

Lateinische Symbole

A	Fläche	m^2
A_E	Elektrodenfläche	m^2
A_F	Fläche der Krafteinwirkung	m^2
A_S	Sensorfläche	m^2
b	Breite	m
C	Kapazität	F
\mathbf{C}	Steifigkeitsmatrix	$\frac{N}{m}$
d	Dicke	m
d	Piezoelektrische Ladungskonstante	$\frac{C}{N}$
D	Elektrische Flussdichte	$\frac{m^2}{C}$
e	Piezoelektrische Kraftkonstante	$\frac{m^2}{C}$
f	Frequenz	s^{-1}
f_{gu}	Untere Grenzfrequenz	s^{-1}
F	Kraft	N
F_{max}	Maximale Tropfenkraft	N
F_q	Gemittelte Tropfenkraft	N
h	Fallhöhe	m
k	Stoßzahl	--
m	Masse	kg
Q	Ladung	C
r	Radius	m
r_T	Tropfenradius	m
R	Widerstand	Ω
S	Länge der Sehne	m
t	Zeit	s
T	Temperatur	$^{\circ}C$
T_c	Curie Temperatur	$^{\circ}C$
u_x, u_y, u_z	Knotenverschiebungen in X-, Y- und Z-Richtung	m
U	Elektrische Spannung	V
v	Geschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
V	Volumen	m^3

Griechische Symbole

$\tan \delta_e$	Verlustkoeffizient	--
ε	Dehnung	--
ε_r	Relative Permittivität (Dielektrizitätskonstante)	--
σ	Mechanische Spannung	--
ρ	Dichte	$\frac{kg}{m^3}$

Konstanten

g	Erdbeschleunigung	$9,81 \frac{m}{s^2}$
ϵ_0	Elektrische Feldkonstante des Vakuums	$8,854 * 10^{-12} \frac{F}{m}$
π	Pi	3,14

Indizes

1	Sensor-X-Richtung
2	Sensor-Y-Richtung
3	Sensor-Z-Richtung
4	Rotation um die X-Achse
5	Rotation um die Y-Achse
6	Rotation um die Z-Achse

Abkürzungen

PVDF	Polyvinylidenfluorid
HPF	Hochpassfilter
FFT	Fast-Fourier-Transformation
SuLaDI	Super Large Droplet Icing

1 Einleitung

Zur Gewährleistung der Betriebssicherheit und der Wirtschaftlichkeit von Flugzeugen ist es unbedingt erforderlich die Flugzeugoberfläche während aller Flugphasen eisfrei zu halten. Vor dem Abflug sind Eisansammlungen leicht zu erkennen und gut zu entfernen. Während des Fluges sind vor allem die Tragflügel, Leitwerke und Sonden in besonderem Maße gefährdet und gleichzeitig kritisch für die Flugleistung und Flugführung. Für die Enteisierung während des Fluges stehen je nach Flugzeugtyp verschiedene Systeme zur Verfügung. Allen gemeinsam ist, dass sie für ihren Betrieb Energie benötigen die in der Regel von den Triebwerken zur Verfügung gestellt werden muss und damit die Wirtschaftlichkeit des Flugzeugs negativ beeinflusst. Obwohl die Flugsicherheit absolute Priorität hat ist die Wirtschaftlichkeit insbesondere für Verkehrsflugzeuge ebenfalls von höchstem Interesse. Um diese beiden Interessen in Einklang zu bringen ist es notwendig gefährliche Vereisungsbedingungen während des Fluges zuverlässig zu erkennen und das Enteisierungssystem nur dann zu betreiben, wenn es erforderlich ist. Solche Vereisungsbedingungen beschränken sich in der Regel auf Wolken in einer Höhe zwischen 900 und 7200 m. Außerdem hängt die Geschwindigkeit und die Art der Vereisung von der Fluggeschwindigkeit, dem Flüssigwassergehalt der Atmosphäre, der Temperatur und der Tröpfchengröße ab (Peligrin & Schänzer, 1997). Damit kommt der Eiserkennung eine besondere Bedeutung zu.

Das Gemeinschaftsprojekt SuLaDI des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Braunschweig und der Technischen Universität Braunschweig widmet sich der Entwicklung von neuen Lösungsansätzen zur Vermeidung, Erkennung und Entfernung von Flugzeugvereisung. Im Rahmen dieses Projektes werden piezoelektrische Sensoren auf den zu überwachenden Strukturen appliziert um damit Wassertröpfchen in der durchflogenen Atmosphäre zu detektieren. Die vorliegende Diplomarbeit ist dieser Untersuchung angegliedert. Es wird auf Grundlage experimentell ermittelter Kennwerte ein numerisches Simulationsmodell in ANSYS gebildet und validiert. Dieses Modell dient dazu, die Eignung des in den Experimenten verwendeten PVDF-Foliensensors, unter anderen Randbedingungen und auf anderen Strukturformen und Materialien zu untersuchen.

Die Vorliegende Arbeit ist dabei in 8 Kapitel gegliedert. Der Einleitung folgt ein kurzer Überblick über die vorangegangene Arbeit in der die weiter verwendeten Kennwerte experimentell ermittelt wurden. Die Versuche und Ergebnisse werden kurz und knapp vorgestellt. Dabei wird auch darauf eingegangen, wie sie in die vorliegende Arbeit einfließen.

Im Anschluss geht der Theorieteil auf die Grundsätze der Piezoelektrizität und wichtige Werkstoffe ein. Der Schwerpunkt liegt dabei auf dem verwendeten Polyvinylidenfluorid und seine Besonderheiten in der Anwendung. Die Grundlage für das Simulationsmodell bildet die Finite Elemente Methode und die kommerzielle Software ANSYS. Da sie seit Jahrzehnten etabliert sind wird für beide auf eine genauere Darstellung verzichtet und stattdessen auf Literatur verwiesen.

Der Hauptteil ist in zwei Kapitel gegliedert. In Kapitel 4 werden zunächst die Modellbildung für die Tropfenkraft, verwendete Annahmen und Parameter erläutert. Daran schließt sich die Validierung des Modells anhand des Versuchs mit dem ebenen PVDF-Sensor auf dem massiven Aluminiumbalken an. Da die fehlenden piezoelektrischen Kenngrößen für die Eingabe in ANSYS nicht bestimmt werden können werden sie der Literatur entnommen. Um den Einfluss daraus resultierender Abweichungen einschätzen zu können werden die Richtungsanteile der einzelnen piezoelektrischen Effekte isoliert untersucht. Um den Einfluss einer gekrümmten Sensoranordnung sowie unterschiedlich steifer Substratstrukturen abschätzen zu können, wird ein Profilmodell entwickelt und es werden die für den ebenen Fall durchgeführten Simulationen wiederholt und verglichen. Im Anschluss wird für den ebenen Sensor eine transiente Rechnung durchgeführt, um das zeitliche Verhalten der simulierten Sensorausgangsspannung mit den Ergebnissen der Experimente zu vergleichen.

Kapitel 5 beinhaltet eine systematische Untersuchung des Tropfenaufpralls und der daraus resultierenden Sensorausgangsspannung da der berechnete zeitliche Verlauf der Sensorausgangsspannung nicht mit den experimentellen Ergebnissen in Einklang zu bringen ist. Dazu wird der zeitliche Zusammenhang zwischen Anregung des Sensors durch den Tropfen bzw. einen Impulshammer mithilfe eines FFT-Analysegerätes und einer Hochgeschwindigkeitskamera untersucht. Außerdem wird der Tropfenfallversuch auf den eben auf einen massiven Aluminiumblock applizierten Sensor für eine Fallhöhe und verschiedene Wassertemperaturen wiederholt um den Einfluss der Tropfentemperatur auf die Sensorausgangsspannung zu untersuchen.

Die gewonnenen Erkenntnisse werden in Kapitel 6 zusammengefasst. Anschließend werden Vorschläge für weiterführende Untersuchungen gegeben.

2 Überblick über vorangegangene Arbeit

2.1 Versuche und Ergebnisse vorangegangener Untersuchungen

Grundlage für die vorliegende Arbeit bildet (Bulur, 2015). Hier werden kurz die Experimente und deren Ergebnisse vorgestellt. Weitere Details können in (Bulur, 2015) nachgelesen werden. Außerdem wird kurz auf die Relevanz der Resultate für die vorliegende Arbeit eingegangen.

[A] Ballversuch ebener Sensor auf massivem Aluminiumbalken

Dieser Versuch dient der Bestimmung bzw. der Bestätigung der vom Hersteller angegebenen Empfindlichkeit des Sensors in Richtung d_{33} . Dazu wird ein Tischtennisball mit bekannter Masse aus verschiedenen Höhen auf den eben auf einem massiven Aluminiumbalken applizierten Sensor fallen gelassen. Mit der berechneten Aufprallkraft des Tropfens und der maximalen gemessenen Sensorausgangsspannung wird die Empfindlichkeit von $\approx 0,013 \frac{V}{N}$ in d_{33} -Richtung bestätigt. Verwendet wird ein PVDF-

Sensor mit aufgedruckten Silberelektroden. Dieser ist auf einem massiven Aluminiumbalken von 40 mm x 40 mm x 1000 mm appliziert. Die aktive Sensorfläche beträgt 12 mm x 30 mm.

In der vorliegenden Arbeit wird dieser Versuch nicht weiter betrachtet, da er lediglich die ohnehin vom Hersteller angegebene Sensorempfindlichkeit bestätigt. Aus diesem Versuch wird für die Eingabe in die Simulation jedoch die Annahme zur Aufprallzeit des Balls für den Tropfen übernommen, da sie auf die korrekte Sensorempfindlichkeit führt.

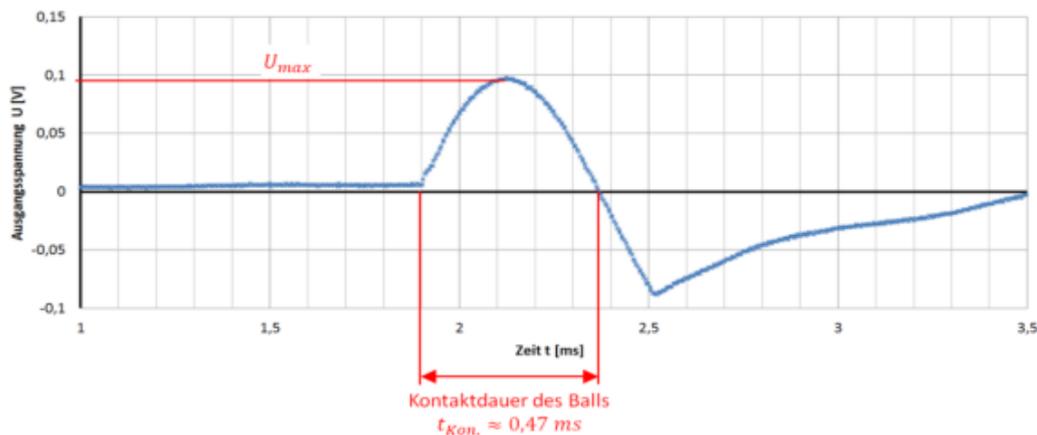


Abbildung 2-1: Diagramm Ausgangsspannung über Zeit und die Bestimmung der Kontaktdauer des Balls aus einer Fallhöhe von 2 cm (Bulur, 2015)

Dabei wird angenommen, dass der Aufprall vom Verlassen der Nulllage bis zu ihrem erneuten Erreichen andauert. Für den Tropfen ergeben sich andere Kontaktzeiten, die aber analog zu Abbildung 2-1 aus dem zeitlichen Verlauf der Sensorausgangsspannung des jeweiligen Versuchs bestimmt wird.

[B] Tropfenversuch ebener Sensor auf massivem Aluminiumbalken

Als nächster Schritt wird die Ausgangsspannung des Sensors für verschiedene Fallhöhen eines Tropfens bekannter Größe ermittelt. Die Aufprallkraft des Tropfens auf den PVDF-Sensor wird anschließend aus der Ausgangsspannung mithilfe der ermittelten Empfindlichkeit in d_{33} berechnet. Verwendet wird dazu der Demonstrator aus **[A]**. Die Tropfen werden mithilfe einer kalibrierten Pipette erzeugt, die in einer speziellen Halterung befestigt ist. So ist eine konstante Fallhöhe und Tropfengröße gewährleistet. Zur Vermeidung von Umgebungseinflüssen auf den fallenden Tropfen wird ein schützendes Fallrohr verwendet.

Fallhöhe [cm]	25 ± 0,05	89,5 ± 0,05	221,7 ± 0,05
Elektrische Ausgangs - Spannung [V]	0,055 ± 0,010	0,151 ± 0,017	0,259 ± 0,036
Messsignalrauschen [V]	≈0,001 ± 0,001	≈0,001 ± 0,001	≈0,001 ± 0,001
Aufprallkraft [N]	4,260 ± 0,783	11,611 ± 1,346	19,949 ± 2,769
Aufprallgeschwindigkeit [m/s]	2,15 ± 0,02	3,92 ± 0,06	5,63 ± 0,14

Mittelwert ± Standardabweichung über alle Messwerte

Abbildung 2-2: Ergebnisse des Tropfenaufrallversuchs mit dem ebenen Sensor auf dem massiven Aluminiumbalken (Bulur, 2015)

Dieser Versuchsaufbau wird als Grundlage der Modellbildung und für die Verifikation des Simulationsmodells verwendet. Das ist vorteilhaft, weil die Empfindlichkeit des Sensors für diesen uniaxialen Belastungsfall bekannt und bestätigt ist. Zudem können alle Sensorteile und das Substrat als Reihenschaltung von Federn betrachtet werden, wobei die Federsteifigkeit dem jeweiligen E-Modul in Z-Richtung entspricht.

[C] Tropfenversuch gekrümmter Sensor auf Profilerseite

Für diesen Versuch wurde ein einem einfachen Tragflügelprofil nachempfunderer Demonstrator verwendet. Der PVDF-Sensor wurde an der gedachten Tragflügelvorderkante gekrümmt außen appliziert und direkt vom Tropfen getroffen. Analog zu [B] wird die Ausgangsspannung für verschiedene Fallhöhen ermittelt. Die Fallhöhen unterscheiden sich etwas von den in [B] verwendeten. Wieder erfolgt die Berechnung der Aufprallkraft des Tropfens aus der Ausgangsspannung mithilfe der ermittelten Empfindlichkeit in d_{33} -Richtung. Die ermittelten Tropfenaufrallkräfte liegen im Mittel unter denen die in [B] ermittelt wurden.

Fallhöhe [cm]	21,2 ± 0,05	68,2 ± 0,05	199,9 ± 0,05
Elektrische Ausgangs - Spannung [V]	0,106 ± 0,013	0,113 ± 0,019	0,190 ± 0,025
Messsignalrauschen [V]	≈0,001 ± 0,001	≈0,001 ± 0,001	≈0,001 ± 0,001
Aufprallkraft [N]	8,135 ± 0,992	8,705 ± 1,478	14,609 ± 1,915
Aufprallgeschwindigkeit [m/s]	1,93 ± 0,05	3,43 ± 0,05	5,43 ± 0,08

Mittelwert ± Standardabweichung über alle Messwerte

Abbildung 2-3: Ergebnisse des Tropfenaufrallversuchs mit dem außen auf einem Profilmmodell applizierten Sensor (Bulur, 2015)

Dieses Experiment stellt sich für die Simulation problematisch dar, da nicht davon auszugehen ist, dass allein der d_{33} Effekt für die gemessene Sensorausgangsspannung verantwortlich ist. Außerdem weist die Struktur des verwendeten Demonstrators viele unbekannte und aufwändig zu ermittelnde Variablen auf. Daher wird der Einfluss der

übrigen piezoelektrischen Kraftkonstanten an einem stark vereinfachten Modell untersucht.

[D] Tropfenversuch gekrümmter Sensor auf Profilunterseite

Im Gegensatz zu den vorangegangenen Experimenten wird der Sensor bei diesem Versuchsaufbau nicht direkt vom Tropfen getroffen da er innen im Profilmodell appliziert ist. Die Sensorausgangsspannung wird für verschiedene Fallhöhen bestimmt. Ziel ist es dabei zu überprüfen ob der Tropfenaufprall noch messbar ist.

Fallhöhe [cm]	$21,2 \pm 0,05$	$68,2 \pm 0,05$	$199,9 \pm 0,05$
Elektrische Ausgangs - Spannung [mV]	$4,666 \pm 0,687$	$8,767 \pm 0,513$	$18,389 \pm 0,713$
Messsignalrauschen [mV]	$\approx 0,7 \pm 0,7$	$\approx 0,1 \pm 0,1$	$\approx 0,115 \pm 0,115$
Aufprallgeschwindigkeit [m/s]	$1,97 \pm 0,06$	$3,59 \pm 0,11$	$5,44 \pm 0,06$

Mittelwert \pm Standardabweichung über alle Messwerte

Abbildung 2-4: Ergebnisse des Tropfenaufprallversuchs mit dem innen im Profilmodell applizierten Sensor (Bulur, 2015)

Da die gemessenen Ausgangsspannungen nur etwa 10 % der anderen beiden Versuche betragen, wird diese Anordnung als nicht vorteilhaft beurteilt. Sie findet daher in der vorliegenden Arbeit keine weitere Beachtung.

[E] Simulation in ANSYS Workbench

In (Bulur, 2015) wurde versucht die aufgeführten Experimente mithilfe einer Simulation in ANSYS Workbench abzubilden um anschließend Parameterstudien dazu durchführen zu können. Jedoch konnten in den Simulationen nicht die erwarteten Ausgangsspannungen berechnet werden.

Diese offen verbleibenden Aspekte geben den Anstoß zu der vorliegenden Arbeit.

3 Grundlagen

In diesem Kapitel werden am Beispiel von Polyvinylidenfluorid (PVDF) zunächst die Grundsätze der Piezoelektrizität dargestellt. Danach werden der Herstellungsprozess und die Anwendungsmöglichkeit als Sensor unter Ausnutzung der verschiedenen direkten piezoelektrischen Effekte behandelt. Anschließend wird detailliert auf den Werkstoff PVDF und seine Besonderheiten bei der Anwendung eingegangen. Abschließend werden die für die Simulation verwendete Methode der Finiten Elemente und die Software ANSYS Classic kurz vorgestellt.

3.1 Der piezoelektrische Effekt und seine Anwendung am Beispiel von PVDF

Polyvinylidenfluorid (kurz PVDF) wurde bereits 1961 unter dem Namen „Kynar“ auf den Markt gebracht. Seitdem hat sich dieser Werkstoff für eine Vielzahl von sehr unterschiedlichen Anwendungsgebieten etabliert.

Eigenschaft	Anwendungsbereich
Gute thermische und chemische Beständigkeit	Auskleidung für Rohre Dichtungen Membranen Verpackungsfolien
Nach Polarisierung starke piezoelektrische Eigenschaften	Sensoren Aktuatoren Energy-Harvesting
Kann hoch rein hergestellt werden	Labortechnik (Trägermembranen) Medizintechnik (Prothesen) Chipproduktion Transport von hochreinen Medien
Ferroelektrische Eigenschaften	Mikrotechnik (mögliche zukünftige Anwendung in Computerspeichern)
Starke pyroelektrische Eigenschaften Relativ günstig	Infrarotsensoren

Tabelle 3-1: Einige Eigenschaften von PVDF und deren Nutzung für verschiedene Anwendungsbereiche (Wikipedia, 2016) , (Measurement Specialties, Inc., 2008), (Fujitsuka, et al., 1998)

1969 entdeckte der Japaner Kawai, dass PVDF auch piezoelektrische Eigenschaften besitzt. Einen umfangreichen Überblick über die aktuellen Anwendungsbereiche von PVDF als Sensor sind in Tabelle 8-4 zusammengefasst.

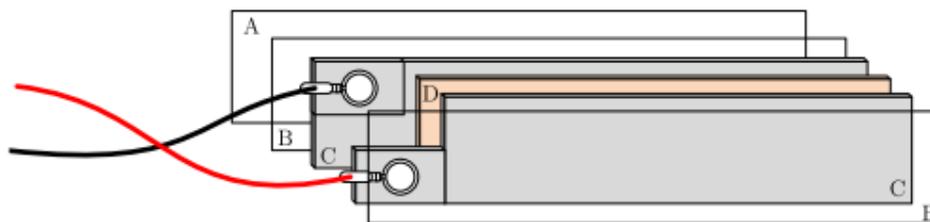


Abbildung 3-1: Schichtaufbau des in dieser Arbeit betrachteten PVDF-Sensors nach (Müller, 2013): A-Klebstoff, B-Schutzbeschichtung, C- Silberdruckelektrode, D- PVDF-Film

Beim direkten piezoelektrischen Effekt bewirkt eine gerichtete äußere Kraft eine Verschiebung der positiven und negativen Ladungsschwerpunkte in den Elementarzellen des Kristallgitters. Diese mikroskopischen Dipole entstehen in jeder Elementarzelle des Kristalls. Es entsteht eine elektrische Polarisation. Die Ladungen sammeln sich an der Oberfläche des Materials und können dort als Spannung gemessen werden (Hering & Schönfeld, 2012).

Der direkte piezoelektrische Effekt kann daher für vielfältige Anwendungen als Sensor für Kraft, Druck, Beschleunigung, Schwingungen oder auch für Energy Harvesting genutzt werden.

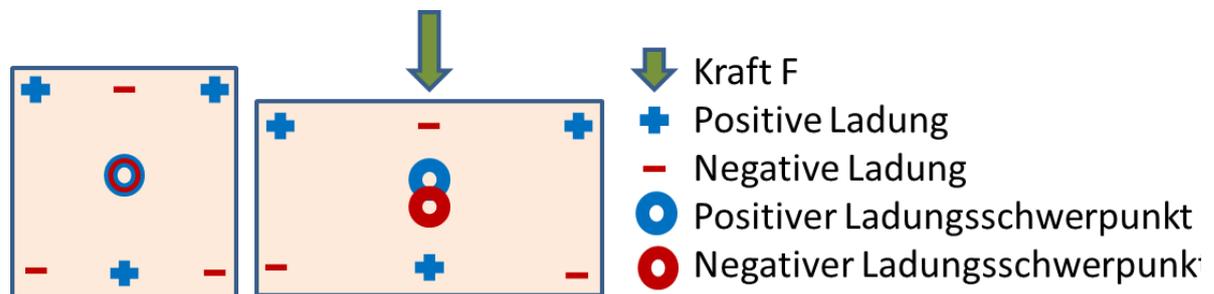


Abbildung 3-2: Trennung des gemeinsamen Ladungsschwerpunktes und Entstehung eines Dipols durch Krafteinwirkung

Umgekehrt lässt sich durch den sogenannten inversen piezoelektrischen Effekt durch Anlegen einer Spannung eine Verformung bewirken. Dadurch ergeben sich Anwendungsmöglichkeiten als Aktuator.

Zur Herstellung von PVDF werden zunächst Fluorwasserstoff und Methylchloroform zu Chlordifluorethan und weiter zu Vinylidenfluorid synthetisiert. Anschließend erfolgt mithilfe eines Katalysators die Polymerisation zu Polyvinylidenfluorid in hochreinem Wasser unter spezifischen Druck- und Temperaturverhältnissen. Polyvinylidenfluorid ist ein teilkristallines, langkettiges Polymer mit der Wiederholgruppe $C_2H_2F_2$.

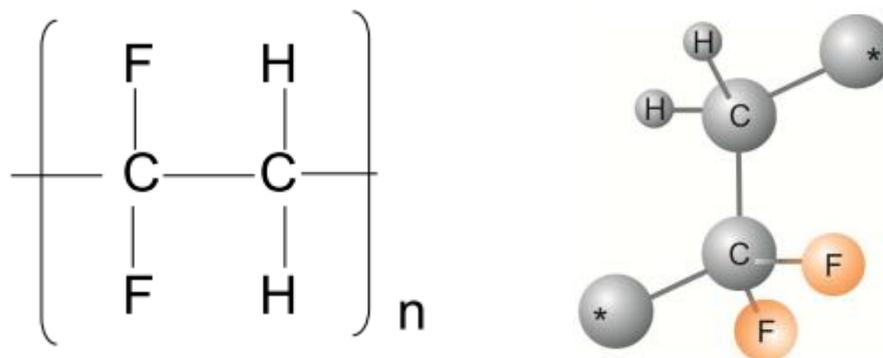


Abbildung 3-3: Strukturformel von $C_2H_2F_2$ (Sinapius, 2013)

Bezogen auf die Kohlenstoffatome sind die Wasserstoffatome positiv und die Fluoratome negativ geladen. Dadurch ist PVDF auf molekularer Ebene von Natur aus Polar. Die einzelnen Moleküle sind aber zunächst chaotisch verteilt, sodass PVDF als Stoff zunächst unpolar ist. (Vinogradov & Holloway, 1999)

Für die Anwendung als Sensor wird PVDF meist zu einer dünnen Folie von typischerweise 6-150 μm Dicke extrudiert. Nach der Herstellung liegt zunächst die nicht polare α -Phase vor. Sie besteht bei Raumtemperatur zu etwa gleichen Teilen aus kristallinen und amorphen Bereichen die stochastisch verteilt und ausgerichtet sind. Durch diese chaotische Struktur weist PVDF in der α -Phase keine piezoelektrischen Eigenschaften auf. Durch kontrolliertes Strecken um einen Faktor von 3,5 bis 5 bei erhöhter Temperatur von typischerweise 103°C (Vinogradov & Holloway, 1999) wird der

Übergang in die hochpolare β -Phase erreicht vgl. Abbildung 3-4. Zusätzlich wird ein starkes elektrisches Feld von mindestens $100 \text{ V}/\mu\text{m}$ angelegt um die Dipole auszurichten (Thompson, 2002). Die so erreichte Orientierung und Polarisation bleibt nach dem Abkühlen erhalten, solange die Curie-Temperatur nicht überschritten wird. Die Curie-Temperatur von PVDF liegt oberhalb der Schmelztemperatur von etwa 170°C . Da der Übergang jedoch keine klare Grenze besitzt wird eine Temperatur von ca. 125°C oft als sinnvolle obere Einsatztemperatur betrachtet (Thompson, 2002).

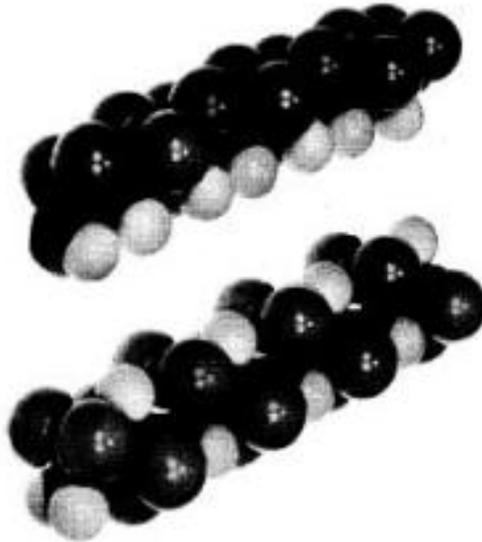


Abbildung 3-4: Gitterstrukturmodell der polaren β -Phase (oben) und der unpolaren α -Phase unten (Wang, et al., 1988) schwarz=F, weiß=H

Dieser Prozess kann mit Strecken in Richtung der X-Achse (uniaxial) oder der X- und Y-Achse (biaxial) durchgeführt werden (Sinapius, 2013). Die resultierende PVDF-Folie besitzt anschließend sehr unterschiedliche piezoelektrische Ladungskonstanten, pyroelektrische Koeffizienten und thermische Ausdehnungskoeffizienten in der jeweiligen Raumrichtung vgl. Tabelle 8-2. Die mechanischen Eigenschaften wie E-Modul, Querkontraktionszahl, Steifigkeit und Nachgiebigkeit werden in (Nalwa, 1995) durch den Streckprozess nicht verändert was im Widerspruch zu (Thompson, 2002) und (Lynch, 1993) steht. Aufgrund der größeren piezoelektrischen Ladungskonstanten d_{31} und d_{33} wird in der Praxis meist uniaxial gestrecktes PVDF verwendet.

PVDF besitzt wie die meisten piezoelektrischen Werkstoffe richtungsabhängige piezoelektrische und mechanische Eigenschaften. Diese werden mit Ausnahme der Einkristalle durch den Herstellungsprozess und die Polarisation des Materials bestimmt. Da zur Polarisation starke elektrische Felder nötig sind wird die Polarisation in der Regel in Dickenrichtung durchgeführt. Daher ist es von grundlegender Bedeutung für das jeweilige Material ein entsprechendes Koordinatensystem zu definieren.

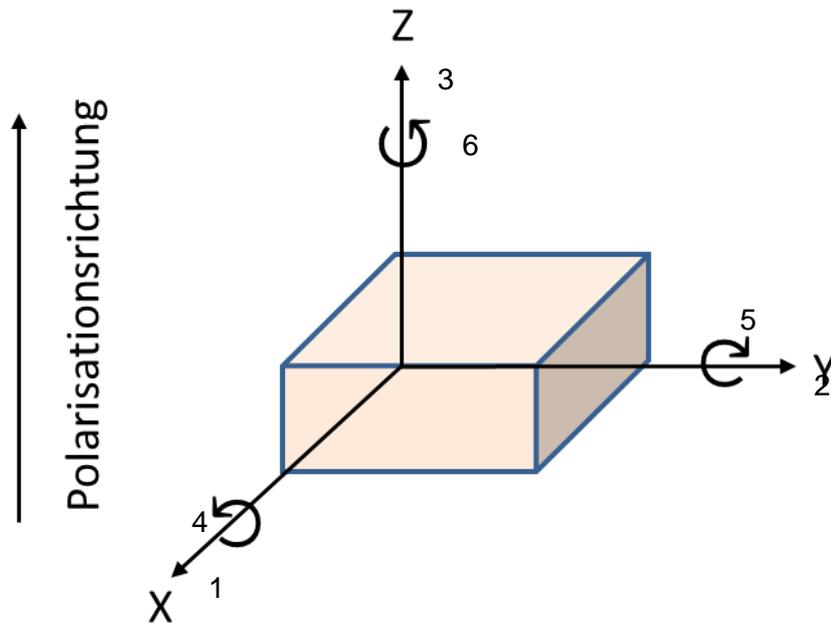


Abbildung 3-5: Zugrunde liegendes Koordinatensystem

In der vorliegenden Arbeit wird das in Abbildung 3-5 dargestellte Koordinatensystem verwendet. Die Polarisationsrichtung entspricht der positiven Z-Achse welche in Dickenrichtung des PVDF-Sensors verläuft. Der im weiteren Verlauf betrachtete uniaxial gereckte PVDF-Sensor wurde in X-Richtung vorgestreckt.

In Abhängigkeit der Polarisationsrichtung, der Wirkungsrichtung der Kraft und der belasteten Oberfläche können drei Arten des piezoelektrischen Effektes unterschieden werden.

Transversaleffekt

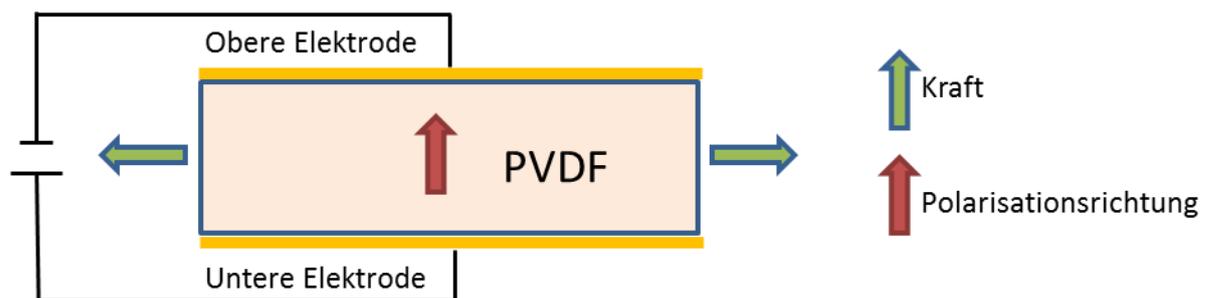


Abbildung 3-6: Prinzip des Transversaleffekts

Beim transversalen piezoelektrischen Effekt steht die Wirkungsrichtung der Kraft orthogonal zur Polarisationsrichtung und der belasteten Fläche. Mit der Polarisierung in Richtung der Z-Achse 3 und Kraftwirkung in Richtung der X-Achse 1 ergibt sich so der häufig genutzte d_{31} -Effekt und mit der Y-Achse 2 der d_{32} -Effekt.

Schereffekt

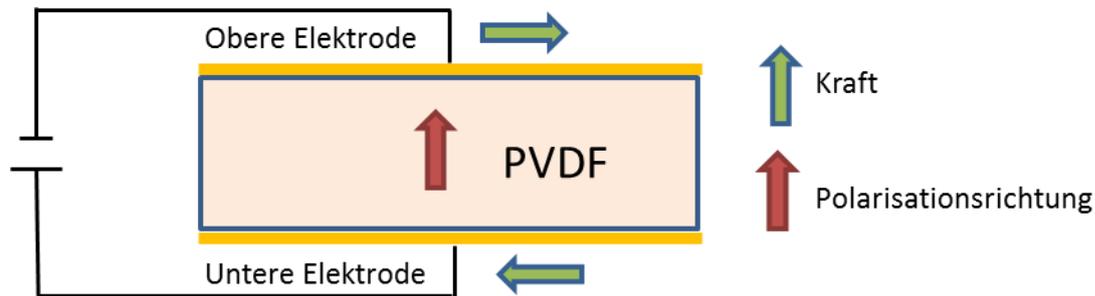


Abbildung 3-7: Prinzip des Schereffekts

Im Gegensatz zum Transversaleffekt verläuft die Wirkungslinie der Kraft beim Schereffekt parallel zur belasteten Fläche. Kraft und Polarisationsrichtung stehen weiter orthogonal zueinander. Dieser Effekt wird in dünnen PVDF-Folien wie die in dieser Arbeit betrachtete nicht genutzt und ist hier nur der Vollständigkeit halber dargestellt.

Longitudinaleffekt

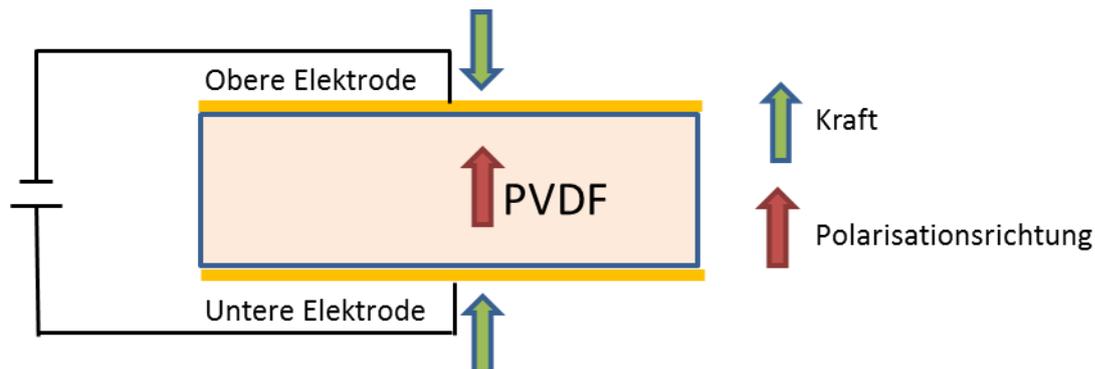


Abbildung 3-8: Prinzip des Longitudinaleffekts

Der Longitudinaleffekt liegt vor, wenn die Wirkungslinie der Kraft und die Polarisationsrichtung übereinstimmen. Die Kraft wirkt senkrecht auf die belastete Oberfläche. Diese Anordnung entspricht dem d_{33} -Effekt der in der vorliegenden Arbeit von vorrangiger Bedeutung ist.

Welche Komponenten der Permittivitäts-, Piezoelektrizitäts- und Steifigkeitstensoren ungleich Null und einzigartig sind, wird durch die spezifische Kristallsymmetrie eines piezoelektrischen Werkstoffs bestimmt. Die Kristallstruktur von PVDF in β -Phase entspricht der $mm2$ Punktgruppensymmetrie. Damit ergeben sich die charakteristischen Matrizen in folgender Form, vgl. (Thompson, 2002).

Die Permittivität entsprechend der in Abbildung 3-5 dargestellten Orientierung der Achsen und Polarisation:

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

Die piezoelektrischen Ladungskonstanten lassen sich darstellen als:

$$d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

Die Steifigkeit:

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

Die in ANSYS verwendeten piezoelektrischen Kraftkonstanten e ergeben sich aus

$$e = d * C \quad (3-4)$$

Betrachtet man den stark vereinfachten Fall eines piezoelektrischen Kraftsensors analog zur in Abbildung 3-5 dargestellten Konvention unter Ausnutzung des Longitudinaleffekts bzw. d_{33} (vgl. Abbildung 3-8) ergibt sich die elektrische Ausgangsspannung U des Sensors nach (Gautschi, 2002) wie folgt. Eine homogene Kraft F_3 wirkt auf eine Fläche A_F und erzeugt dadurch die mechanische Spannung σ_3 .

$$\sigma_3 = \frac{F_3}{A_F} \quad (3-5)$$

Gemäß dem direkten piezoelektrischen Effekt ergibt sich die elektrische Flussdichte D_3 mit der piezoelektrischen Ladungskonstante d_{33} zu:

$$D_3 = d_{33} * \sigma_3 \quad (3-6)$$

Die Ladung Q auf der Oberfläche A_S des Sensors ist damit

$$Q = D_3 * A_S \quad (3-7)$$

Die Ladung kann aber nicht direkt gemessen werden sondern wird über Elektroden auf der Oberfläche abgenommen. Der Sensor stellt somit gleichzeitig einen Plattenkondensator dar, mit dem PVDF als Dielektrikum. Die Spannung U des Kondensators mit der Kapazität C kann gemessen werden und ergibt sich aus dem Zusammenhang:

$$U = \frac{Q}{C} \quad (3-8)$$

$$C = \varepsilon_0 * \varepsilon_r * \frac{A_E}{d} \quad (3-9)$$

Dabei bezeichnet A_E die Fläche der Elektroden, d die Dicke des Dielektrikums, ε_0 elektrische Feldkonstante des Vakuums und ε_r die relative Permittivität des Dielektrikums. Da nur von der Sensorfläche Ladung abgeführt werden kann die von der Elektrode bedeckt ist ergibt sich $A_S \leq A_E$. Weiterhin bildet sich nur auf der belasteten Sensoroberfläche auch eine Ladung. Die restliche Fläche bleibt passiv. Daher gilt auch $A_S = A_F$ und die Ausgangsspannung des Sensors ergibt sich zu:

$$U = \frac{d}{\varepsilon_0 * \varepsilon_r * A_E} * d_{33} * F_3 \quad (3-10)$$

Diese sehr einfache Betrachtung muss für das reale PVDF um die restlichen Raumrichtungen und die entsprechenden Koppelterme erweitert werden. Eine wichtige Erkenntnis aus dieser Gleichung ist, dass passive Sensor- bzw. Elektrodenfläche die Kapazität des Sensors erhöht und dadurch die gemessene Sensorausgangsspannung reduziert.

Die piezoelektrischen Ladungskonstanten des für die Simulation verwendeten PVDF sind $d_{31}=21,4$ pC/N, $d_{32}= 2,3$ pC/N, $d_{33}=-31,5$ pC/N. Daher liefert eine positiv gerichtete Kraft in X- und Y-Richtung eine positive Sensorausgangsspannung und in Z-Richtung eine Negative. Dies lässt sich umgekehrt auf den inversen piezoelektrischen Effekt übertragen.

Zusätzlich folgt aus dieser Betrachtung, dass über die piezoelektrische Konstante ein linearer Zusammenhang zwischen Kraft und Ausgangsspannung besteht. Dies ist typisch für das Kleinsignalverhalten eines piezoelektrischen Sensors und gilt für kleine Kräfte, bei denen zu vernachlässigende Verformungen am Sensormaterial auftreten.

3.2 Einflussgrößen auf die Sensorempfindlichkeit von PVDF und Störgrößen

Die grundsätzliche Funktionsweise eines Sensors besteht darin eine spezifische physikalische Größe in ein auswertbares Signal umzuwandeln. Mithilfe der bekannten Empfindlichkeit des Sensors kann dann im Umkehrschluss aus der elektrischen Ausgangsspannung des Sensors auf die physikalische Größe geschlossen werden.

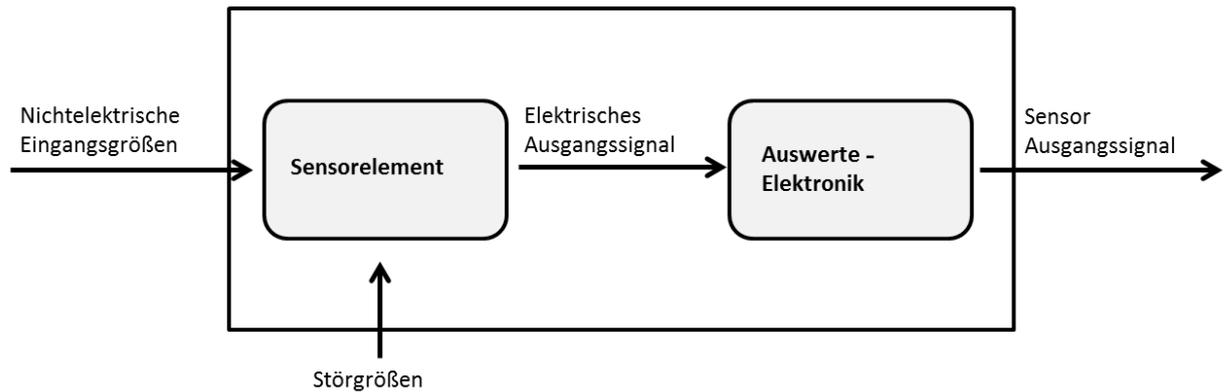


Abbildung 3-9: Wirkprinzip von Sensoren (Hering & Schönfeld, 2012)

Damit dieses Funktionsprinzip in der Realität angewendet werden kann ist es von enormer Wichtigkeit die physikalischen Eigenschaften des im Sensorelement verwendeten Wandlers genau zu kennen. Weiterhin müssen die Einflussparameter auf diese Eigenschaften und mögliche Störgrößen bekannt sein.

Physikalische Eigenschaften

Die piezoelektrischen und auch mechanischen Materialeigenschaften von PVDF werden durch den Herstellungsprozess bestimmt. Entscheidend sind insbesondere das Streckungsverhältnis und die Stärke des zur Polarisierung verwendeten elektrischen Feldes. Die Steifigkeiten und die thermischen Ausdehnungskoeffizienten jeder Raumrichtung sind eine Funktion des Streckungsgrades. Das Strecken richtet die Polymerketten aus, daher weist ein biaxial gestrecktes PVDF nach (Lynch, 1993) und (Thompson, 2002) andere piezoelektrische und mechanische Eigenschaften als ein uniaxial gestrecktes PVDF auf. Die bereits erwähnten piezoelektrischen Ladungskonstanten d_{31} und d_{32} sind für ein biaxial gestrecktes PVDF in etwa gleich groß, während bei uniaxialer Streckung d_{31} etwa um das 5 bis 10-fache größer ist als d_{32} (Sinapius, 2013).

Ebenso ergeben sich die pyroelektrischen und piezoelektrischen Eigenschaften in Abhängigkeit der Polarisierungsspannung und der Temperaturhistorie bei der Herstellung. Bei einer Reduktion der Polarisierungsspannung um 20% wird auch eine Verringerung der piezoelektrischen Ausgangsspannung des Sensors um 20% beobachtet (Lynch, 1993).

Diese Eigenschaft von PVDF darf jedoch nicht als Nachteil gewertet werden, da sich dieser Werkstoff somit gut an unterschiedliche Anforderungen anpassen lässt. Wichtig ist aber zu beachten, dass Materialkennwerte nur für PVDF gelten, das unter identischen Voraussetzungen gefertigt wurde und aktuell denselben Umgebungsbedingungen ausgesetzt ist.

Umgebungseinflüsse auf die physikalischen Eigenschaften von PVDF

PVDF ist ein teilkristalliner, thermoplastischer Kunststoff. Daher sind die mechanischen Eigenschaften stark von der Umgebungstemperatur abhängig.

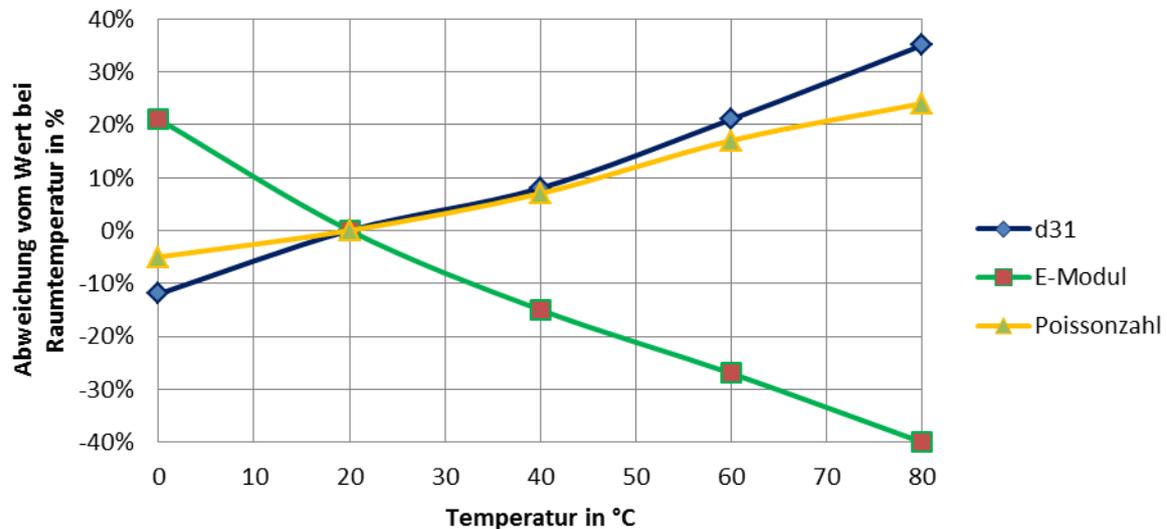


Abbildung 3-10: Temperaturabhängig einiger wichtiger Kennwerte von PVDF bei konstanter Frequenz von 10Hz bzw. 1kHz (Poissonzahl), nach (Thompson, 2002)

Wie in Abbildung 3-10 dargestellt, sind wichtige Kennwerte für die Verwendung von PVDF als Sensor temperaturabhängig. Mit steigender Temperatur nimmt der E-Modul um etwa 7% bis 10% pro 10°C ab. Dagegen steigen sowohl die Poissonzahl als auch die Konstante d_{31} . Die Werte für die Grafik wurden der Arbeit von (Thompson, 2002) entnommen und hier zusammengefasst. Wichtig ist zu beachten, dass alle Werte bei jeweils konstanter Frequenz bestimmt wurden.

Zudem beeinflusst auch die Anregungsfrequenz die Eigenschaften von PVDF. Dabei werden hier beispielhaft 2 Grafiken vorgestellt, die die Frequenzabhängigkeit der Nachgiebigkeit und der piezoelektrischen Ladungskonstante d_{31} zeigen. Für die Y- und Z-Richtung bestehen ebenfalls Abhängigkeiten die in (Thompson, 2002) detailliert behandelt werden.

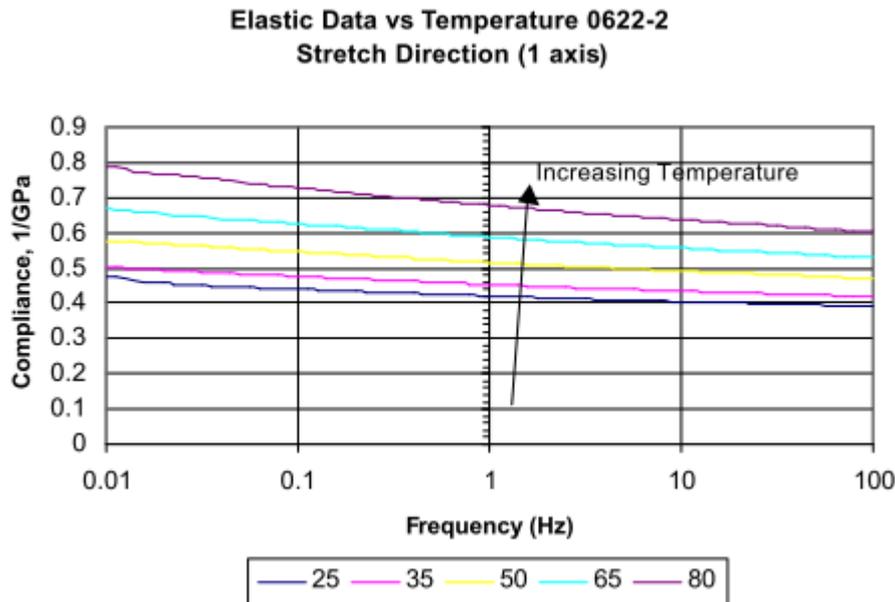


Abbildung 3-11: Nachgiebigkeit von PVDF in X-Richtung in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz für verschiedene Temperaturen aus (Thompson, 2002)

Aus Abbildung 3-11 geht hervor, dass die Nachgiebigkeit in dem ausgewählten Spektrum von 0,01 Hz bis 100 Hz um etwa 20 % abnimmt. Dies gilt für den gesamten untersuchten Temperaturbereich von 25 °C bis 80°C.

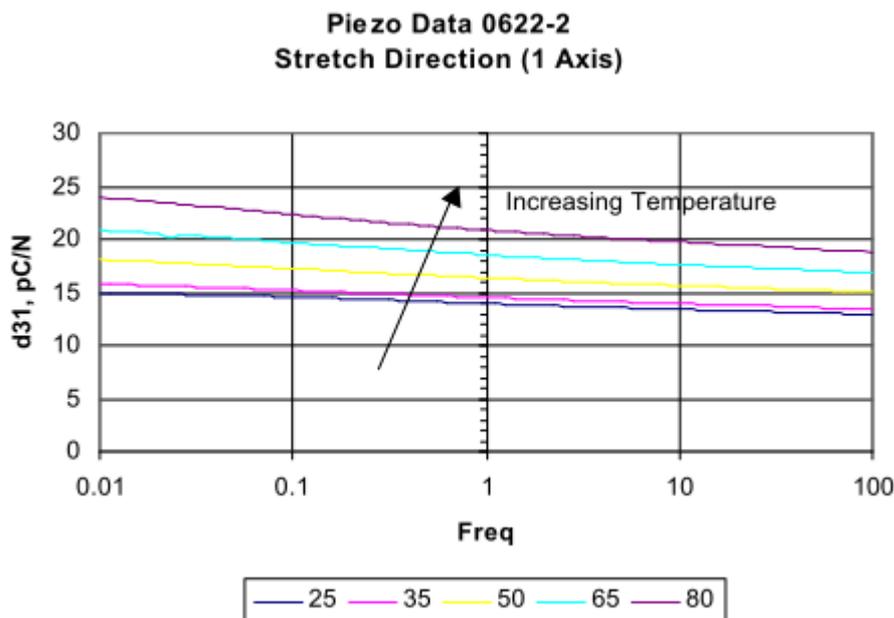


Abbildung 3-12: Piezoelektrische Ladungskonstante d_{31} in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz für verschiedene Temperaturen aus (Thompson, 2002)

Die piezoelektrische Ladungskonstante fällt in dem in Abbildung 3-12 dargestellten Frequenzbereich ebenfalls um etwa 20 %.

Ebenfalls frequenzabhängig sind die Dielektrizitätskonstante und die dielektrische Verlustkonstante von PVDF. Diese werden in (Thompson, 2002) und in (Yadav, et al., 2010) untersucht. Die dielektrischen Eigenschaften charakterisieren das Verhalten des Sensors als Kondensator. Beide Quellen dokumentieren ebenfalls, dass dem Material der Elektroden eine große Bedeutung zukommt.

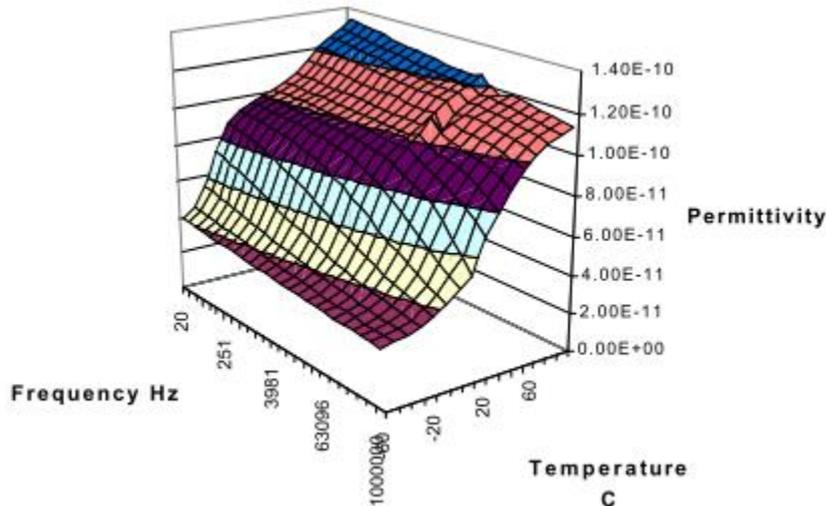


Abbildung 3-13: Permittivität von PVDF in Abhängigkeit von Anregungsfrequenz und Temperatur aus (Thompson, 2002)

Da die Kapazität des Sensors über $C = \epsilon_0 * \epsilon_r * \frac{A_E}{d}$ direkt proportional zur Permittivität ist und die Sensorausgangsspannung von ihr abhängt ist die Empfindlichkeit des Sensors also abhängig von der Frequenz.

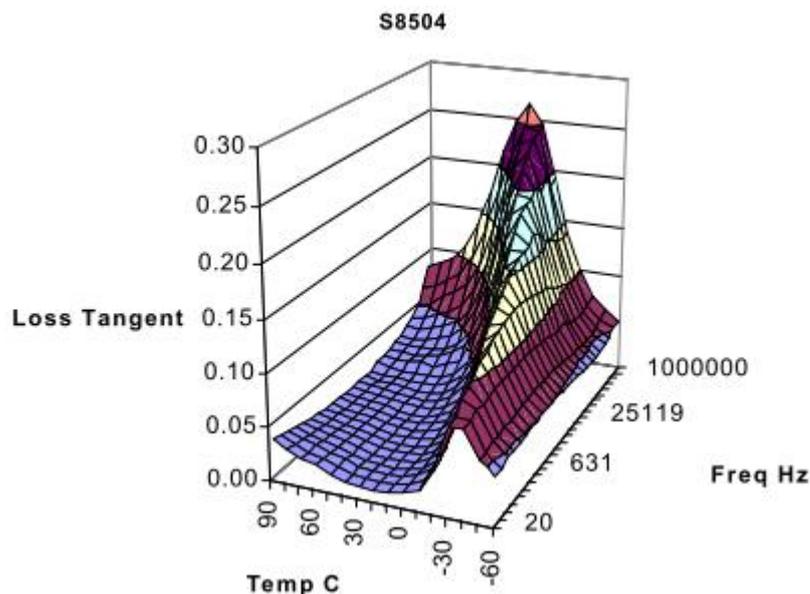


Abbildung 3-14: Dielektrischer Verlustkoeffizient in Abhängigkeit von Temperatur und Anregungsfrequenz aus (Thompson, 2002)

Der dielektrische Verlustkoeffizient $\tan \delta_e$ beschreibt das Verhältnis von Wirkleistung zu Blindleistung des Kondensators. Er gewinnt wie in Abbildung 3-14 gut zu sehen ist insbesondere für höhere Frequenzen an Bedeutung.

Störgrößen

Eine besondere Gefahr geht für jede Sensoranwendung von unbemerkten Störgrößen aus, da sie einen Einfluss auf die Sensorausgangsspannung haben und damit ein Sensorausgangssignal erzeugen oder überlagern, dass nicht durch die gesuchte physikalische Größe verursacht wurde. Beim Rückschluss aus der gemessenen Ausgangsspannung wird damit dann ein falscher Wert für die gesuchte Größe ermittelt.

Für kleine Sensorausgangsspannungen stellen elektrische Störsignale wie beispielsweise 50 Hz Brummspannungen ein Problem dar, da sie das Sensorsignal durch Rauschen teilweise überlagern (PI Ceramic GmbH, 2016) (Bulur, 2015). Sie können durch entsprechendes Abschirmen, Koaxialkabel und Erden weitestgehend unterdrückt werden.

Durch unvermeidbare Fehlerströme und -spannungen im verwendeten Messverstärker wird ein Wegdriften der Nullpunktlage verursacht. Dadurch übersteuert der Messverstärker und verfälscht letztendlich das Signal.

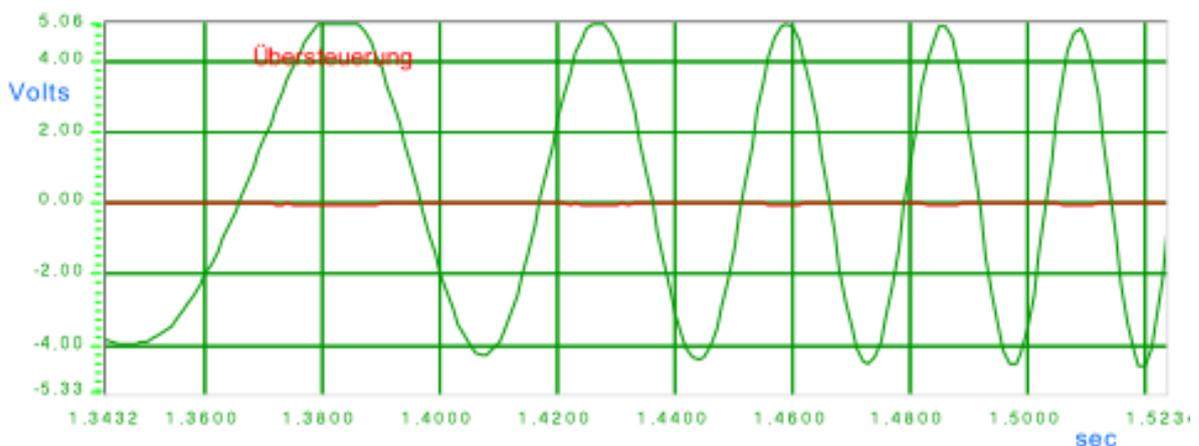


Abbildung 3-15: Beispiel für eine Signalübersteuerung in (PI Ceramic GmbH, 2016)

Dieses Verhalten kann durch Verwendung eines Entladewiderstandes stabilisiert werden da er das Ausgangssignal mit einer definierten Zeitkonstante $T = R * C$ zum Null-Niveau zurückführt (PI Ceramic GmbH, 2016).

Da der PVDF-Sensor gleichzeitig ein Kondensator mit der Kapazität C ist und die Messausrüstung einen gewissen Widerstand R besitzt, entsteht automatisch ein Hochpassfilter. Die untere Grenzfrequenz ergibt sich zu

$$f_{gu} = \frac{1}{2 * \pi * R * C} \quad (3-11)$$

Unterhalb dieser Frequenz wird die Amplitude aller Signale in Abhängigkeit ihrer Frequenz gedämpft (PI Ceramic GmbH, 2016). Dies verzerrt das gemessene Signal in

Bezug auf das Tatsächliche. Zwei ausgewählte Beispiele aus (Measurement Specialties, Inc., 2008) sind dafür in Abbildung 8-1 und Abbildung 8-2 dargestellt.

PVDF besitzt auch starke pyroelektrische Eigenschaften. Der pyroelektrische Effekt bezeichnet die Fähigkeit eines Stoffes eine Temperaturdifferenz in eine Spannung umzuwandeln. Pyroelektrische Effekte lassen sich in der Anwendungspraxis nur sehr schwer von den piezoelektrischen Effekten isolieren. Um sie zu korrigieren ist es notwendig alle Temperaturen genau zu kennen und Korrekturrechnungen der Messergebnisse durchzuführen. Die Sensorausgangsspannung $U_{(\Delta T)}$ infolge des pyroelektrischen Effekt berechnet sich nach (Müller, 2013) zu:

$$Q = p_3 * \Delta T * A \quad (3-12)$$

Dabei ist Q die Ladung auf der Sensoroberfläche, p_3 die pyroelektrische Konstante in Dickenrichtung und ΔT die Temperaturdifferenz.

$$U_{(\Delta T)} = \frac{Q}{C_{PVDF}} = \frac{p_3 * \Delta T * A}{\epsilon_0 * \epsilon_r} \quad (3-13)$$

Entscheidend für den Einfluss des pyroelektrischen Effekts ist also die Temperaturdifferenz ΔT und das Verhältnis zwischen der pyroelektrischen Konstante p_3 und den für den piezoelektrischen Effekt genutzten Konstanten d_{31} , d_{32} und d_{33} . Die aus dem pyroelektrischen Effekt gemessene Spannung unterliegt derselben bereits angesprochenen Filtercharakteristik. Dadurch werden langsame Temperaturänderungen die eine sehr niederfrequente Anregung unterhalb der unteren Grenzfrequenz f_{gu} des Sensors darstellen automatisch eliminiert (Müller, 2013).

3.3 Grundlagen FEM /ANSYS®

Die Finite Elemente Methode ist seit Jahren der Standard für numerische Berechnungen von physikalischen Problemstellungen wie sie in den Ingenieurwissenschaften in verschiedenster Form auftreten. Dabei wird das physikalische Problem zunächst meist mithilfe einer partiellen Differentialgleichung und passenden Randbedingungen beschrieben. Multiplikation mit einer Testfunktion und Integration führt auf die schwache Formulierung der partiellen Differentialgleichung. Wendet man nun Galerkins Näherungsmethode mit Finiten Elementen an, erhält man ein Gleichungssystem, das das physikalische Problem für jedes Element beschreibt. Die Lösung dieser Systemmatrix liefert die gesuchte physikalische Größe an den Elementknoten (Lagrange) bzw. entlang der Elementkanten (Nédélec). (Kaltenbacher, 2015)

Von besonderem Vorteil ist bei dieser Methode, dass die durch Diskretisierung entstehenden Gleichungssysteme zumeist dünn besetzte symmetrische Matrizen sind, die sich effizient von Rechnern lösen lassen. Weiterhin sind nicht lineare Materialeigenschaften unproblematisch und komplexe Geometrien lassen sich mithilfe von dreieckigen bzw. tetraederförmigen Elementen gut diskretisieren. Die Finite

Elemente Methode lässt sich sowohl für statische, transiente, harmonische und Eigenwertprobleme anwenden.

Nachteilig ist, dass die gesamte Fläche bzw. das gesamte Volumen diskretisiert werden muss. Weiterhin sind physikalische Problemstellungen schwierig zu betrachten bei denen keine konkreten Modellränder definiert werden können.

Auf eine Herleitung der Grundgleichungen und eine tiefere Betrachtung der Methoden soll an dieser Stelle verzichtet werden. Sie ist in der Literatur u. A. in (Bathe, 2002) nachzulesen.

Für die Simulation wird die Finite-Elemente-Software ANSYS Classic verwendet da sie gut dazu geeignet ist piezoelektrische Materialien und den piezoelektrischen Effekt zu modellieren. ANSYS ist seit Jahrzehnten eine der meistverwendeten Softwares in diesem Bereich und wird daher hier nicht näher erläutert. Als Literatur ist hier insbesondere auf die Buchreihe FEM für Praktiker vgl. Tabelle 8-3 zu verweisen.

4 Simulation der Sensorausgangsspannung infolge der Tropfenaufrallkraft in ANSYS Classic

In diesem Kapitel wird zunächst der Modellaufbau des PVDF-Sensors in ANSYS Classic vorgestellt. Dazu werden zwei Ansätze vorgestellt, wie die Impulskraft des nicht mitmodellierten Tropfens unter Berücksichtigung der Massenverteilung an das Modell übergeben werden kann. Außerdem sind alle für die Modellbildung verwendeten Größen und Parameter zusammengestellt. Da einige der piezoelektrischen Parameter nicht bekannt sind, wird kurz auf Möglichkeiten eingegangen wie sie bestimmt werden können. Anhand des Modells des ebenen Sensors wird das Simulationsmodell validiert. Zusätzlich werden die beiden Ansätze zur Modellierung der Tropfenkraft für verschiedene Netzfeinheiten verglichen. Da nicht alle piezoelektrischen Parameter bekannt sind wird der Einfluss der ersatzweise aus der Literatur entnommenen Werte auf die berechnete Sensorausgangsspannung untersucht. Diese Untersuchung wird auch für eine gekrümmte Sensoranordnung auf einem dünnwandigen und einem dickwandigen Substratprofil wiederholt. Anschließend wird in einer transienten Rechnung der zeitliche Verlauf der Sensorausgangsspannung während und nach dem Impuls untersucht. Abschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst und das weitere Vorgehen vorgestellt.

4.1 Modellaufbau des piezoelektrischen Sensors in ANSYS

Der freie Fall und Aufprall eines Tropfens auf einer Oberfläche ist ein komplexes Problem. Die Stoßzahl ist abhängig von der Aufprallgeschwindigkeit, der

Oberflächenspannung des Wassers, und der Art der Oberfläche. Die Form des Tropfens ist nicht konstant, sondern schwingt zwischen tropfen- und linsenähnlichen Formen.

Weiterhin kann der Tropfen während des Aufpralls zerplatzen wobei einige Teile zunächst abprallen und wieder auf die Oberfläche zurückfallen. Die Simulation dieses Vorgangs ist sehr aufwändig und wird daher umgangen, indem die experimentell ermittelten Kräfte auf das Sensormodell vorgegeben werden. Der zeitliche Verlauf ergibt sich ebenfalls aus den Messwerten der Experimente (Bulur, 2015). Das jeweilige Sensormodell soll daraus dann die im Experiment gemessene Ausgangsspannung berechnen.

Die im Experiment gemessene Sensorausgangsspannung lässt keine Rückschlüsse auf die lokale Verteilung der wirkenden Kräfte zu. Daher muss die daraus ermittelte Tropfenkraft als durchschnittlich auf der Tropfenaufrallfläche wirkende Kraft verstanden werden. Im Sinne einer realistischen Modellbildung soll die tatsächliche Kraftverteilung bestmöglich approximiert werden.

Da die tatsächliche Form des Tropfens unbekannt ist wird er als Kugel idealisiert. Der unter dieser Annahme berechnete Tropfenradius fällt kleiner aus als er bei einem linsenförmigen Tropfen wäre und größer als bei einem tropfenförmigen Tropfen. Daher kann er als stochastische Näherung der tatsächlichen Form betrachtet werden und ist zudem einfach zu berechnen.

$$V = \frac{4}{3}\pi * r^3 \quad (4-1)$$

$$m = \rho * V \quad (4-2)$$

$$r_T = \sqrt[3]{\frac{3 * m}{4 * \pi * \rho}} \quad (4-3)$$

Mit $\rho = 1000 \frac{kg}{m^3}$ und $m = 12,63 * 10^{-6} kg$ (Bulur, 2015) ergibt sich der idealisierte Tropfendurchmesser zu $r_T = 1,445 * 10^{-3} m$.

Eine weitere Annahme besteht darin, dass die Tropfenkraft nur auf der projizierten Fläche des Tropfens wirkt. Dabei werden eventuell abprallende und an anderer Stelle auf den Sensor zurückfallende Tröpfchen, die Oberflächenspannung, die zeitliche Änderung der Kontaktfläche sowie eine Verformung des Tropfens während des Aufpralls vernachlässigt. Diese Vereinfachung beruht auf der Annahme, dass die im Tropfen verteilte Masse durch ihre Trägheit beim Aufprall auf den Sensor dessen Verformung und damit die gemessene Ausgangsspannung maßgeblich verursacht. Damit ergibt sich eine Kraftverteilung auf der Sensoroberfläche proportional zur Massenverteilung im Tropfen in Abhängigkeit vom Radius auf der projizierten Tropfenaufrallfläche.

Als weitere Vereinfachung wird der Sensor ohne Klebstoffschicht, Trägerfolie und Elektroden implementiert. Diese Vereinfachung kann gemacht werden, da die einzelnen Lagen bei Belastung in Dickenrichtung als Reihenschaltung von Federn betrachtet

werden können. Für die Sensorausgangsspannung ist allein die Dehnung des PVDF entscheidend. Diese ist allein von der wirkenden Kraft und von der Steifigkeit des PVDF abhängig und nicht von den angrenzenden Federn.

Im Rahmen der Fehlersuche in Kapitel 0 wird eine Klebstoffschicht implementiert und daraus deutlich, dass diese tatsächlich keinen Einfluss auf die berechnete Sensorausgangsspannung hat. Es wird also nur der von den Elektroden bedeckte Teil der PVDF Folie für die Simulation berücksichtigt.

Aufgrund der Rotationssymmetrie des Tropfens und der Aufprallfläche lässt sich das Problem zweidimensional betrachten. Die Masse in einem kugelförmigen Tropfen über jedem beliebigen Punkt P der Tropfenaufprallfläche ist abhängig von seinem Abstand r zum Mittelpunkt M der projizierten Tropfenaufprallfläche. Durch M und P wird mit der Tropfenfalllinie eine Ebene definiert die den Tropfen in seinem Mittelpunkt schneidet. In Abbildung 4-1 ist dies die X-Z-Ebene. Die Masse über jedem Punkt P ist damit direkt proportional zur Länge der in Fallrichtung verlaufenden Sehne S im Tropfenschnitt. Die Sehne S soll dabei als Grenzwert eines infinitesimal kleinen Volumens V verstanden werden.

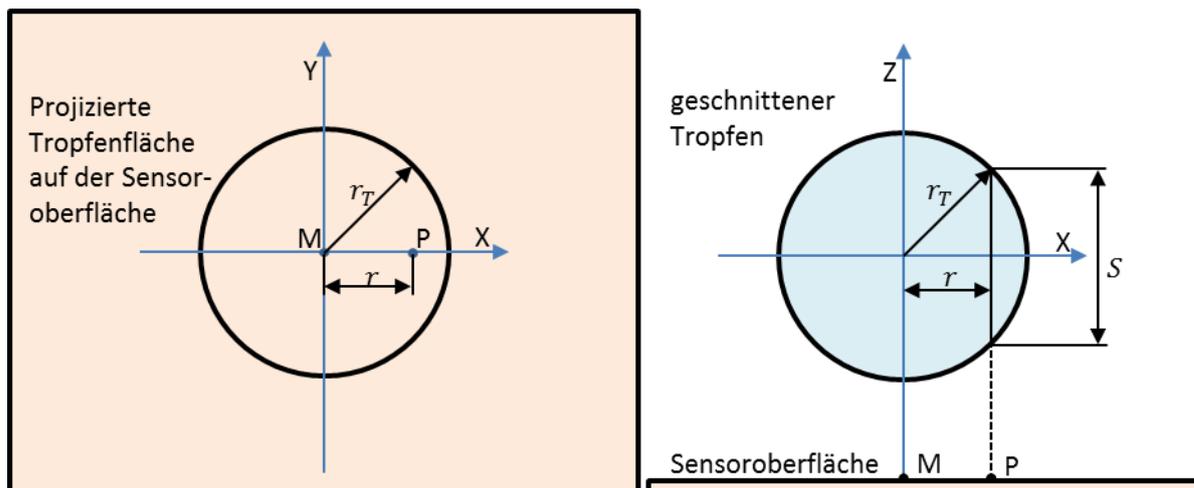


Abbildung 4-1: Der Modellbildung zugrunde liegende geometrische Zusammenhänge und Größen

Sie berechnet sich über die allgemeine Kreisgleichung

$$x^2 + z^2 = r^2 \quad (4-4)$$

Mit den Bezeichnungen aus dem Tropfenschnitt in Abbildung 4-1

$$r^2 + \left(\frac{S}{2}\right)^2 = r_T^2 \quad (4-5)$$

Durch elementare Umformung ergibt sich die Länge der Sehne S

$$S = 2 * \sqrt{r_T^2 - r^2} \quad (4-6)$$

Wenn der Tropfen nach dem Aufprall auf dem Sensor verbleibt, kann der Vorgang als vollständig inelastischer Stoß betrachtet werden. Auf die Herleitung der Formel soll an dieser Stelle verzichtet werden, da sie für die räumliche Kraftverteilung nicht relevant ist. Sie kann u. A. bei (Tipler & Mosca, 2012) nachgelesen werden. Für den vollständig inelastischen Stoß gilt danach:

$$(\Delta p)_i = \int_{t_A}^{t_E} F_i dt = -p_{i,A} = -m_i * v_i \quad (4-7)$$

In erster Näherung ergibt sich die Kraft, deren zeitlicher Verlauf die Stoßkraft des Aufpralls bestimmt, für die vorliegende Betrachtung zu:

$$F = \frac{m_T}{\Delta t} * \Delta v_T \quad (4-8)$$

Daraus lässt sich entnehmen, dass die Verteilung der Kraft der Verteilung des Volumens multipliziert mit $\rho * \Delta v_T$ entspricht. Da ein unidirektional gestreckter oder gestauchter Kreis einer Ellipse entspricht, ergibt sich für die Kraftverteilung eine elliptische Form. Die Halbachse in Z-Richtung entspricht dabei der maximalen Kraft F_{max} und die in X-Richtung dem maximalen Radius r_T .

Der weitere Ansatz besteht darin, die linear verteilte Kraft F_q die auf die Kreisfläche mit dem Radius r_T wirkt so in eine elliptische Verteilung über dem gleichen Radius r_T zu überführen, dass das Integral der beiden Kraftverläufe in den Grenzen von $-r_T$ bis r_T gleich ist. Aus Symmetriegründen kann weiter auf die Grenzen von 0 bis r_T vereinfacht werden. Da die Integrale den Flächen von Rechteck

$$A_{Rechteck} = a * b = F_q * r_T \quad (4-9)$$

und einer viertel-Ellipse entsprechen,

$$A_{Ellipse} = \pi * r_1 * r_2 = \pi * F_{max} * r_T \quad (4-10)$$

folgt einfacher:

$$F_q * r_T = \frac{1}{4} \pi * F_{max} * r_T \quad (4-11)$$

Die bisher unbekannte maximale Tropfenkraft F_{max} ergibt sich dann zu:

$$F_{max} = \frac{4F_q}{\pi} \quad (4-12)$$

Einsetzen in die allgemeine Ellipsengleichung

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (4-13)$$

$$\frac{F_{(r)}^2}{F_{max}^2} + \frac{r^2}{r_T^2} = 1 \quad (4-14)$$

und auflösen nach $F_{(r)}$ liefert dann die Gleichung der Kraftverteilung in Abhängigkeit von der experimentell ermittelten Durchschnittskraft F_q .

$$F_{(r)} = \frac{4F_q}{\pi} * \sqrt{1 - \frac{r^2}{r_T^2}} \quad (4-15)$$

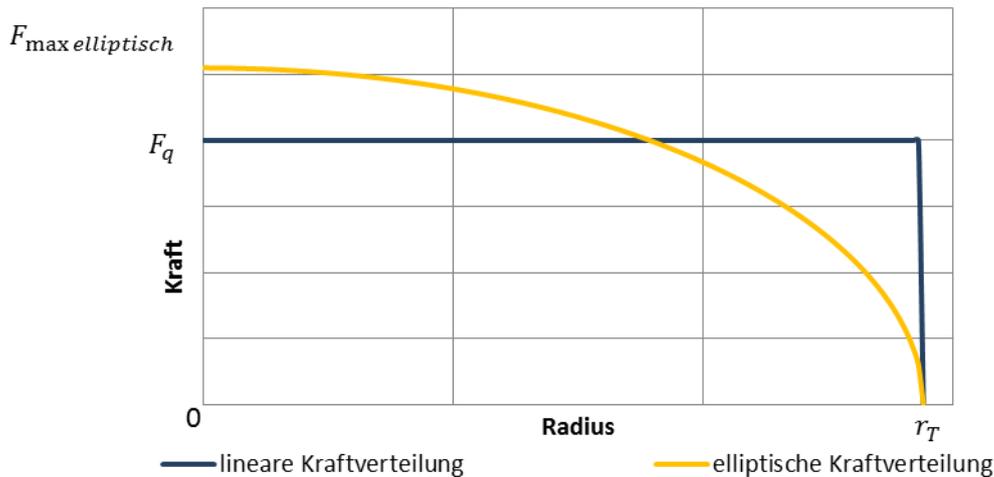


Abbildung 4-2: elliptisch idealisierte Tropfenkraft über dem Radius der projizierten Tropfenaufprallfläche auf dem Sensor

Die unbekannte Verteilung der Tropfenkraft kann auch mithilfe einer cosinusförmigen Kraftverteilung approximiert werden. Diese Annahme berücksichtigt ebenfalls, dass sich der Großteil der Tropfenmasse zum Zeitpunkt des Aufpralls über dem projizierten Tropfenmittelpunkt befindet und zu den Rändern abnimmt. Wie bei der elliptischen Kraftverteilung tritt die maximale Tropfenkraft am Radius $r = 0$ auf und wird für $r = r_T$ zu Null. Die Summe der Teilkräfte ergibt sich damit zu

$$\int_0^{r_T} F_{(r)} dr = \int_0^{r_T} F_{max} * \cos\left(\frac{r}{r_T} \frac{\pi}{2}\right) dr \quad (4-16)$$

Die Summe der experimentell bestimmten mittleren Tropfenkraft F_q ergibt sich über dem Radius r zu

$$\int_0^{r_T} F_q dr = F_q * r_T \quad (4-17)$$

Da die Summe der Teilkräfte des approximierten Tropfenkraftverlaufs mit dem experimentell Ermittelten in (Bulur, 2015) über dem Radius identisch sein soll werden die Integrale (4-16) und (4-17) gleichgesetzt. Integration in den Grenzen von 0 bis r_T führt auf

$$F_q * r_T = F_{max} * \frac{2r_T}{\pi} \quad (4-18)$$

Damit ergibt sich die maximale Tropfenkraft F_{max} zu

$$F_{max} = F_q * \frac{\pi}{2} \quad (4-19)$$

Mit (4-19) und der Kraftverteilung aus (4-16) erhält man nun die idealisierte Tropfenkraft $F_{(r)}$ in Abhängigkeit vom Radius r und der experimentell ermittelten mittleren Tropfenkraft F_q .

$$F_{(r)} = F_q * \frac{\pi}{2} * \cos\left(\frac{r \pi}{r_T \frac{\pi}{2}}\right) \quad (4-20)$$

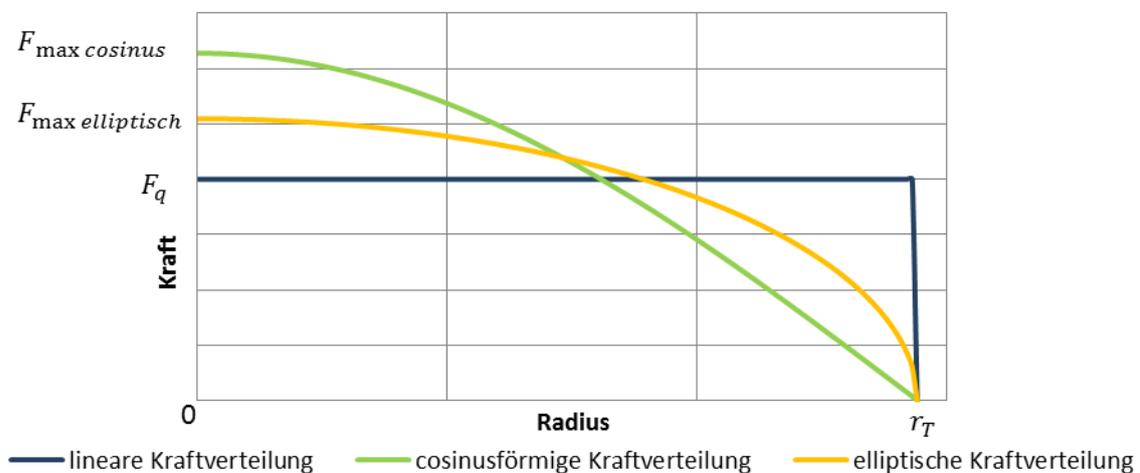


Abbildung 4-3: Verlauf der beiden approximierten Tropfenkräfte über dem Radius der idealisierten Aufprallfläche

Die beiden vorgestellten Ansätze zur Annäherung der unbekanntenen Verteilung der Tropfenkraft über der Aufprallfläche werden in Abbildung 4-3 der gemittelten Tropfenkraft gegenübergestellt. Gut zu sehen ist, dass die cosinusförmige Kraftverteilung eine höhere Maximalkraft aufweist als die elliptische Verteilung, dann aber zu den Tropfenrändern hin schneller abfällt. Beide Ansätze werden im Simulationsmodell mit dem ebenen Sensor implementiert und die damit berechneten Ausgangsspannungen mit dem experimentell ermittelten Wert verglichen. Die Rechnung wird für unterschiedlich feine Vernetzungen des Modells durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-7 dargestellt. Der Ansatz

der die experimentell ermittelten Werte besser annähert wird für die weiteren Untersuchungen verwendet. Auf eine zeitliche Anpassung der Tropfenaufprallfläche wird verzichtet, da die zeitliche Änderung unbekannt ist und aufgrund der Verzögerung des Tropfens beim Aufprall bei gleichzeitiger Formänderung auch nur schwer abschätzbar ist. Zudem wäre diese Abschätzung sicher mit Unsicherheiten behaftet was keine Verbesserung der recht guten Ergebnisse erwarten lässt.

Das Modell wird in ANSYS APDL voll parametrisiert erstellt, so können Materialeigenschaften, Abmessungen und die Tropfenkraft leicht variiert werden. Das Modell besteht für den ebenen Sensor nur aus PVDF.

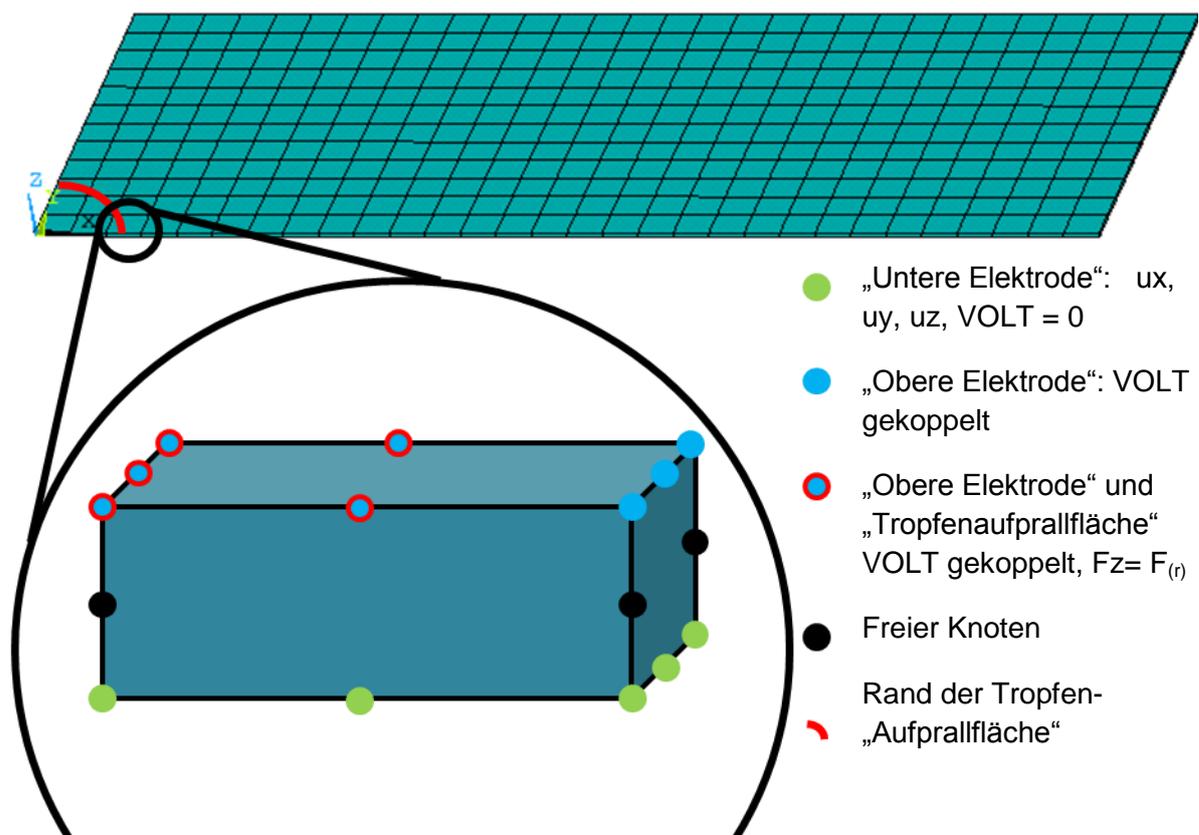


Abbildung 4-4: Viertelschnitt des ebenen Sensors mit Vernetzung, Begrenzung der Tropfenaufprallfläche. Die Randbedingungen werden anhand eines repräsentativ gewählten Elements veranschaulicht.

ANSYS bietet eine breite Palette an Elementtypen für verschiedene Anwendungen an. Für die vorliegende Untersuchung wird ein Elementtyp benötigt, der strukturelle und piezoelektrische Eigenschaften hat, dies stellt somit die Mindestanforderung dar. Die Möglichkeit Temperatureffekte und temperaturabhängige Werkstoffparameter zu berücksichtigen ist zunächst nicht notwendig, wird aber im Hinblick auf die große Temperaturempfindlichkeit von PVDF für weiterführende Untersuchungen als Wunschanforderung mit betrachtet. Um den wichtigen d_{33} -Effekt in Dickenrichtung optimal abbilden zu können, wird ein dreidimensionaler Elementtyp bevorzugt. Der Sensor wird für alle Modelle mit dem Elementtyp SOLID 226 diskretisiert. SOLID 226 ist ein rechteckiges Volumenelement und besitzt wie im Ausschnitt in

Abbildung 4-4 zu erkennen 20 Knoten die mit bis zu 5 Freiheitsgraden belegt werden können. Für die Simulation sind die Knotenverschiebungen u_x , u_y , u_z wichtig, sowie die elektrische Ladung VOLT. Zudem können die für die Simulation wichtigen piezoelektrischen Eigenschaften und die anisotrope Steifigkeitsmatrix hinterlegt werden. Zudem stehen umfangreiche weitere Funktionen zur Verfügung, die neben den Mindestanforderungen auch alle Wunschanforderungen erfüllen.

Randbedingungen, Anfangsbedingungen und Kräfte werden über die Knoten an das System übergeben. Zur leichten Auswahl werden die gewünschten Knoten in Komponenten zusammengefasst. Alle Knoten auf der Sensorunterseite sind Teil der Komponente „untere Elektrode“. Für alle dazugehörigen Knoten werden die translatorischen Freiheitsgrade zu Null gesetzt. Außerdem wird die elektrische Ladung zu Null gesetzt und der Sensor so „geerdet“.

Analog bilden alle Knoten der Sensoroberfläche die Komponente „obere Elektrode“ die Ladung dieser Knoten wird gekoppelt, d.h. alle Knoten besitzen dieselbe Spannung, die der durchschnittlichen Spannung der einzelnen Knoten entspricht und damit der Sensorausgangsspannung entspricht.

Die Knoten der „oberen Elektrode“ die sich innerhalb des Tropfenradius befinden gehören zusätzlich zur Komponente „Aufprallfläche“ über sie wird die Tropfenkraft wie in Abschnitt 4.3 beschrieben eingeleitet.

Randbedingungen	Ebener Sensor		Gekrümmter Sensor auf Profil
Einspannung	„untere_elektrode“ eingespannt $u_x, u_y, u_z = 0$ Freiheitsgrad VOLT= 0	fest	Rand bei $z = 0$ fest eingespannt $u_x, u_y, u_z = 0$ Freiheitsgrad VOLT= 0
Erdung untere Elektrode			
Kopplung	„untere_elektrode“ VOLT		„untere_elektrode“ VOLT
Kopplung	„obere_elektrode“ VOLT		„obere_elektrode“ VOLT
Kraft	Fz auf „Aufprallfläche“		Fz auf „Aufprallfläche“
Anfangsbedingungen			
Kraft	0		0
Spannung	0		0
Verschiebungen	0		0

Tabelle 4-1: Randbedingungen und Anfangsbedingungen für den ebenen Sensor und den gekrümmten Sensor auf dem Profilmodell

Für den gekrümmten Sensor wird als Substrat ein Aluminiumprofil mitmodelliert vgl. Abbildung 4-10. Der dafür verwendete Elementtyp muss lediglich für eine Strukturberechnung geeignet sein. Im Hinblick auf die mögliche Verwendung von Faserverbundwerkstoffen als Substrat und variable Temperaturen fällt die Entscheidung auf SOLID 186. Dieser Elementtyp besitzt ebenfalls 20 Knoten. Es können Schichten mit verschiedenen Werkstoffeigenschaften und verschiedene Temperaturen berücksichtigt werden.

Die Eingabedaten sind nachfolgend aufgelistet.

Größe	Wert	Kommentar
Länge l	$30 * 10^{-3}m$	
Breite b	$12 * 10^{-3}m$	
Dicke t	$0,054 * 10^{-3}m (\pm 6 * 10^{-6}m)$	
Dichte ρ	$1780 \frac{kg}{m^3}$	
Relative Permittivität ϵ_r	12,5	
Steifigkeitsmatrix $[C^E]$	$\begin{bmatrix} 7.02 & 3.82 & 4.43 & 0 & 0 & 0 \\ 3.82 & 4.88 & 3.01 & 0 & 0 & 0 \\ 4.43 & 3.01 & 4.82 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.55 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.59 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.69 \end{bmatrix}$ $* 10^9 \frac{N}{m^2}$	
Piezoelektrische Kraftkonstante $[e]$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0.01 \\ 0 & 0 & 0 & 0.01 & 0 \\ 0.01 & -0.007 & -0.059 & 0 & 0 \end{bmatrix} * \frac{C}{m^2}$	
Elementtyp	Et, 1, SOLID 226	
Keyopt 1	keyopt, 1, 1, 1001 ¹	Piezoelektrische Eigenschaft
Keyopt 4	keyopt, 1, 4, 0	Ladung auf jeden Knoten
Keyopt 11	keyopt, 1, 11,	Reine Verschiebungsformulierung
Materialtyp	mat, 1	

Tabelle 4-2: Eingabedaten und Einstellungen für den PVDF-Sensor in ANSYS

Die Materialkennwerte und Abmessungen des Sensors wurden, soweit vorhanden, aus dem Datenblatt des Herstellers entnommen vgl. Tabelle 8-5. Die hohe Toleranz in der Sensordicke hat einen signifikanten Einfluss auf die zu erwartenden Simulationsergebnisse. Laut Information von MEAS wird diese Toleranz in der Praxis nie ausgenutzt. Verlässliche statistische Erhebungen liegen jedoch nicht vor. Die Daten für die Steifigkeitsmatrix und die piezoelektrischen Kraftkonstanten sind (Bulur, 2015) entnommen und stammen aus (Keppler & Anderson, 1978).

Größe	Wert	Kommentar
Breite b	250 mm	
äußerer Radius r_a	17,5 mm	
Dicke t	0,5 mm	
Dichte ρ	$2700 \frac{kg}{m^3}$	

¹ Eingabe im Format: keyopt,Elementtypnummer,Keyoptionsnummer,Option

Poissonzahl	0,33	
E-Modul	$70 \cdot 10^9 \frac{N}{m^2}$	
Elementtyp	et,2,solid186	
Keyopt 2	keyopt,2,2,0	Reduziertes Integrationsverfahren
Keyopt 3	keyopt,2,3,0	Festkörper, keine Schichten
Keyopt 6	keyopt,2,6,0	Reine Verschiebungsformulierung
Keyopt 15	keyopt,2,15,0	Keine Absorption von Schwingungen zwischen Lagen
Keyopt 16	keyopt,2,16,0	Keine stationäre Analyse
Materialtyp	mat,2	

Tabelle 4-3: Eingabedaten und Einstellungen für das Aluminiumprofil in ANSYS

4.2 Bestimmung der Parameter

Für die Definition von PVDF als Material in ANSYS ist es notwendig die relative Permittivität, die piezoelektrische Kraftkonstanten und die Steifigkeitsmatrix zu spezifizieren. Da für die praktische Anwendung als Sensor normalerweise ein isolierter Effekt verwendet wird, wird oft nicht die gesamte Matrix vom Hersteller im Datenblatt angegeben. Dies trifft auch auf den in (Bulur, 2015) verwendeten Sensor zu. Leider konnte der Hersteller MEAS keine nähere Auskunft erteilen. Für den verwendeten Sensor DT1-52K wird nur die Kapazität von 740 pF angegeben und keine weiteren piezoelektrischen Konstanten. Da der Hersteller offenbar ähnliche PVDF-Folie für eine breite Palette von Sensoren verwendet sind die bekannten Eigenschaften in einem allgemeinen Datenblatt zusammengefasst, das leider auch einige Widersprüche aufweist. Z.B. ist an anderer Stelle eine Kapazität von 650 pF dokumentiert, die Dicke des PVDF im verwendeten Sensors ist im Datenblatt mit 52 μm angegeben, wird aber von Mesa selbst auf 54 μm beziffert. Das allgemeine PVDF Datenblatt mit allen bekannten Größen ist in Tabelle 8-5 einzusehen.

Für die Eingabe in ANSYS wird die Steifigkeitsmatrix C und die piezoelektrischen Kraftkonstanten e benötigt. Bekannt sind nur die piezoelektrischen Ladungskonstanten d_{31} und d_{33} . Wie bereits erwähnt wird deshalb auf bekannte Werte eines ähnlichen PVDF-Films zurückgegriffen dessen Ladungskonstante d_{31} allerdings etwas abweicht. Die als sehr wichtig angesehene Ladungskonstante d_{33} ist gleich, vgl. Tabelle 8-1.

Es besteht die Möglichkeit die fehlenden Daten experimentell zu ermitteln. Zwei Ansätze werden dazu in (Y.R.V.V.R.T.V.V.Vardan, 1989) und (Thompson, 2002) gegeben. Im Rahmen dieser Arbeit können die fehlenden Größen nicht ermittelt werden, da das dazu notwendige Probenmaterial nicht vom Sensorhersteller MEAS zur Verfügung steht.

4.3 Modell ebener Sensor mit Elementkoordinatensystem

Ziel des Simulationsmodell mit ebenem Sensor ist es, anhand eines möglichst einfachen Modells, die Ergebnisse der Versuchsreihe zum Aufprall eines Wassertropfen auf einem eben auf einen massiven Aluminiumbalken applizierten PVDF-Sensor aus (Bulur, 2015) zu reproduzieren. Wie in 4.1 erläutert, soll dafür die mithilfe, der Sensorempfindlichkeit aus dem Experiment ermittelte, Tropfenaufrallkraft als Eingangsgröße vorgegeben und die gemessene Ausgangsspannung des Sensors berechnet werden. Dadurch soll validiert werden, dass der Sensor korrekt implementiert ist und für weiterführende Simulationen genutzt werden kann. Aufgrund der Einfachheit des Modells und des daraus resultierenden geringen Rechenaufwandes ist es vorteilhaft den Einfluss der Netzfeinheit auf die Qualität der Ergebnisse an diesem Modell zu untersuchen. Da der im Experiment als Substrat verwendete massive Aluminiumblock im Vergleich zum Sensor und Tropfen eine um mehrere Größenordnungen größere Masse und eine höhere Steifigkeit besitzt, kann angenommen werden, dass die Verschiebungen an jeder Stelle dieses Demonstrators gleich null sind. Somit kann der Aluminiumblock vereinfachend durch eine Begrenzung der translatorischen Freiheitsgrade der Knoten auf der Kontaktfläche zu Null ersetzt werden.

Unter Berücksichtigung der vorgestellten Vereinfachungen lässt sich ein sehr einfaches Modell des Sensors in APDL implementieren. Wie auch im Experiment, wird bei dieser Simulation der d_{33} -Effekt des Sensors isoliert untersucht, was später noch genauer gezeigt wird.

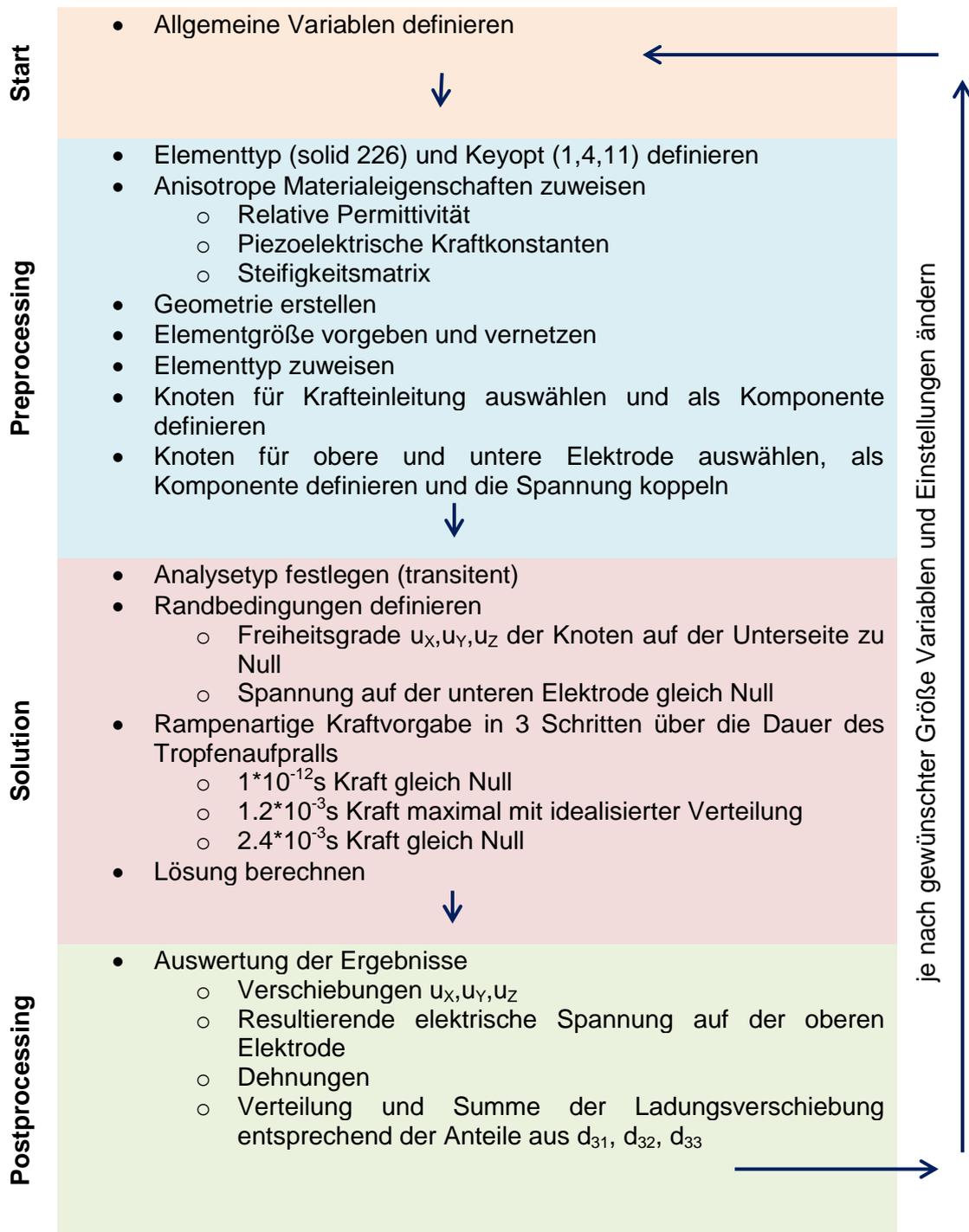


Abbildung 4-5: Programmablaufplan der Simulation des ebenen Sensors

Abbildung 4-5 zeigt eine Übersicht über den Ablauf der Simulation. Details können dem kommentierten Quellcode entnommen werden, der dieser Arbeit beiliegt.

Die Vorgabe der Kraft erfolgt mit der beschriebenen Cosinusverteilung oder elliptischen Verteilung, gemäß Formel (4-20): $F_{(r)} = F_q * \frac{\pi}{2} * \cos\left(\frac{r}{r_T} \frac{\pi}{2}\right)$ oder (4-15):

$$F_{(r)} = \frac{4F_q}{\pi} * \sqrt{1 - \frac{r^2}{r_T^2}}$$
, auf jeden Knoten der Komponente „Aufprallfläche“, entsprechend seinem Abstand r zum Mittelpunkt der Komponente.

$F_q = 4.337850675 \text{ N}$ ist dabei aus den Experimenten (Bulur, 2015) bekannt und $r_T = 1.445 * 10^{-3} \text{ m}$ wurde in Kapitel 4.1 ermittelt. Unbekannt ist daher nur noch der Abstand r jedes Knoten zum Mittelpunkt der Tropfenaufrallfläche. Dazu wird über eine Routine zunächst der Radius jedes einzelnen Knotens innerhalb der ausgewählten Komponente „Aufprallfläche“ bestimmt. Mit diesem Radius wird dann die Kraft $F_{(r)}$ bestimmt, die am Ort des Knotens wirken soll. Um unabhängig von der Netzfeinheit bzw. Anzahl der in der Komponente enthaltenen Knoten dieselbe Flächenlast über die Knoten einzuleiten, wird $F_{(r)}$ durch die Anzahl der in der Komponente enthaltenen Knoten geteilt. Der entsprechende Ausschnitt aus dem Quellcode ist mit Kommentaren in Tabelle 8-6 dokumentiert. Die so bestimmte Knotenkraft wird wie im Experiment in negativer Richtung der Z-Achse vorgegeben.

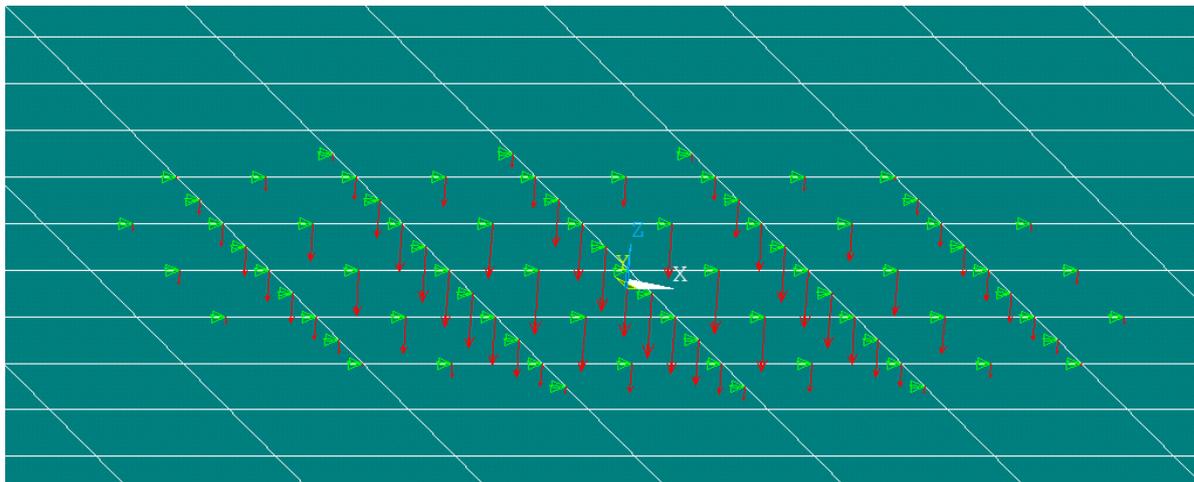


Abbildung 4-6: Sensorausschnitt mit zur Komponente " Aufprallfläche " gehörigen Knoten und deren Kraftvektoren

Abbildung 4-6 zeigt einen Ausschnitt aus der Oberfläche des Sensors. Der Sensor wurde mit $60 \times 24 \times 1$ Elementen diskretisiert. Die grünen Dreiecke zeigen dabei auf jeden Knoten im Bereich des simulierten Tropfenaufralls. Die Kräfte, mit denen jeder Knoten beaufschlagt wird, werden mit Wirkrichtung und relativer Größe durch die roten Pfeile dargestellt. Die Orientierung der Elemente bzw. des Sensors wird durch das abgebildete Koordinatensystem deutlich. Die Vernetzung ist dabei symmetrisch zum Koordinatenursprung. Dieser erscheint in der Abbildung durch die Perspektive leicht versetzt, da er sich auf der Sensorunterseite befindet.

Elemente in Längsrichtung	Elemente in Tiefenrichtung	Elemente in Dickenrichtung	U_{\max} elliptische Kraftverteilung	U_{\max} cosinusförmige Kraftverteilung
15*	6	1	72,187 mV	66,884 mV
30	12	1	58,648 mV	49,209 mV
45	18	1	61,064 mV	51,987 mV
60	24	1	62,112 mV	53,323 mV
75	30	1	58,929 mV	50,27 mV
90	36	1	59,932 mV	50,923 mV
105	42	1	59,279 mV	50,719 mV
120	48	1	61,872 mV	53,012 mV
135	54	1	60,279 mV	51,535 mV
150	60	1	59,701 mV	51,013 mV
165	66	1	61,954 mV	53,193 mV
180	72	1	60,75 mV	51,945 mV
15*	6	2	72,179 mV	66,876 mV
30*	12	2	58,648 mV	49,208 mV
45*	18	2	61,064 mV	51,987 mV
60	24	2	62,111 mV	53,323 mV
75	30	2	58,929 mV	50,27 mV
90	36	2	59,932 mV	50,923 mV
105	42	2	59,279 mV	50,719 mV
120	48	2	61,872 mV	53,012 mV
135	54	2	60,279 mV	51,535 mV
150	60	2	59,701 mV	51,013 mV
165	66	2	61,954 mV	53,194 mV
180	72	2	60,751 mV	51,946 mV

Tabelle 4-4: Einfluss der Netzfeinheit auf die maximale Verschiebung und die ausgegebene Spannung

Obige Tabelle zeigt die maximale Verschiebung in Z-Richtung und die berechnete Ausgangsspannung in Abhängigkeit von der Netzfeinheit für die beiden entwickelten Krafeinleitungsmodelle. Problematisch stellt sich bei der Vernetzung des Sensormodells mit Solid Elementen die geringe Dicke dar. Sie führt dazu, dass Elemente relativ schnell ungünstige Seitenverhältnisse aufweisen und ANSYS eine Warnung ausgibt. Simulationen auf die dies zutrifft sind mit einem * gekennzeichnet. Ab einer Netzfeinheit von 45 Elementen in Sensorlängsrichtung schwankt die berechnete Ausgangsspannung zwischen 50,27 mV und 53,323 mV für die cosinusförmige Kraftverteilung und zwischen 58,929 mV und 62,112 mV für die elliptische Kraftverteilung. Dies liegt vermutlich an der Methodik der Krafeinleitung, die immer zu kleinen Stufen führt und keinen gleichmäßigen Verlauf erzeugt. Die Stufen entstehen, da meist kein Knoten exakt auf dem Rand der Tropfenaufprallfläche liegt und den Wert Null einnimmt. Der nächstgelegene ist ungleich Null und der Rand der Krafeinleitung ist nicht fest abgegrenzt. Somit verschiebt sich der Kraftverlauf etwas. Eine noch feinere Vernetzung müsste dieses Problem lösen.

Dies erscheint jedoch nicht notwendig, da die Schwankungen deutlich kleiner ausfallen als die Standardabweichung von 10 mV im Experiment. Zudem würde sich so die Rechenzeit insbesondere bei transienter Rechnung mit vielen Zeitschritten stark erhöhen und die maximal zulässige Knotenanzahl der freien ANSYS Lizenz für Studenten wäre

schnell überschritten. Positiv fällt auf, dass die Vernetzung in Dickenrichtung mit einem oder zwei Elementen nahezu identische Ergebnisse liefert. Somit erscheint eine Vernetzung mit nur einem Element in Dickenrichtung des Sensors sinnvoll. Das reduziert die Rechenzeit deutlich und verbessert auch das Seitenverhältnis der Elemente.

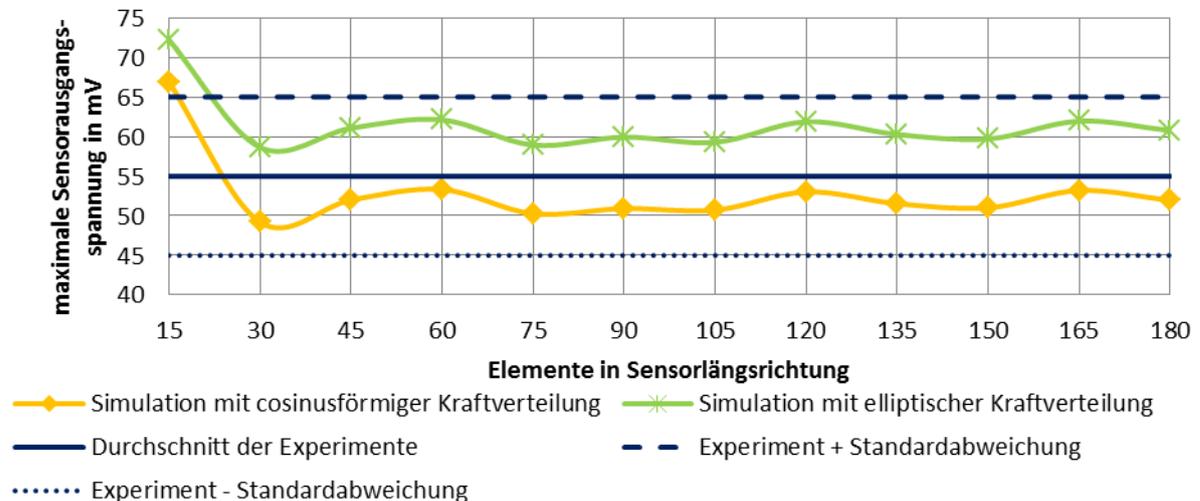


Abbildung 4-7: Einfluss der Netzfeinheit auf die berechnete maximale Ausgangsspannung für beide Kräfteinleitungsmodelle im Vergleich zu den experimentellen Ergebnissen von (Bulur, 2015)

Abbildung 4-7 zeigt die berechnete maximale Ausgangsspannung des Sensors in Abhängigkeit von der Anzahl der Elemente in Sensorlängsrichtung. Das Verhältnis der Elementanzahl ist dabei stets gleich wie Tabelle 4-4 zu entnehmen ist. Um die Qualität der Simulationsergebnisse besser einordnen zu können, sind die durchschnittliche Ausgangsspannung des Experimentes in (Bulur, 2015), sowie die obere und untere Standardabweichung mit dargestellt.

Die cosinusförmige Kraftverteilung liefert in dieser Simulation die bessere Approximation der unbekanntes Tropfenkraftverteilung, da sie eine geringere Abweichung zu den experimentell ermittelten Werten aufweist. Für alle weiteren Untersuchungen wird daher eine cosinusförmige Kraftverteilung gewählt.

Die vom Sensor gemessene elektrische Spannung ist die Summe der Anteile aus jeder Raumrichtung vgl. Kapitel 3.1. Aufgrund von Querkontraktion werden auch bei uniaxialer Belastung des Sensors Verschiebungen und damit auch Ladungsverschiebungen in den anderen beiden Raumrichtungen verursacht. Diese lassen sich in der Simulation isolieren. Dadurch wird ermittelt welchen Anteil die Ladungsverschiebungen in den einzelnen Raumrichtungen an der gesamten Sensorausgangsspannung haben. Somit kann der Einfluss der recherchierten Parameter besser abgeschätzt werden.

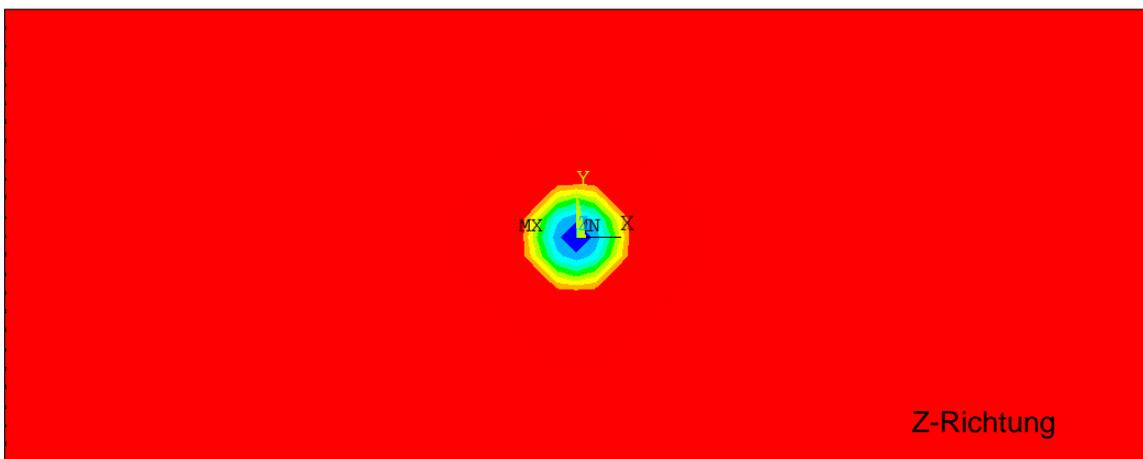
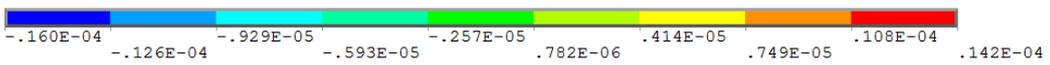
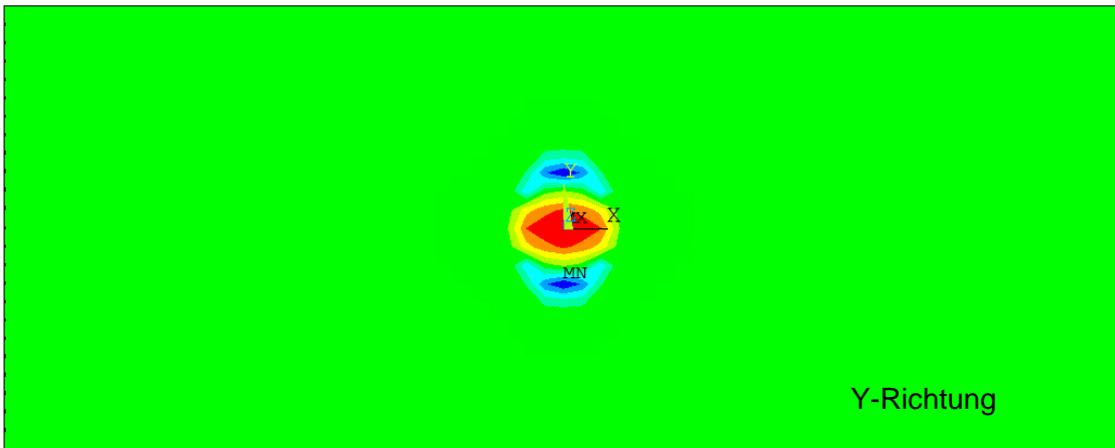
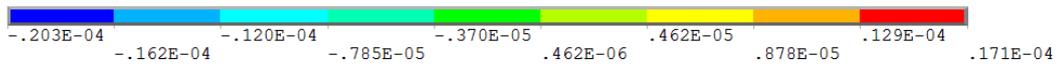
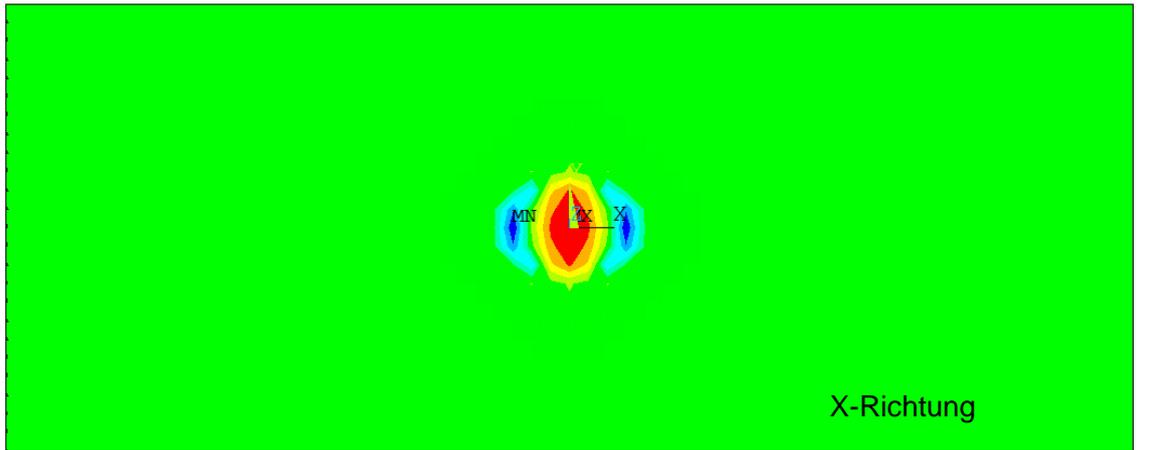


Abbildung 4-8: Dehnungen in m/m in der PVDF Folie durch die eingeleitete Tropfenkraft

Abbildung 4-8 zeigt die Dehnungen der PVDF-Folie in den Raumrichtungen X,Y und Z in m/m. Für die gängige Interpretation in % muss der jeweilige Wert mit 100 multipliziert werden. Dabei ist zu beachten, dass die Farbskala jeweils unterschiedlich und unter der zugehörigen Abbildung angeordnet ist. Aufgrund der verschiedenen Größenordnung war es nicht möglich eine einheitliche Abstufung zu verwenden ohne die Aussagekraft der Darstellung einzuschränken. Gut zu sehen ist neben der räumlichen Verteilung, dass die Dehnungen in X-Richtung etwa $\frac{1}{30}$ und in Y-Richtung etwa $\frac{1}{40}$ der Dehnung in Z-Richtung beträgt.

Die dargestellten Dehnungen sind die Ursache für die Ladungsverschiebungen. Setzt man alle anderen piezoelektrischen Kraftkonstanten zu Null, lassen sich die Anteile der einzelnen Raumrichtungen an der resultierenden Ausgangsspannung des Sensors isolieren. Die Anteile ergeben sich wie folgt

Effekt	d_{31}	d_{32}	d_{33}	d_{24}	d_{15}
Spannung in mV	0,00002	-0,0000301	53,323	-0,000239	-0,000274

Tabelle 4-5: Anteile der einzelnen Ladungsverschiebungen an der maximalen Sensorausgangsspannung

Interessant ist, dass die Spannungsanteile aus d_{31} und d_{32} im Verhältnis noch kleiner ausfallen als die dazugehörigen Dehnungen. Dies liegt daran, dass Dehnungen mit unterschiedlichem Vorzeichen auch Ladungen mit verschiedenen Vorzeichen erzeugen, die sich gegenseitig ausgleichen. Wie erwartet ist die aus dem d_{33} -Effekt resultierende Spannung maßgeblich und alle anderen Komponenten können für diesen Belastungsfall vernachlässigt werden. Das ist ein wichtiger Vorteil, da die Konstante d_{33} als Einzige vom Hersteller angegeben wird und auch der des ersatzweise verwendeten PVDF entspricht. Alle anderen piezoelektrischen Konstanten stammen aus der Literatur und wurden nicht verifiziert. Wie in Kapitel 3.1 dargestellt, hängen die tatsächlichen Eigenschaften von PVDF maßgeblich vom Herstellungsprozess ab und können daher nicht zuverlässig in der Literatur nachgeschlagen werden. Die potentiell fehlerbehafteten Konstanten besitzen im betrachteten orthogonalen Belastungsfall mit fest auf einem unverformbaren Untergrund appliziertem Sensor keine Relevanz für die resultierende Ausgangsspannung.

Tropfenfallhöhe in cm	Sensorausgangsspannung Experiment in V	Sensorausgangsspannung Simulation in V
25	0,055 ± 0,01	0,053
89,5	0,151 ± 0,017	0,1427
221,7	0,259 ± 0,036	0,2452

Tabelle 4-6: Maximale Sensorausgangsspannungen der Simulation im Vergleich zum Experiment für verschiedene Tropfenfallhöhen

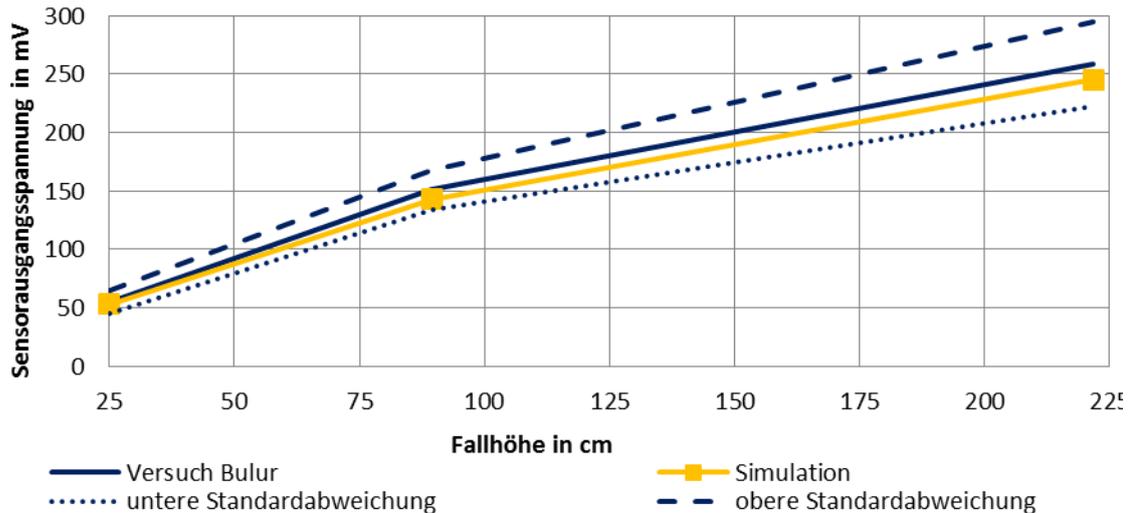


Abbildung 4-9: Vergleich der experimentell in (Bulur, 2015) ermittelten maximalen Ausgangsspannungen mit denen der Simulationen für die 3 untersuchten Fallhöhen

Abbildung 4-9 zeigt die berechneten maximalen Sensorausgangsspannungen für die Fallhöhen 25 cm, 89,5 cm und 221,7 cm. Zwischen den Messpunkten wurde linear interpoliert. Die aus den Experimenten von Bulur entnommenen Tropfenauflprallkräfte betragen analog 4,26 N, 11,611 N und 19,949 N. Die damit berechneten maximalen Sensorausgangsspannungen fallen etwas niedriger aus als die von (Bulur, 2015) gemessenen vgl. Tabelle 4-6. Alle Ergebnisse befinden sich jedoch im Bereich der Standardabweichungen der Experimente und können daher als repräsentativ angesehen werden.

4.4 Modell der Tragflügelvorderkante mit außenliegendem Sensor

Das in (Bulur, 2015) verwendete Modell einer Tragflügelvorderkante kann nicht realitätsgetreu in ANSYS abgebildet werden. Gründe dafür sind dass der verwendetet Demonstrator keinen konstanten Radius an der Vorderkante besitzt, Beulen aufweist, die Verschraubung auf den im 3D-Drucker hergestellten Profilen nicht näher beschrieben werden kann und das Blech Eigenspannungen aufweist. Weiterhin ist die Legierung des Bleches unbekannt und die Halterung des Demonstrators nicht definiert. Da der Demonstrator aus sehr dünnem Blech besteht, kann auch nicht wie beim ebenen Sensor angenommen werden, dass die Verschiebungen der Oberfläche zu vernachlässigen sind.

Daher wird ein vereinfachtes Modell in Form eines Halbrohres implementiert. Damit wird der Einfluss der gekrümmten Sensoranordnung auf einem dünnwandigen und einem dickwandigen Substrat untersucht. Insbesondere die Richtungsanteile an der Sensorausgangsspannung aus dem d_{31} - und d_{32} -Effekt sind dabei von Interesse. So wird ermittelt, wie groß der Einfluss der recherchierten, piezoelektrischen Kraftkonstanten e_{31} , e_{32} , e_{24} und e_{15} tatsächlich ist.

Für dieses Modell wird derselbe Vorderkantenradius von 17,5 mm, dieselbe Blechstärke von 0,5 mm (bzw. 5 mm für das dickwandige Modell) und eine ähnliche Aluminiumlegierung verwendet, wie für den Demonstrator. Die Vorderkantenlänge beträgt ebenfalls 250 mm und das Modell ist an den beiden parallel dazu verlaufenden Enden fest eingespannt. Der Sensor wird, wie im Experiment, in derselben Position auf der Profilloberfläche implementiert. Dieses Modell ist nicht direkt mit dem im Experiment verwendeten Demonstrator vergleichbar, da es aufgrund der Geometrie und den Randbedingungen andere dynamische Eigenschaften aufweisen muss.

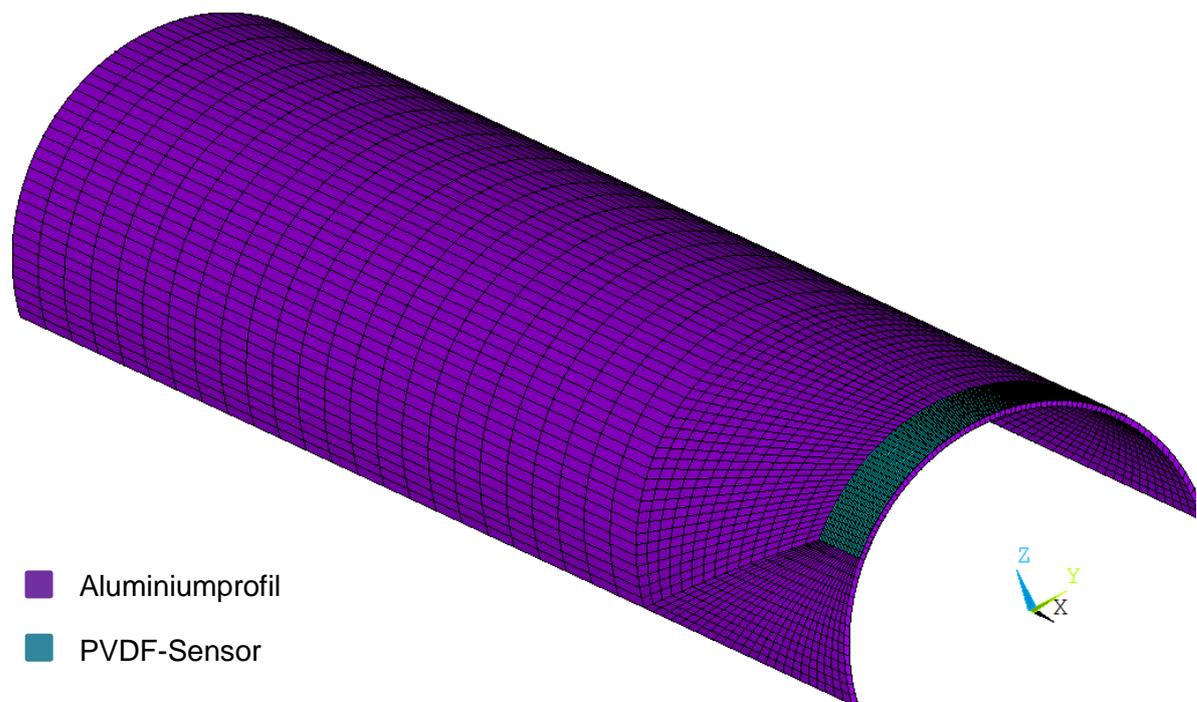


Abbildung 4-10: Schnitt des Simulationsmodells mit Vernetzung und außen appliziertem PVDF-Sensor

Bei der Vernetzung wird versucht den Sensor und den darunter liegenden Teil des Profils fein zu vernetzen. Dies ist notwendig um die Krafteinleitung möglichst genau abzubilden. Dabei wird die größte Netzfeinheit aus Tabelle 4-4 für den Sensor verwendet, die noch gute Resultate erzielte (60x24x1). Ausgehend davon wird die Netzfeinheit zu den Profilrändern hin verringert, um den Rechenaufwand zu reduzieren. So ist der Bereich, der durch den Tropfenaufrall mit verformt wird noch relativ fein vernetzt. In Dickenrichtung ist das dünne Profil mit einem und das Dicke mit vier Elementen vernetzt.

Die Vernetzung von Sensor und Profil wird so aufeinander abgestimmt, dass an der Kontaktfläche die Knoten zusammenfallen. Der Sensor wird über den Befehl vglue mit dem Profil „verklebt“, anschließend werden koinzidente² Knoten und Keypoints zusammengelegt. Aufgrund der geringen Sensordicke muss dazu der Toleranzwert, bis zu dem Knoten und Keypoints als koinzident erkannt werden, auf $1 \cdot 10^{-5}$ m herabgesetzt werden. So kann das Einfügen einer Kontaktbedingung vermieden werden was

² Alle Knoten und Keypoints in der Kontaktfläche liegen doppelt vor, da sie jeweils für beide der ursprünglichen Volumen definiert wurden aber dieselben Koordinaten besitzen.

zusätzlichen Aufwand und eine längere Rechenzeit bedeuten würde. Dies entspricht der Kontakteinstellung „bond“.

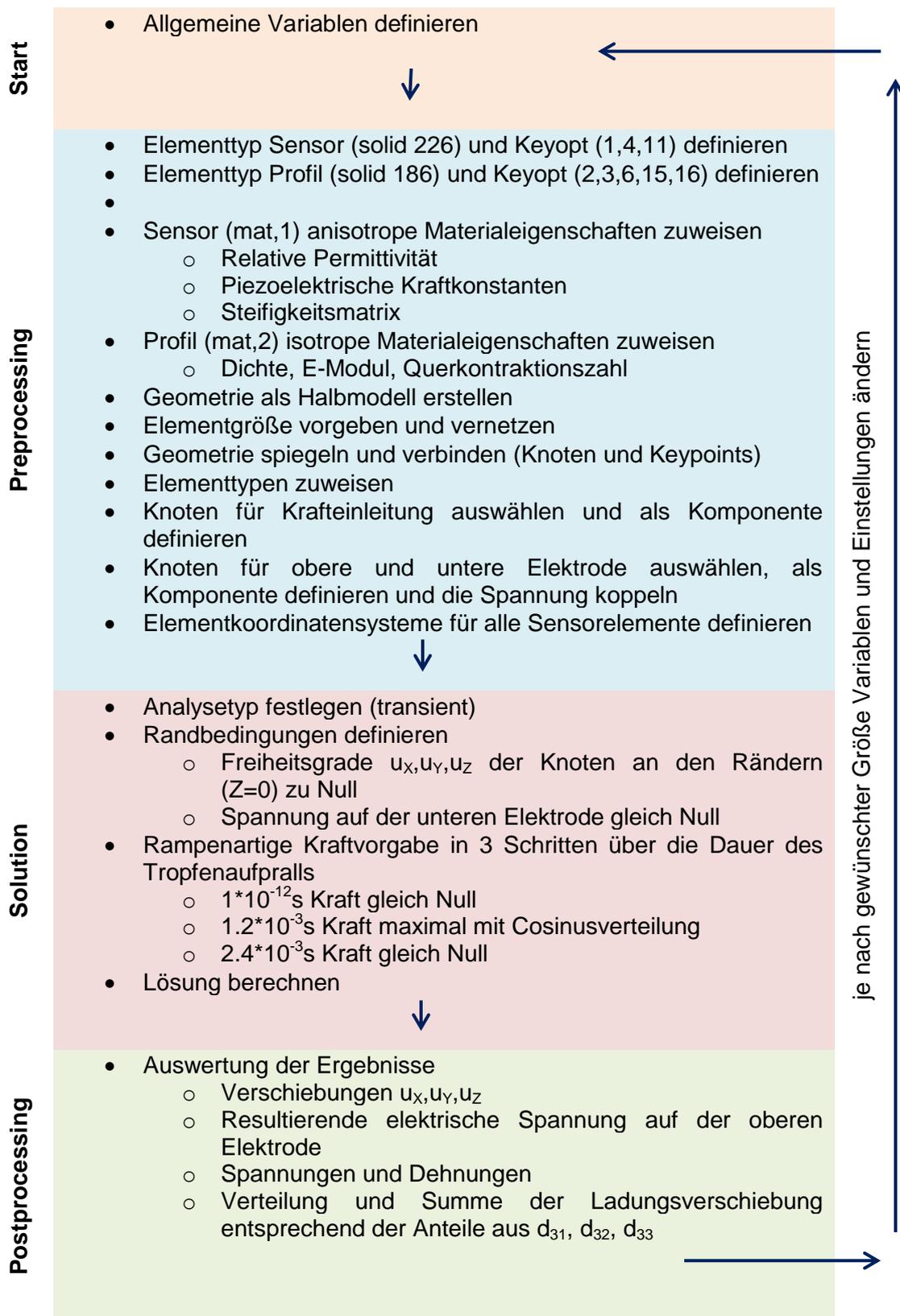


Abbildung 4-11: Programmablaufplan der Simulation des Profilmodells

Die Einleitung der Tropfenkraft erfolgt analog zum ebenen Sensormodell mit der cosinusförmigen Kraftverteilung. Die Tropfenkraft wirkt dabei in Richtung der negativen Z-Achse des globalen kartesischen Koordinatensystems. Daher wirkt sie nicht überall orthogonal auf die Sensoroberfläche. Die Krümmung der Oberfläche wurde vernachlässigt, weil sich der Einfallwinkel bei einem zentralen Treffer um weniger als 5° ändert und die daraus resultierende Änderung der Tropfenkraft sehr gering ist. Die verwendete Tropfenkraft von 4,33 N entspricht dabei der aus dem Fallversuch aus 25 cm Höhe auf den ebenen Sensor. So soll der Einfluss der gekrümmten Sensoranordnung auf die resultierende Ausgangsspannung besser mit dem ebenen Sensor vergleichbar gemacht werden.

Dünnwandiges Profilmodell

Die berechnete maximale Sensorausgangsspannung beträgt -68,844 mV. Im Vergleich zu 53,33 mV, die für den ebenen Sensor mit cosinusförmiger Kraftverteilung berechnet wurden, ist der Betrag also deutlich höher und das Vorzeichen entgegengesetzt. Dies verwundert zunächst, da bei allen Experimenten in (Bulur, 2015) stets dasselbe Vorzeichen dokumentiert ist. Durch Auswertung der elektrischen Spannungsanteile und der Dehnungen des Sensors wird dies näher untersucht.

Analog zur Simulation des ebenen Sensors wird auch für das Profilmodell der Anteil der Ladungsverschiebungen in den einzelnen Raumrichtungen an der gesamten Sensorausgangsspannung ermittelt. Dazu werden wieder alle anderen piezoelektrischen Konstanten zu Null gesetzt. Die Anteile an der maximalen Sensorausgangsspannung sind in

Tabelle 4-7 zusammengefasst.

Effekt	gesamt	d_{31}	d_{32}	d_{33}	d_{24}	d_{15}
Spannung in mV	-68,844	-12,981	10,968	-66,795	-0,00749	-0,0506

Tabelle 4-7: Anteile der einzelnen Ladungsverschiebungen an der maximalen Sensorausgangsspannung

Im Gegensatz zum ebenen Sensor sind die aus dem d_{31} - und d_{32} -Effekt resultierenden Spannungen nicht zu vernachlässigen. Damit ist deutlich, dass diese aus der Literatur recherchierten und damit nicht zuverlässigen Parameter das Ergebnis der Simulation deutlich beeinflussen. In der vorliegenden Simulation gleichen sie sich aufgrund ihrer Vorzeichen relativ gut aus. Es darf aber nicht davon ausgegangen werden, dass dies für jeden Belastungsfall und jedes Substratprofil gültig ist. Die Konstanten e_{24} und e_{15} besitzen weiterhin keinen nennenswerten Einfluss auf die Sensorausgangsspannung. Der d_{33} Effekt bleibt nach wie vor der Maßgebende für die resultierende Sensorausgangsspannung.

Da sich die Richtungsanteile der Sensorausgangsspannungen aus den Dehnungen in der entsprechenden Richtung ergeben, werden diese genauer untersucht. Die Dehnungen werden durch die Tropfenkraft und die daraus resultierende Verformung der

Substratstruktur bestimmt. In Abbildung 4-12 bis Abbildung 4-14 ist der gekrümmte Sensor aus Gründen der besseren Anschaulichkeit ohne das für die Berechnung berücksichtigte Substrat abgebildet. Die dargestellten Dehnungen wurden zum Zeitpunkt der maximalen Sensorausgangsspannung berechnet. Sie werden in einem zylindrischen Koordinatensystem in m/m ausgegeben. So lässt sich die Orientierung der Stoffeigenschaften des Sensors berücksichtigen und die Ergebnisse sind mit dem ebenen Sensor vergleichbar. Die X-Achse des Sensors verläuft in Umfangsrichtung, die Y-Achse in axialer Richtung und die Z-Achse in radialer Richtung. Zum Vergleich sind die Dehnungen des ebenen Sensors aus Kapitel 4.3 mit abgebildet. Da die Dehnungen sehr unterschiedlich groß sind, werden nur die des gekrümmten Sensors in einheitlicher Farbskalierung dargestellt. Vergleicht man die maximalen Dehnungen des auf dem Profilmodell applizierten Sensors mit denen des ebenen Sensors auf dem massiven Aluminiumblock aus Abbildung 4-8, fallen sofort einige gravierende Unterschiede auf. Die maximalen Dehnungen liegen für alle Raumrichtungen im Zentrum des Tropfenaufralls, sind negativ und von gleicher Größenordnung. Außerdem unterscheidet sich die Verteilung der Dehnungen stark von denen des ebenen Sensors. Die Bereiche mit Dehnungen ungleich Null sind deutlich größer und beschränken sich nicht unmittelbar auf den Tropfenaufrallbereich. Dies zeigt, dass die Dehnungen des Sensors maßgeblich von der Verformung des Profils bestimmt werden.

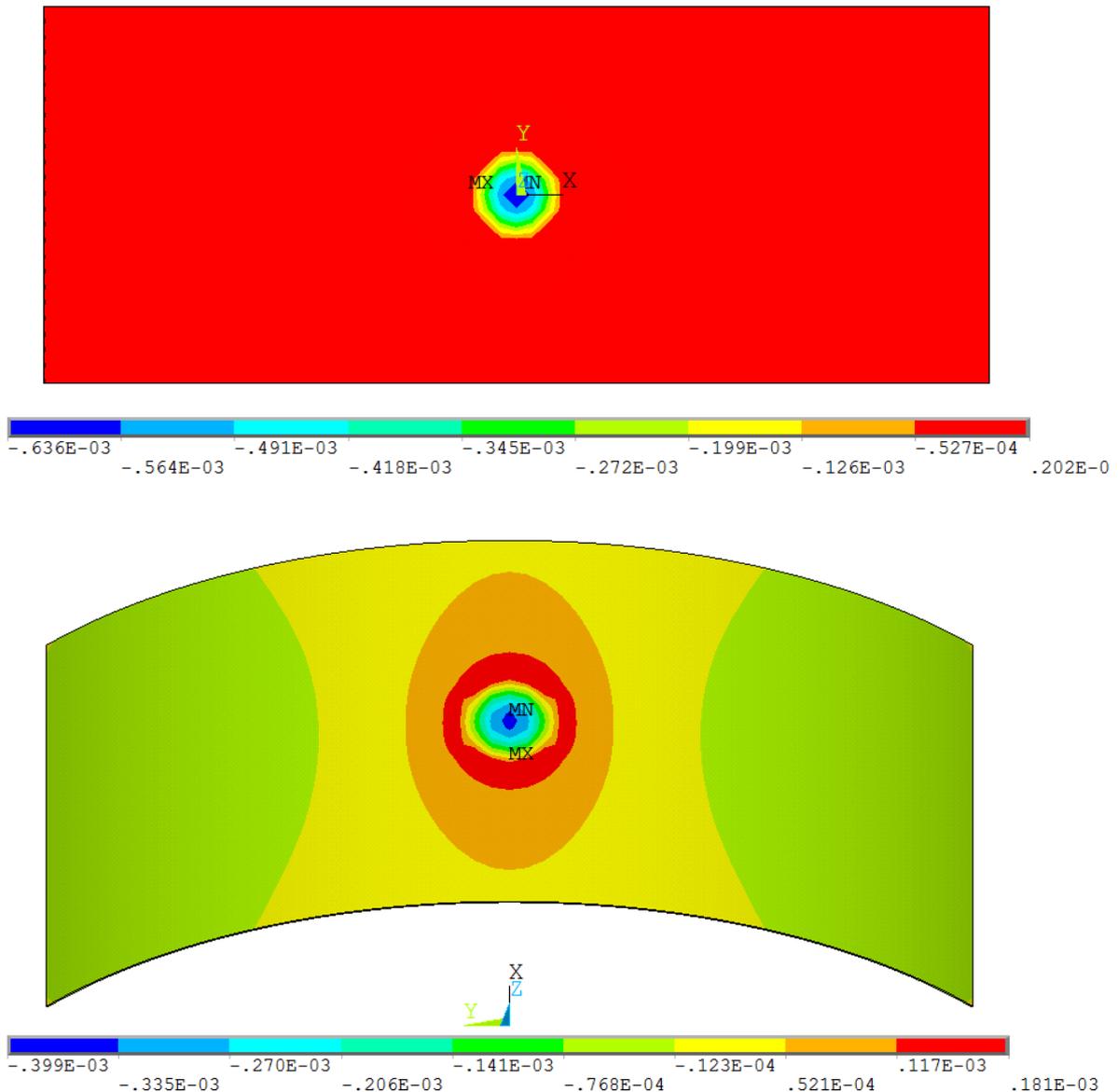


Abbildung 4-12: Dehnungen in m/m in radialer Richtung der Sensoroberfläche auf dem Profilmodell mit dünnwandiger Struktur gegenüber den Dehnungen des ebenen Sensors bei gleicher Tropfenkraft und maximaler Krafteinwirkung.

Gut zu sehen ist, dass die Dehnung in Z-Richtung nicht wie beim ebenen Sensor auf dem massiven Block nur durch Kompression des Sensors infolge der Tropfenkraft verursacht wird, sondern ganz maßgeblich durch die Trägheit der angrenzenden Sensorbereiche auf der in negativer Z-Richtung beschleunigten Profilloberfläche. In der Abbildung wird das durch den Farbübergang ausgehend von der Mitte der Tropfenaufprallfläche deutlich. Von der größten Kompression in der Mitte nimmt die Kompression stetig zu den Rändern der Tropfenaufprallfläche hin ab und erreicht dort Null. Dies ist durch das schmale gelbe Band zu erkennen. Anschließend nimmt die Dehnung zu, bis sie im roten Band ihr Maximum erreicht und langsam wieder auf Null abfällt. Die maximale Kompression fällt mit $-0,0339\%$ etwa halb so groß aus wie beim

ebenen Sensor mit $-0,0633\%$. Die maximale Dehnung hingegen beträgt $0,0181\%$ im Vergleich zu $0,00201\%$ beim ebenen Sensor und ist damit rund 9-mal größer. Das und die größere Fläche, auf die diese positive Dehnung wirkt führt zu der größeren und negativen maximalen Sensorausgangsspannung bei dem auf dem dünnwandigen Profil applizierten Sensor infolge des d_{33} -Effekts. Der Einfluss durch die Verformung des Substrates ist also als sehr hoch zu bewerten.

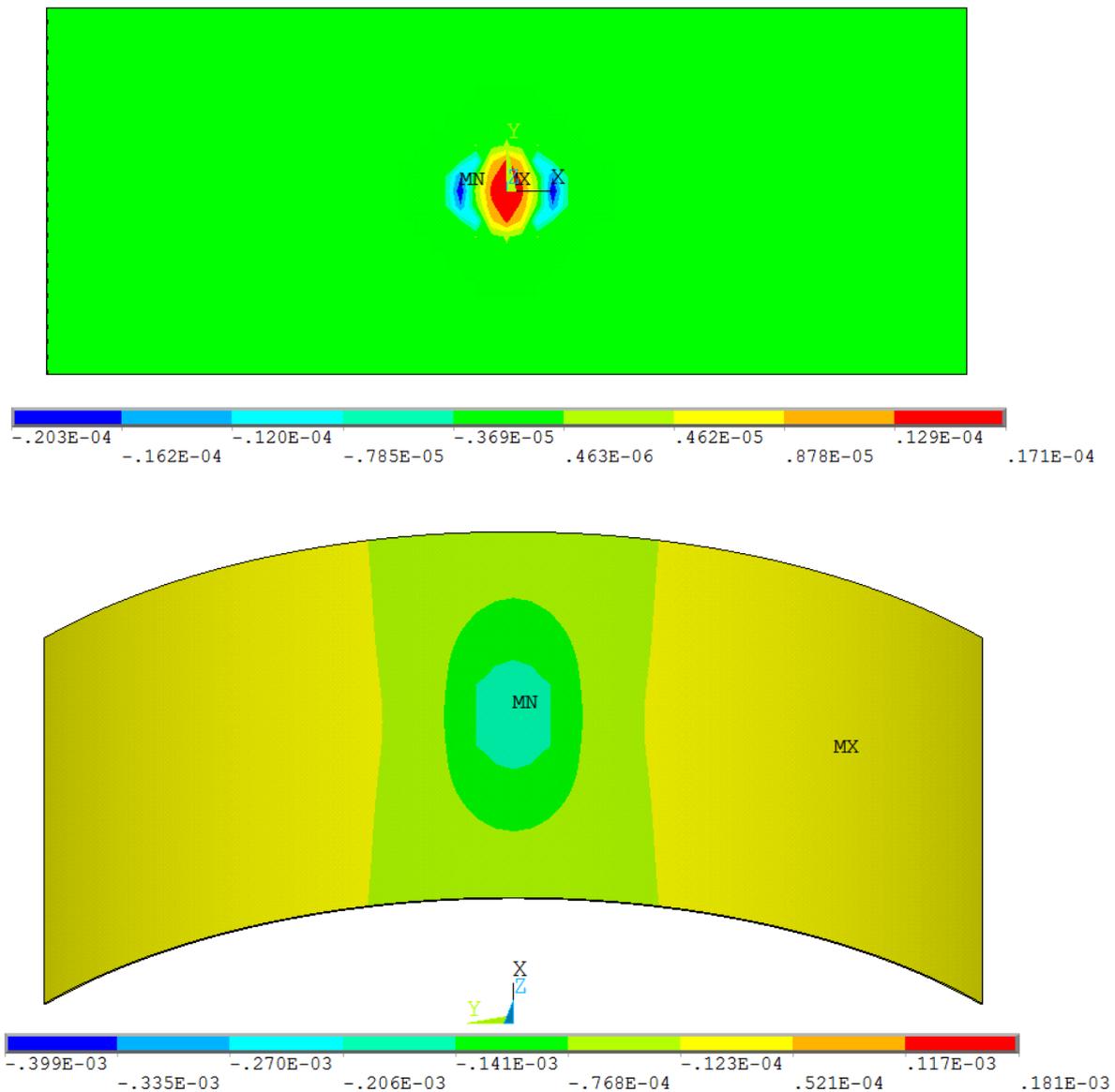


Abbildung 4-13: Dehnungen in m/m in Umfangsrichtung der Sensoroberfläche auf dem Profilmodell mit dünnwandiger Struktur gegenüber den Dehnungen des ebenen Sensors bei gleicher Tropfenkraft und maximaler Krafteinwirkung.

Die Dehnungen in X-Richtung des Sensors bestimmen die Anteile aus dem d_{31} -Effekt und sind in Abbildung 4-13 dargestellt. Sie sind deutlich kleiner als die Dehnungen der Z-Richtung, aber liegen im Gegensatz zum ebenen Sensor in derselben Größenordnung wie die Dehnungen der Z-Richtung des gekrümmten Profils und können daher im gleichen Farbspektrum dargestellt werden. Die maximale negative Dehnung ist

betragsmäßig mit $-1,84 \cdot 10^{-2} \%$ etwa 7-mal höher als die maximale positive Dehnung mit $0,270 \cdot 10^{-2} \%$. Im Vergleich dazu weist der ebene Sensor in X-Richtung positive ($0,171 \cdot 10^{-2} \%$) und negative ($-0,203 \cdot 10^{-2} \%$) Dehnungen etwa derselben Größenordnung auf. Die positiven Dehnungen sind für das dünnwandige Profil also vergleichbar, die negativen Dehnungen fallen jedoch etwa um das 9-Fache höher aus.

Mit der piezoelektrischen Kraftkonstante $e_{31} = 0,01 \frac{C}{m^2}$ ergibt sich damit erwartungsgemäß eine negative Sensorausgangsspannung aus dem d_{31} -Effekt. Der Einfluss der Verformung des Substrates auf die Sensorausgangsspannung infolge des d_{31} -Effekts ist als hoch zu bewerten.

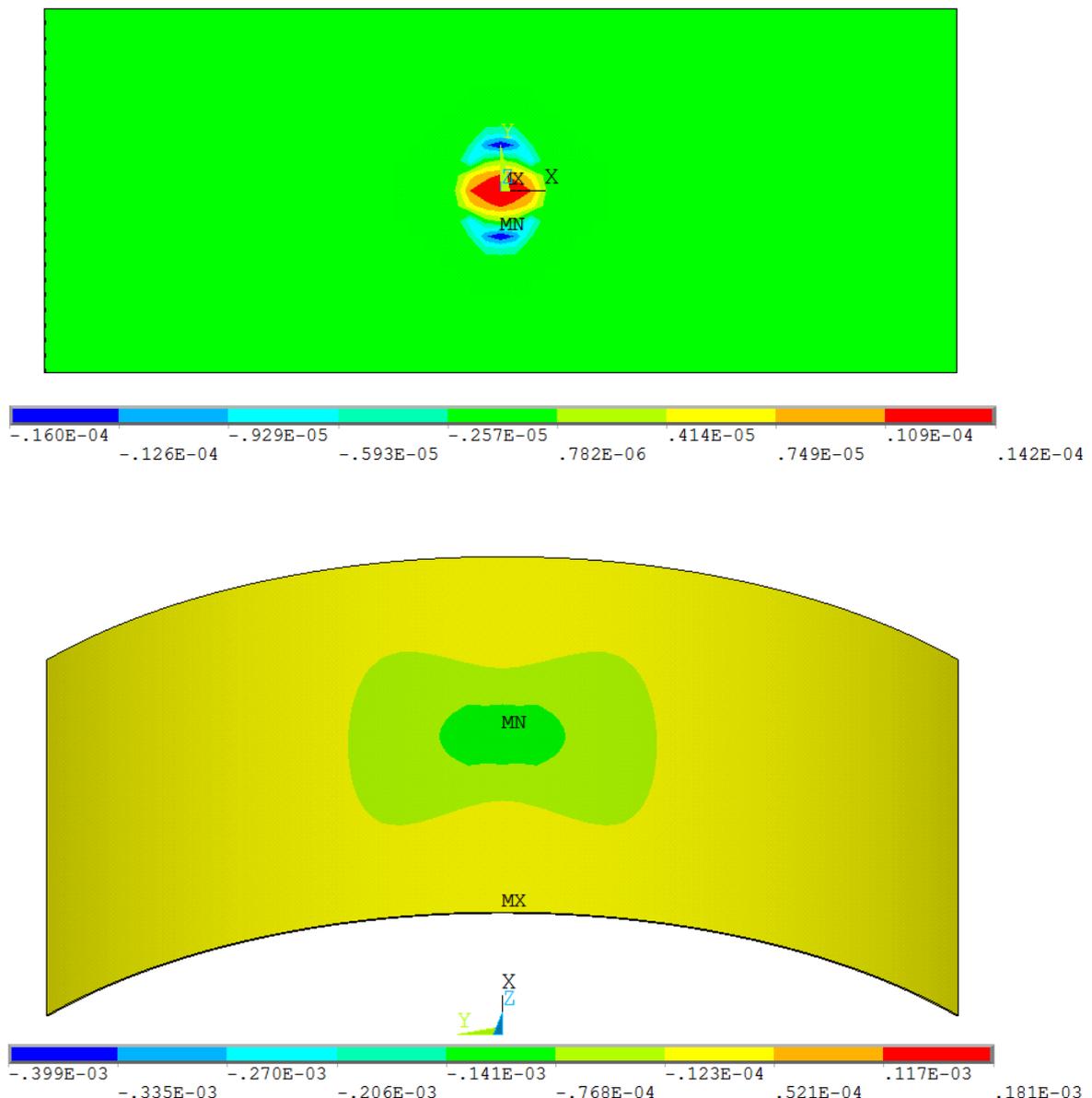


Abbildung 4-14: Dehnungen in m/m in axialer Richtung der Sensoroberfläche auf dem Profilmodell mit dünnwandiger Struktur gegenüber den Dehnungen des ebenen Sensors bei gleicher Tropfenkraft und maximaler Krafteinwirkung.

Die Dehnungen in Y-Richtung des Sensors bestimmen die Anteile aus dem d_{32} -Effekt und sind in Abbildung 4-14 dargestellt. Sie sind ebenfalls deutlich kleiner als die Dehnungen der Z-Richtung aber liegen im Gegensatz zum ebenen Sensor in derselben Größenordnung wie die Dehnungen der Z-Richtung und können daher im gleichen Farbspektrum dargestellt werden. Die maximale negative Dehnung ist betragsmäßig mit $-1,24 \cdot 10^{-2} \%$ etwa 8-mal höher als die maximale positive Dehnung mit $0,163 \cdot 10^{-2} \%$. Im Vergleich dazu weist der ebene Sensor in Y-Richtung positive ($0,142 \cdot 10^{-2} \%$) und negative ($-0,160 \cdot 10^{-2} \%$) Dehnungen etwa derselben Größenordnung auf. Die positiven Dehnungen sind für das dünnwandige Profil also vergleichbar, die negativen Dehnungen fallen jedoch etwa um das 8-Fache höher aus. Mit der piezoelektrischen Kraftkonstante $e_{32} = -0,007 \frac{C}{m^2}$ ergibt sich damit erwartungsgemäß eine positive Sensorausgangsspannung aus dem d_{32} -Effekt. Der Einfluss der Verformung des Substrates auf die Sensorausgangsspannung infolge des d_{32} -Effekts ist also ebenfalls als hoch zu bewerten.

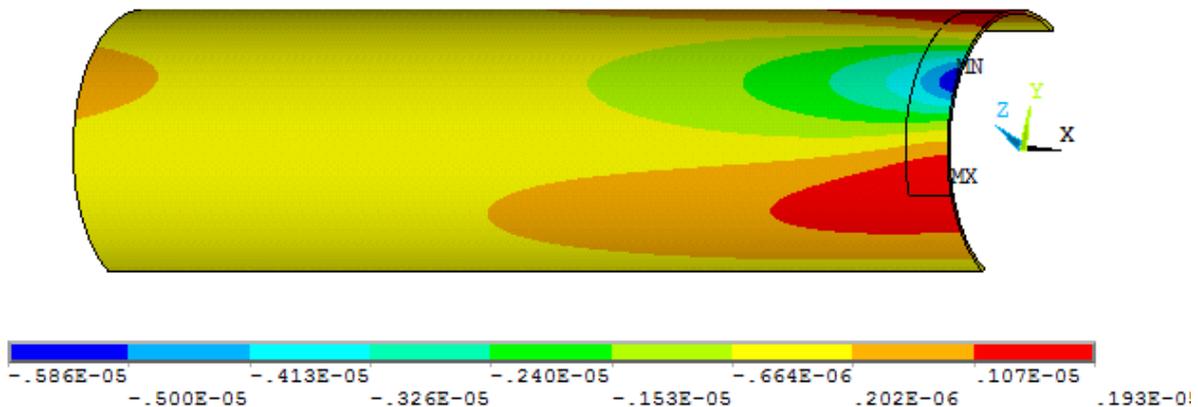


Abbildung 4-15: Knotenverschiebung in m in radialer Richtung am dünnwandigen Profilmodell bei maximaler Tropfenkraft

Abbildung 4-15 zeigt die Verformung der Profilloberfläche in radialer Richtung infolge der Tropfenkraft. Der Übersichtlichkeit halber wird die Symmetrie ausgenutzt und nur eine Hälfte des Profils dargestellt. Die übrigen Verschiebungen sind in Abbildung 8-3 dargestellt. Gut zu erkennen ist, dass das Profil im Bereich des Tropfenaufpralls in negativer Z-Richtung bzw. radialer Richtung verformt wird. Darum bildet sich eine Beule in Profillängsrichtung aus. An den Rändern dieser Beule bilden sich in Umfangsrichtung zwei Beulen in positiver radialer Richtung aus. Infolge dieser Beulen entstehen im Sensor BiegeNormalspannungen und die in Abbildung 4-13 und Abbildung 4-14 dargestellten Dehnungen, die den d_{31} - und d_{32} -Effekt betreffen.

Dickwandiges Profilmodell

Für ein dickeres und damit steiferes Substrat ist eine geringere Nachgiebigkeit zu erwarten und damit auch eine geringere Abhängigkeit von den potentiell fehlerbehafteten piezoelektrischen Konstanten. Diese Annahme wird durch Wiederholen, der für das dünnwandige Profil durchgeführten Untersuchungen, bestätigt. Daher wird die Dicke des Substratbleches um das 10-fache auf 5 mm erhöht. Die Vernetzung wird in

Dickenrichtung mit 4 Elementen vorgenommen um akzeptable Seitenverhältnisse zu gewährleisten. Um Rechenzeit zu sparen und die zulässige Anzahl der Elemente für die Studentenlizenz von ANSYS nicht zu überschreiten wurde auf eine feinere Vernetzung des Substrates in Dickenrichtung verzichtet. Es wird davon ausgegangen, dass dies keinen negativen Einfluss auf die Simulationsergebnisse hat. Die Kraftvorgabe bleibt identisch zum dünnwandigen Profil und dem ebenen Sensor. Damit berechnet sich eine maximale Sensorausgangsspannung von 41,532 mV. Dieses Ergebnis ist zwischen dem des dünnwandigen Profils von -68,844 mV und dem massiven Block von 53,33 mV angesiedelt. Die Tendenz geht aber deutlich in Richtung des ebenen Sensors auf dem massiven Aluminiumblock.

Effekt	gesamt	d ₃₁	d ₃₂	d ₃₃	d ₂₄	d ₁₅
Spannung in mV	41,532	-1,711	0,608	42,339	-0,0007	-0,406

Tabelle 4-8: Anteile der einzelnen piezoelektrischen Konstanten an der maximalen Sensorausgangsspannung

Dies wird mithilfe der Dehnungen und der Knotenverschiebungen plausibilisiert.

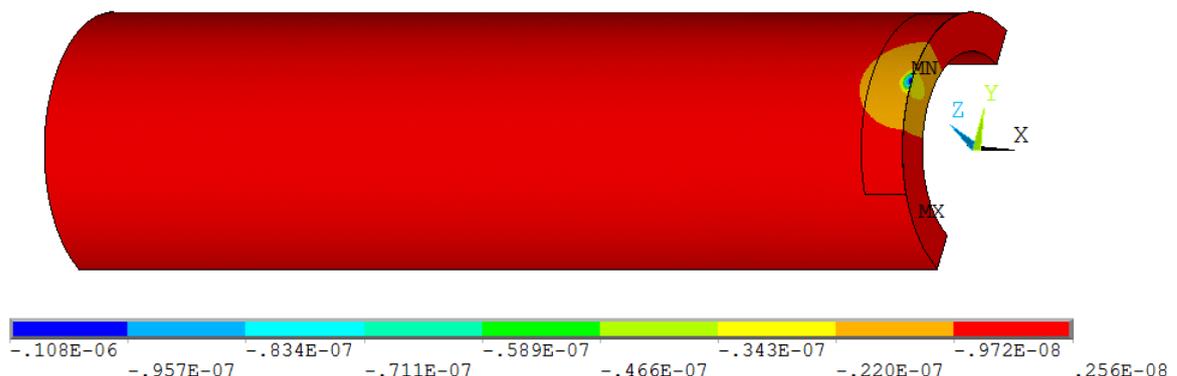


Abbildung 4-16: Knotenverschiebung in m in radialer Richtung am dickwandigen Profil bei maximaler Tropfenkraft

Die aus der maximalen Tropfenkraft resultierenden Knotenverschiebungen auf der Sensoroberseite am dickwandigen Profil sind in Abbildung 4-16 dargestellt. Die übrigen Verschiebungen sind in Abbildung 8-4 dargestellt. Gut zu sehen ist, dass außerhalb der Tropfenauflauffläche nur eine sehr geringe Verformung des Profils stattfindet. Im Gegensatz zu Abbildung 4-15 beschränkt sich diese außerdem auf das direkte Umfeld der Krafteinwirkung. Besonders aussagekräftig ist in diesem Zusammenhang der Vergleich der Knotenverschiebungsmaxima. Die größten negativen Knotenverschiebungen liegen bei beiden Profilmodellen im Zentrum des Tropfenauflaufpralls. Für das dünnwandige Profil betragen sie -5,86 µm und für das Dickwandige nur -0,108 µm. Die größten positiven Knotenverschiebungen liegen in Umfangsrichtung etwas verschoben jeweils knapp auf bzw. neben dem Rand des Sensors. Sie betragen 1,93 µm für das dünnwandige Profil und 0,00256 µm für das Dickwandige. Aufgrund der geringen Knotenverschiebungen fallen die Dehnungen des

Sensoren durch Verformung des Profils sehr gering aus und werden maßgeblich direkt durch die Tropfenkraft verursacht.

Die direkt aus der Tropfenkraft und der minimalen Profilverformung resultierenden maximalen Dehnungen der Sensoroberseite sind Abbildung 4-17 bis Abbildung 4-19 dargestellt. Wie für den ebenen Sensor sind sie für die X- und Y-Richtung des Sensors sehr viel kleiner als in der Z-Richtung und werden daher in verschiedenen Farbskalierungen dargestellt die jeweils unter der Abbildung aufgeschlüsselt ist. Im Wesentlichen sind sie, was Verteilung und Größenordnung der Dehnungen anbelangt, sehr ähnlich zu denen des ebenen Sensors. Diese sind zum besseren Vergleich mit abgebildet.

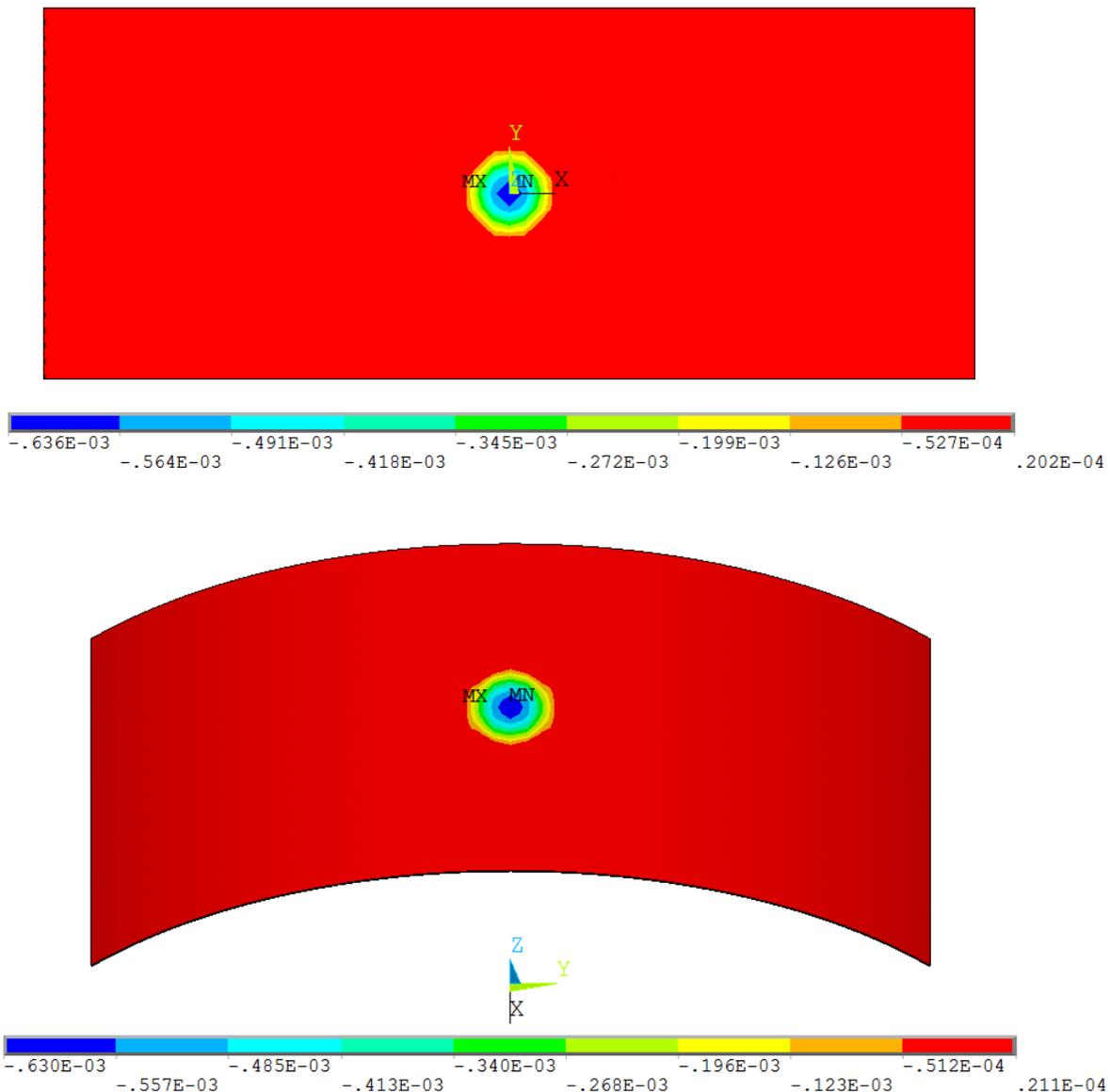


Abbildung 4-17: Dehnungen in m/m in radialer Richtung der Sensoroberfläche auf dem Profilmodell mit dickwandiger Struktur gegenüber den Dehnungen des ebenen Sensors bei gleicher Tropfenkraft und maximaler Krafteinwirkung.

Die minimalen und maximalen Dehnungen in radialer Richtung, sowie deren räumliche Verteilung, sind mit denen des ebenen Sensors fast identisch. Die damit errechnete

Sensorausgangsspannung aus dem d_{33} -Effekt von 42,339 mV weicht stärker von der des ebenen Sensors (53,323 mV) ab, als erwartet. Als Ursache dafür wird die nicht orthogonale Kraftwirkung auf die Oberfläche vermutet.

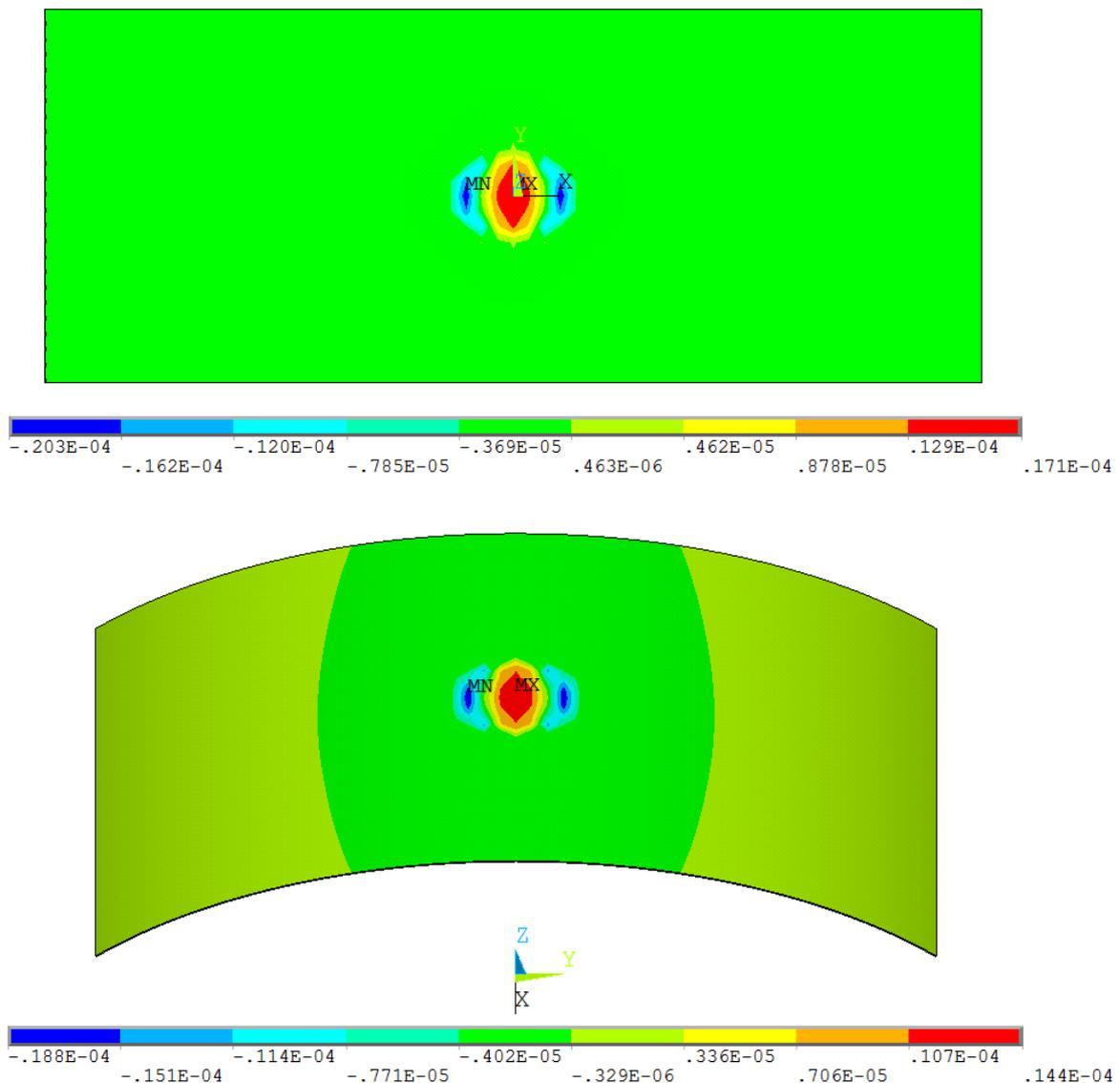


Abbildung 4-18: Dehnungen in m/m in radialer Richtung der Sensoroberfläche auf dem Profilmodell mit dickwandiger Struktur gegenüber den Dehnungen des ebenen Sensors bei gleicher Tropfenkraft und maximaler Krafteinwirkung.

Die minimalen und maximalen Dehnungen in Umfangsrichtung bzw. Sensor-Z-Richtung sind betragsmäßig etwas kleiner als beim ebenen Sensor. Bezüglich ihrer Verteilung ähneln sie sich im Bereich des Tropfenaufpralls sehr. Im Gegensatz zum ebenen Sensor weist der gekrümmte Sensor jedoch auch deutliche negative Dehnungen im weiteren Umfeld des Tropfenaufpralls auf, die durch die Profilverformung verursacht werden. Sie sind betragsmäßig mit einem Bereich von $-0,402 \cdot 10^{-3} \%$ bis $-0,0329 \cdot 10^{-3} \%$ sehr klein, bewirken aber dennoch einen Spannungsanteil aus dem d_{31} -Effekt von $-1,711$ mV.

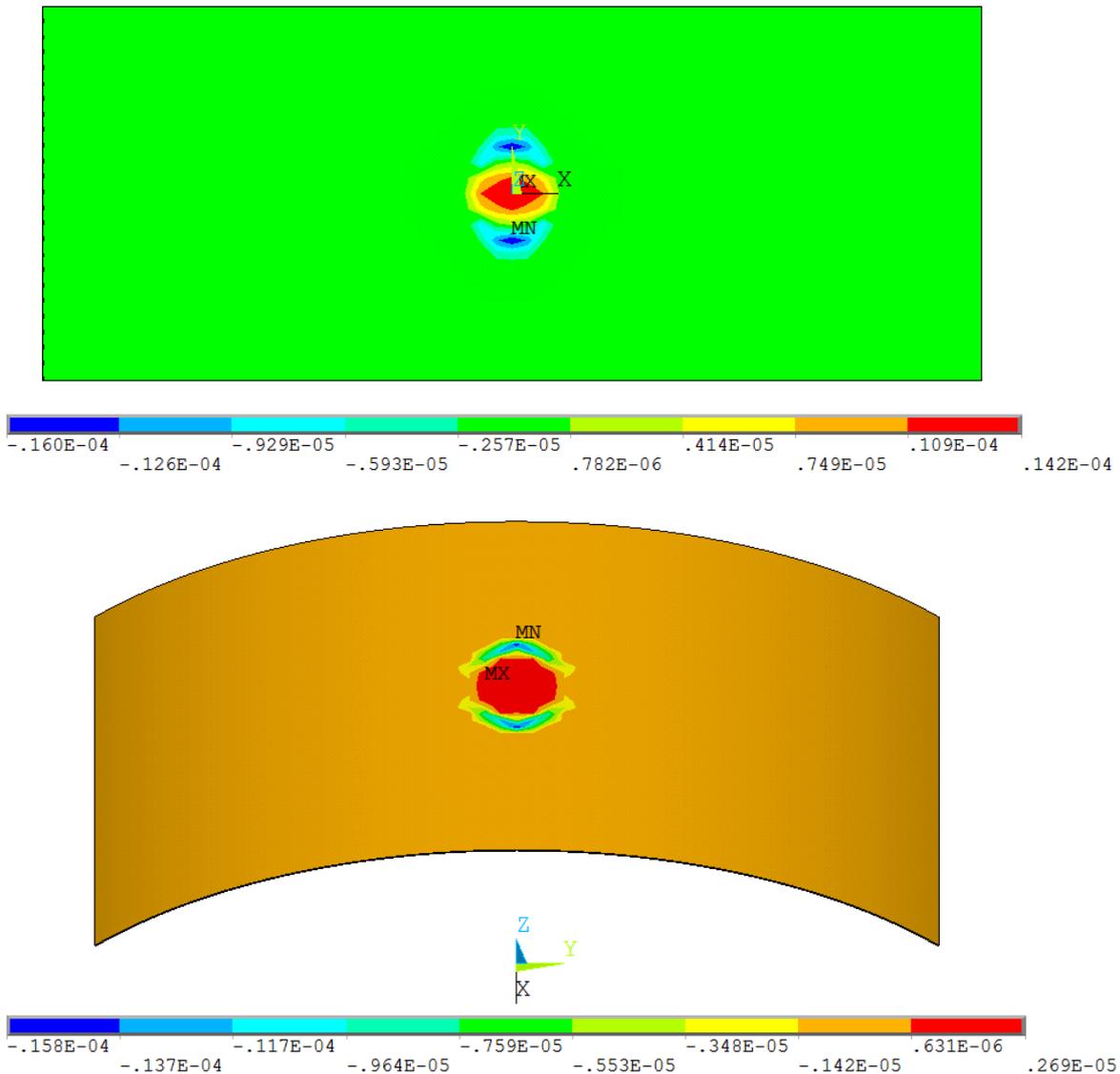


Abbildung 4-19: Dehnungen in m/m in radialer Richtung der Sensoroberfläche auf dem Profilmodell mit dickwandiger Struktur gegenüber den Dehnungen des ebenen Sensors bei gleicher Tropfenkraft und maximaler Krafteinwirkung.

Die minimalen Dehnungen in axialer Richtung des gekrümmten Sensors sind mit denen in Y-Richtung des ebenen Sensors fast identisch. Die maximalen positiven Dehnungen fallen mit nur $0,0269 \times 10^{-2} \%$ im Vergleich zu $0,142 \times 10^{-2} \%$ beim ebenen Sensor jedoch etwa um den Faktor 5 kleiner aus.

Die gewonnenen Ergebnisse aus den drei Modellen sind in Tabelle 4-9 zusammengestellt.

Größe	Ebener Sensor auf Aluminiumblock	Gekrümmter Sensor auf dünnwandigem Profil	Gekrümmter Sensor auf dickwandigem Profil
U_{\max} gesamt in mV	53,323	-68,844	41,532
U_{\max} d_{31} in mV	0,00002	-12,981	-1,711
U_{\max} d_{32} in mV	-0,0000301	10,968	0,608
U_{\max} d_{33} in mV	53,323	-66,795	42,339
U_{\max} d_{24} in mV	-0,000239	-0,00749	-0,0007
U_{\max} d_{15} in mV	-0,000274	-0,0506	-0,406
u_{\max} in Sensor Z-Richtung in μm	$0,167 \cdot 10^{-3}$	1,93	0,00256
u_{\min} in Sensor Z-Richtung in μm	-0,0671	-5,86	-0,108
ϵ_{\max} in Sensor X-Richtung in %	$0,171 \cdot 10^{-2}$	$0,270 \cdot 10^{-2}$	$0,144 \cdot 10^{-2}$
ϵ_{\min} in Sensor X-Richtung in %	$-0,203 \cdot 10^{-2}$	$-1,84 \cdot 10^{-2}$	$-0,188 \cdot 10^{-2}$
ϵ_{\max} in Sensor Y-Richtung in %	$0,142 \cdot 10^{-2}$	$0,163 \cdot 10^{-2}$	$0,0269 \cdot 10^{-2}$
ϵ_{\min} in Sensor Y-Richtung in %	$-0,160 \cdot 10^{-2}$	$-1,24 \cdot 10^{-2}$	$-0,158 \cdot 10^{-2}$
ϵ_{\max} in Sensor Z-Richtung in %	$0,201 \cdot 10^{-2}$	$1,81 \cdot 10^{-2}$	$0,211 \cdot 10^{-2}$
ϵ_{\min} in Sensor Z-Richtung in %	$-6,33 \cdot 10^{-2}$	$-3,99 \cdot 10^{-2}$	$-6,30 \cdot 10^{-2}$

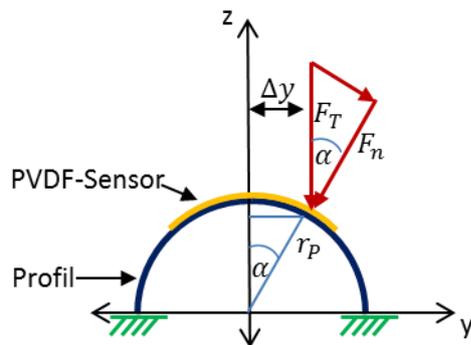
Tabelle 4-9: Gegenüberstellung der maximalen Sensorausgangsspannung, Richtungsanteile, Knotenverschiebungen und Dehnungen für die drei Simulationsmodelle

Ihre Auswertung führt zu dem Schluss, dass der d_{33} -Effekt für steife Substratstrukturen dominiert und die Anteile aus den anderen Effekten vernachlässigbar klein werden. Unter dieser Voraussetzung können also die aus der Literatur entnommenen Werte für die Simulation ohne größeren Nachteil verwendet werden. Für Anwendungsfälle in denen eine nennenswerte Verformung des Substrates nicht ausgeschlossen werden kann müssen unbedingt die für den simulierten Sensor zutreffenden piezoelektrischen und mechanischen Kennwerte verwendet werden. Da diese für den in (Bulur, 2015) verwendeten Sensor aktuell nicht zu ermitteln sind sollte für weiterführende Untersuchungen ein Sensor mit dokumentierten Parametern verwendet werden.

4.5 Einfluss der Treffergenauigkeit auf die elektrische Ausgangsspannung

Alle bisherigen Simulationen gehen von einem zentralen Treffer auf der Mitte des Sensors aus, die für das Profilmodell auf dem Scheitelpunkt des Profils liegt. Für den ebenen Sensor ist der Ort des Tropfenauflaufes unerheblich, solange er auf der aktiven Sensorfläche stattfindet. Für die gekrümmte Anordnung auf dem Profilmodell ist dies aus zwei Gründen nicht der Fall. Zum einen, kann, für Treffer abseits des Profilscheitels, nicht weiter angenommen werden, dass die in Z-Richtung wirkende Tropfenkraft, der senkrecht auf die Sensoroberfläche wirkenden entspricht. Zum anderen, wird die Verformung des Profils, und die daraus resultierenden Verzerrungen, durch den Ort des Tropfenauflaufes beeinflusst. Um den Einfluss der Treffergenauigkeit zu untersuchen wird zunächst der orthogonal auf die Sensoroberfläche wirkende Anteil der Tropfenkraft ermittelt. Anschließend wird für das dünnwandige und das dickwandige Profilmodell, ein

um 5 mm in Y-Richtung verschobener Tropfenaufprall simuliert, und mit den Ergebnissen des jeweiligen zentralen Treffers verglichen.



F_T Tropfenkraft in Z-Richtung in N

F_n Tropfenkraft senkrecht zur Sensoroberfläche in N

Δy Y-Koordinate der Trefferfläche in m

r_p Profilradius außen mit Sensor in m

α Winkel zwischen F_T und F_n in °

Abbildung 4-20: Kräfte, Winkel und Abmessungen am Profilmodell zur Bestimmung der orthogonal auf die Sensoroberfläche wirkenden Tropfenkraftkomponente

Gemäß Abbildung 4-20 ergibt sich für den Winkel α im Profil die Beziehung:

$$\sin \alpha = \frac{\Delta y}{r_p} \quad (4-21)$$

Das Verhältnis der Kräfte F_T und F_n wird durch den gleichen Winkel α bestimmt. Daher gilt:

$$\cos \alpha = \frac{F_n}{F_T} \quad (4-22)$$

Durch Anwenden der Beziehung:

$$1 = \sin^2 x + \cos^2 x \quad (4-23)$$

Ergibt sich daraus:

$$1 = \left(\frac{\Delta y}{r_p}\right)^2 + \left(\frac{F_n}{F_T}\right)^2 \quad (4-24)$$

Durch elementare Umformung erhält man dann die Tropfenkraft orthogonal zur Sensoroberfläche.

$$F_n = F_T * \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta y}{r_p}\right)^2} \quad (4-25)$$

Die Untersuchung wird mit einer Tropfenkraft von $F_T = 4,33$ N durchgeführt. Mit den bekannten Abmessungen des Profils und des Sensors ergibt sich für einen um 5 mm in Y-Richtung verschobenen Treffer:

$$F_n = 4,33 \text{ N} * \sqrt{1 - \left(\frac{0,005 \text{ m}}{0,01755 \text{ m}}\right)^2} = 4,15 \text{ N} \quad (4-26)$$

Da die Koordinatensysteme der Knoten nicht automatisch dem gerade aktiven Koordinatensystem entsprechen, werden alle Knotenkoordinatensysteme in das zylindrische Koordinatensystem gedreht, dass der Form des Profils entspricht. In der Simulation wird F_n an jeden Knoten der Komponente „Aufprallfläche“ im Elementeigenen Koordinatensystem in radialer Richtung übergeben. Dazu wird Δy für jeden Knoten bestimmt. Als Tropfenkraft F_T wird die, aus der in Kapitel 4.1 hergeleiteten Cosinuskraftverteilung bestimmte und vom Abstand zum Tropfenmittelpunkt abhängige Kraft, $F_{(r)}$ verwendet.

Diese Vorgehensweise berücksichtigt nur den orthogonal auf die Sensoroberfläche wirkenden Anteil der Tropfenkraft. Die tangential wirkende Komponente wird vernachlässigt, da ihr Betrag und die Art der Krafteinleitung, durch die unbekannt Reibung zwischen Tropfen und Sensor, die Oberflächenspannung des Tropfens und die Strömungsverhältnisse im Tropfeninneren bestimmt wird. Zudem ist dieser Anteil für die betrachtete Abweichung von 5 mm noch klein.

Dünnwandiges Profilmodell

Für das dünnwandige Profilmodell wird eine maximale Sensorausgangsspannung von -114,63 mV berechnet. Das ist deutlich höher als die für den zentralen Treffer berechnete maximale Sensorausgangsspannung von -68,84 mV. Da die eingeleitete Tropfenkraft geringer ist als beim zentralen Treffer kann die zusätzlich gemessene elektrische Spannung nur durch Dehnungen infolge der Verformung des Profils erklärt werden. Zur Bestätigung dieser Annahme werden die maximalen Dehnungen des Sensors infolge des dezentralen Treffers mit denen infolge des zentralen Treffers verglichen.

Die maximalen Dehnungen in den einzelnen Raumrichtungen, die maximalen Knotenverschiebungen in radialer Richtung und die Richtungsanteile der Verzerrungen an der resultierenden elektrischen Ausgangsspannung sind in Tabelle 4-10 zusammengetragen.

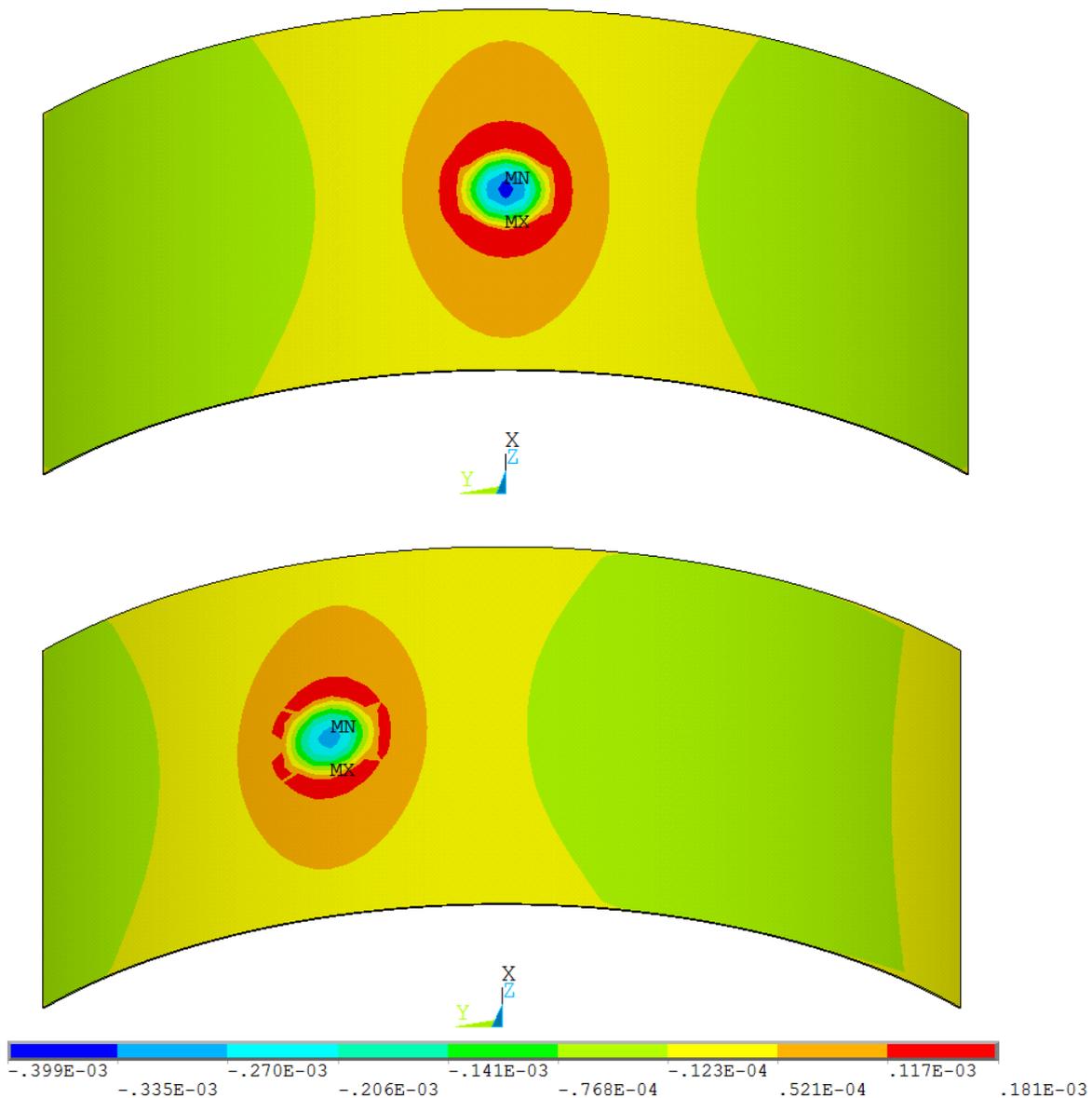


Abbildung 4-21: Dehnungen in m/m in radialer Richtung der Sensoroberfläche auf dem Profilmodell mit dünnwandiger Struktur und zentralem Treffer (oben) gegenüber den Dehnungen desselben Profilmodells mit dezentralem Treffer (unten) bei gleicher Tropfenkraft und maximaler Krafteinwirkung

Abbildung 4-21 zeigt deutliche Unterschiede bezüglich der Verteilung der maximalen Dehnungen in Sensor-Z-Richtung zwischen dem oben abgebildeten zentralen Treffer und dem dezentralen Treffer darunter. Beide Abbildungen verwenden dieselbe Farbskala. Insgesamt fallen sowohl die positiven, als auch die negativen maximalen Dehnungen, für den dezentralen Treffer etwas kleiner aus. Die Größenordnung und die Verteilung der Dehnungen fällt in der Nähe des Tropfenaufpralls recht ähnlich aus. In den weiter entfernten Bereichen sind jedoch deutliche Unterschiede zu erkennen. Die Flächenmäßig sehr stark ausgeprägten grünen Bereiche, mit deutlich negativen Dehnungen, sind beim dezentralen Treffer viel schwächer ausgeprägt und werden oft

durch gelbe Bereiche mit Dehnungen um Null abgelöst. Damit ergibt sich insgesamt eine Verringerung der negativen Dehnungen und damit der Bereiche, die eine positive Ladung erzeugen. So lässt sich die viel größere, negative Sensorausgangsspannung von -102,172 mV, allein aus den Ladungsverschiebungen infolge der hier dargestellten Dehnungen, erklären. Für den eben applizierten Sensor wurde für die gleiche Tropfenkraft eine Sensorausgangsspannung von 53,323 mV berechnet.

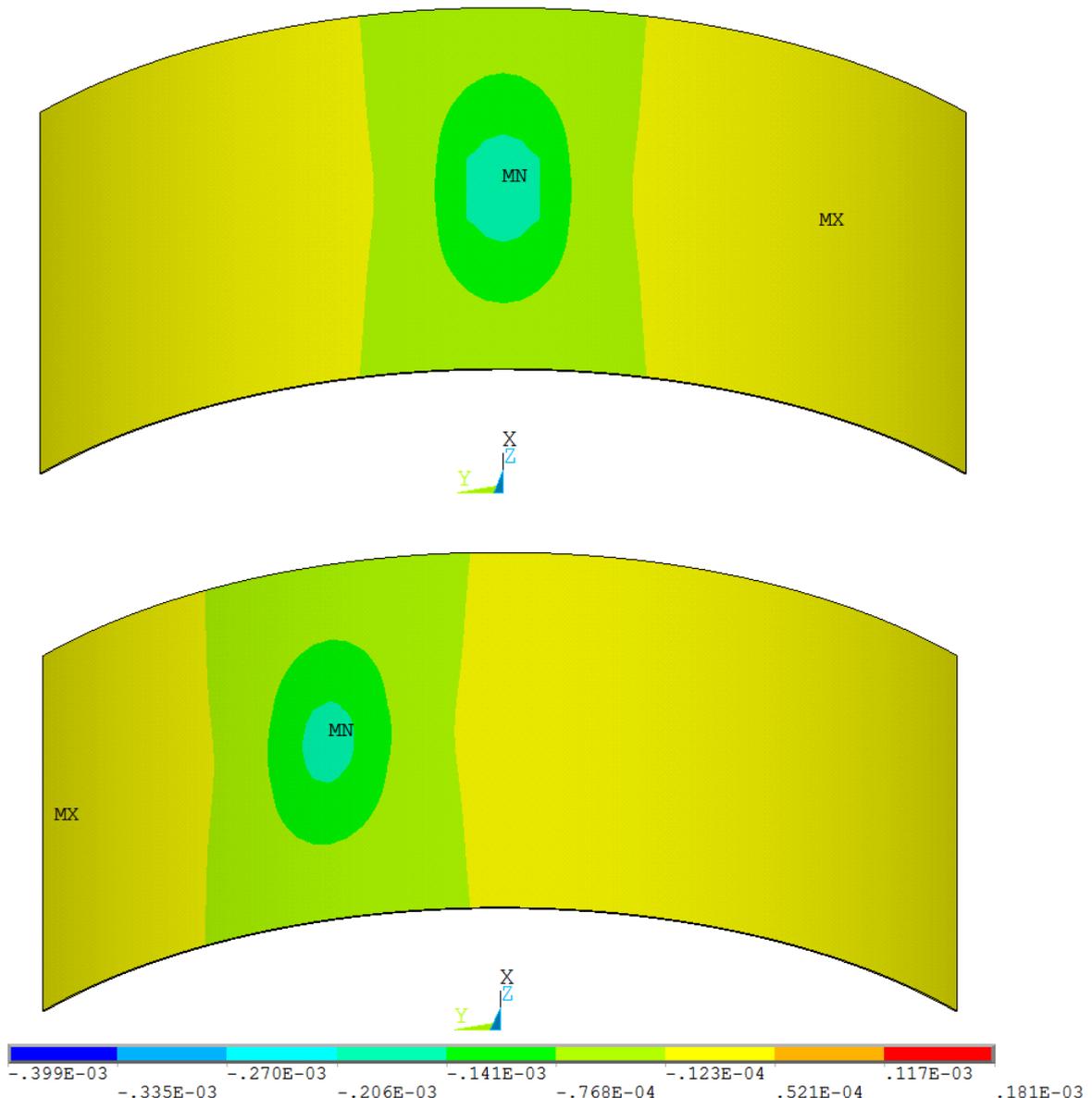


Abbildung 4-22: Dehnungen in m/m in Umfangsrichtung der Sensoroberfläche auf dem Profilmodell mit dünnwandiger Struktur und zentralem Treffer (oben) gegenüber den Dehnungen desselben Profilmodells mit dezentralem Treffer (unten) bei gleicher Tropfenkraft und maximaler Krafteinwirkung.

Der Vergleich der maximalen Dehnungen in Sensor-X-Richtung zeigt, abgesehen von der Position des Tropfenaufpralls, keine deutlich sichtbaren Unterschiede in der Verteilung oder der Größenordnung der Dehnungen. Dennoch ist erkennbar, dass der Bereich mit der stärksten negativen Dehnung beim dezentral getroffenen Sensor etwas

kleiner ausfällt, was wiederum zu einem größeren Anteil an negativer Ladung führt. Für beide Abbildungen wurde dieselbe Farbskala verwendet. Der Anteil der Ladungsverschiebung aus den Dehnungen in Sensor-X-Richtung beträgt für den dezentral getroffenen Sensor $-21,389 \text{ mV}$ gegenüber $-12,981 \text{ mV}$ für den zentral getroffenen Sensor.

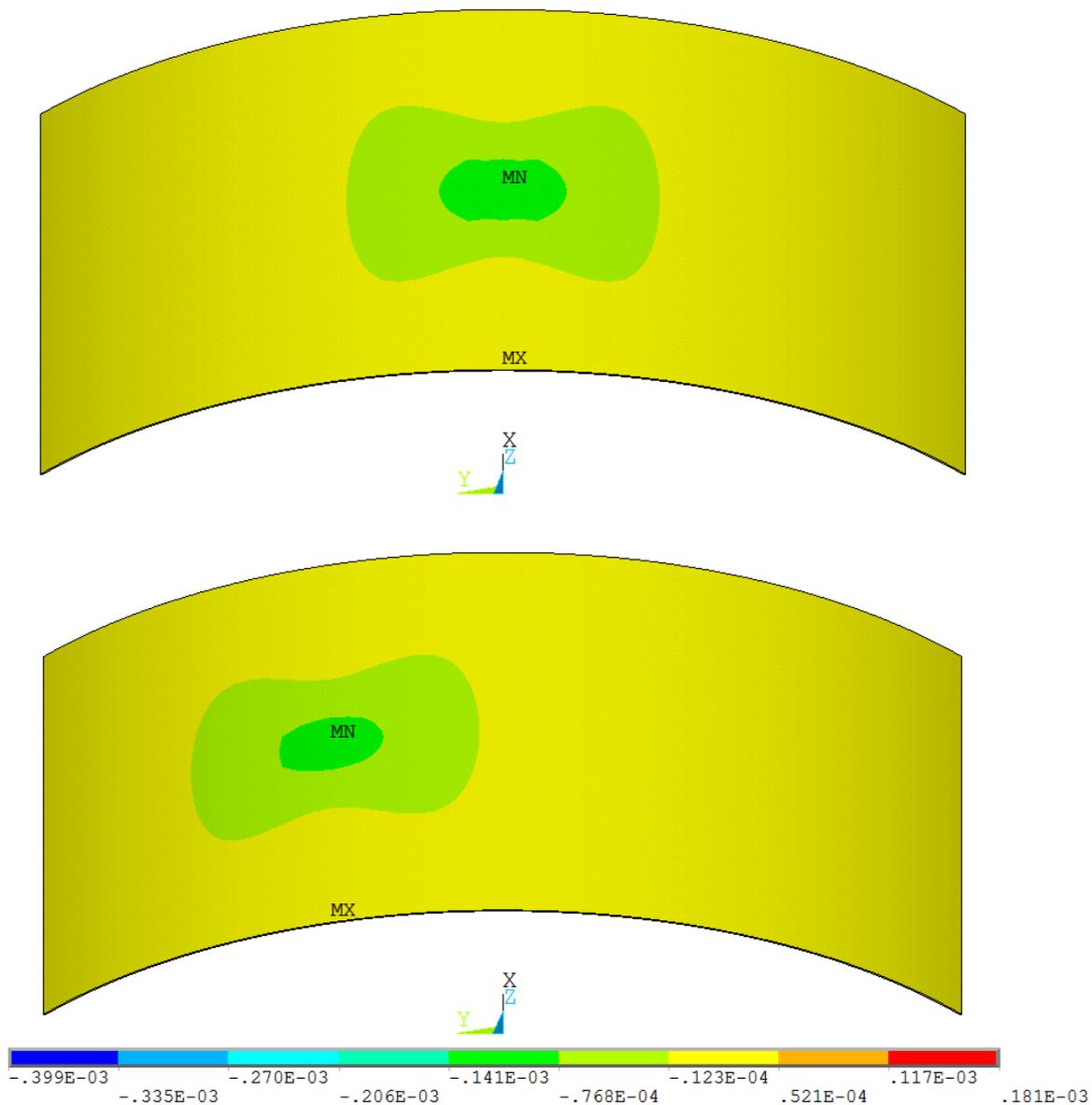


Abbildung 4-23: Dehnungen in m/m in axialer Richtung der Sensoroberfläche auf dem Profilmodell mit dünnwandiger Struktur und zentralem Treffer (oben) gegenüber den Dehnungen desselben Profilmodells mit dezentralem Treffer (unten) bei gleicher Tropfenkraft und maximaler Krafteinwirkung.

Für die in Abbildung 4-23 gezeigten maximalen Dehnungen des Sensors in Sensor-Y-Richtung können, abgesehen von der Position des Tropfenaufpralls, bezüglich ihrer Verteilung und Größenordnung, keine erkennbaren Unterschiede festgestellt werden. Für beide Abbildungen wird dieselbe Farbskala verwendet. Die aus diesen Dehnungen resultierenden Anteile der Ladungsverschiebung fallen mit $8,894 \text{ mV}$ für den dezentral

getroffenen Sensor und 10,968 mV für den zentral getroffenen Sensor entsprechend ähnlich aus.

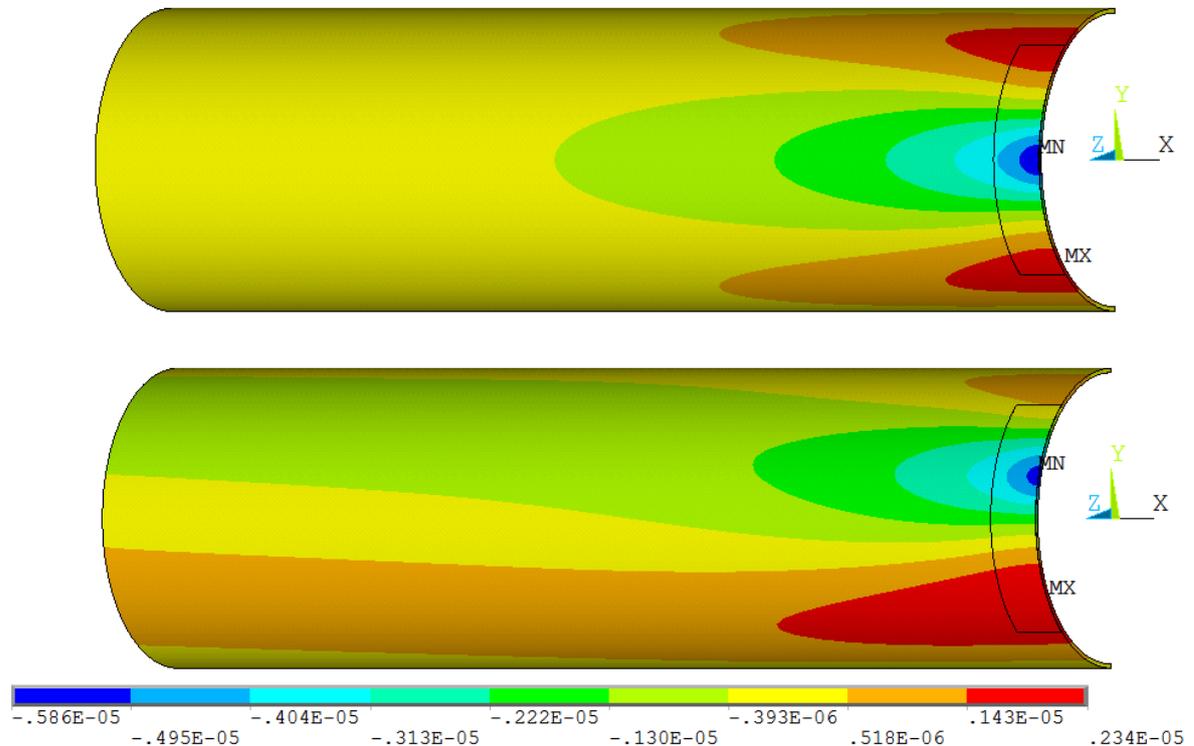


Abbildung 4-24: maximale Knotenverschiebungen in m in radialer Richtung bei zentralem (oben) und dezentralem Treffer (unten)

In Abbildung 4-24 ist der Einfluss, des dezentralen Treffers gegenüber dem darüber abgebildeten zentralen Treffer, auf die radiale Knotenverschiebung deutlich zu erkennen. Die maximalen negativen Verschiebungen sind beim zentralen Treffer größer. Dafür weist das dezentral getroffene Profilmodell gegenüber der Trefferseite eine, sowohl flächenmäßig als auch betragsmäßig, deutlich größere positive Verschiebung auf. Gut zu erkennen ist auch die asymmetrische Verformung des gesamten Profils infolge des dezentralen Tropfenaufpralls. Es wird für beide Abbildungen dieselbe Farbskala verwendet.

Größe	Gekrümmter Sensor auf Profil zentraler Treffer	Sensor auf dünnwandigem zentraler Treffer	Gekrümmter Sensor auf Profil dezentraler Treffer	Sensor auf dünnwandigem dezentraler Treffer
U_{\max} gesamt in mV	-68,844		114,63	
U_{\max} d_{31} in mV	-12,981		-21,389	
U_{\max} d_{32} in mV	10,968		8,894	
U_{\max} d_{33} in mV	-66,795		-102,172	
U_{\max} d_{24} in mV	-0,00749		-0,0059	
U_{\max} d_{15} in mV	-0,0506		-0,043	
u_{\max} in Sensor Z-Richtung in μm	1,93		2,34	
u_{\min} in Sensor Z-Richtung in μm	-5,86		-5,39	
ϵ_{\max} in Sensor X-Richtung in %	$0,270 \cdot 10^{-2}$		$0,285 \cdot 10^{-2}$	
ϵ_{\min} in Sensor X-Richtung in %	$-1,84 \cdot 10^{-2}$		$-1,68 \cdot 10^{-2}$	
ϵ_{\max} in Sensor Y-Richtung in %	$0,163 \cdot 10^{-2}$		$0,148 \cdot 10^{-2}$	
ϵ_{\min} in Sensor Y-Richtung in %	$-1,24 \cdot 10^{-2}$		$-1,11 \cdot 10^{-2}$	
ϵ_{\max} in Sensor Z-Richtung in %	$1,81 \cdot 10^{-2}$		$1,62 \cdot 10^{-2}$	
ϵ_{\min} in Sensor Z-Richtung in %	$-3,99 \cdot 10^{-2}$		$-3,42 \cdot 10^{-2}$	

Tabelle 4-10: Gegenüberstellung der maximalen Sensorausgangsspannung, Richtungsanteile, Knotenverschiebungen und Dehnungen für den zentralen und den dezentralen Treffer auf dem dünnwandigen Profilmodell und dem dickwandigen Profilmodell

Für das dickwandige Profilmodell wird eine Sensorausgangsspannung von 38,19 mV errechnet. Dieses Ergebnis ist zufriedenstellend, da es etwas niedriger ausfällt als beim zentralen Treffer mit 41,53 mV. Dies kann durch die geringere Krafterwirkung gut begründet werden. Wie auch beim zentralen Treffer, ist der aus der Profilverformung resultierende Anteil an der Sensorausgangsspannung sehr gering. Auf eine vergleichende Auswertung der Dehnungen und Knotenverschiebungen analog zum dünnwandigen Profilmodell wird verzichtet, da bis auf die unterschiedliche Trefferposition keine Unterschiede sichtbar sind.

Insgesamt unterstreichen die berechneten Sensorausgangsspannungen, die Dehnungen des Sensors und die radialen Knotenverschiebungen die Erkenntnisse des vorangegangenen Kapitels. Es wird deutlich, dass das dünnwandige Profilmodell dezentralen Treffern gegenüber sehr empfindlich reagiert und eine sehr große Änderung der gemessenen Sensorausgangsspannung verursacht. Das dickwandige Profilmodell weist im Vergleich zum zentralen Treffer für einen dezentralen Treffer lediglich Veränderungen in der elektrischen Ausgangsspannung des Sensors auf, die durch die veränderte Krafterwirkung auf die gekrümmte Sensoroberfläche zu erklären sind.

4.6 Transiente Analyse des ebenen Sensors auf massivem Aluminiumblock

Alle bisherigen Simulationen haben zum Ziel, die experimentell ermittelte, maximale Sensorausgangsspannung, als direkte Folge der Tropfenaufrallkraft zu berechnen. Daher bestehen die Simulationen nur aus 3 Zeitschritten. Wie aus den Versuchsauswertungen in (Bulur, 2015) deutlich wird, beschränkt sich das gemessene Sensorsignal jedoch nicht nur auf den Zeitraum in dem die Tropfenkraft direkt wirkt.

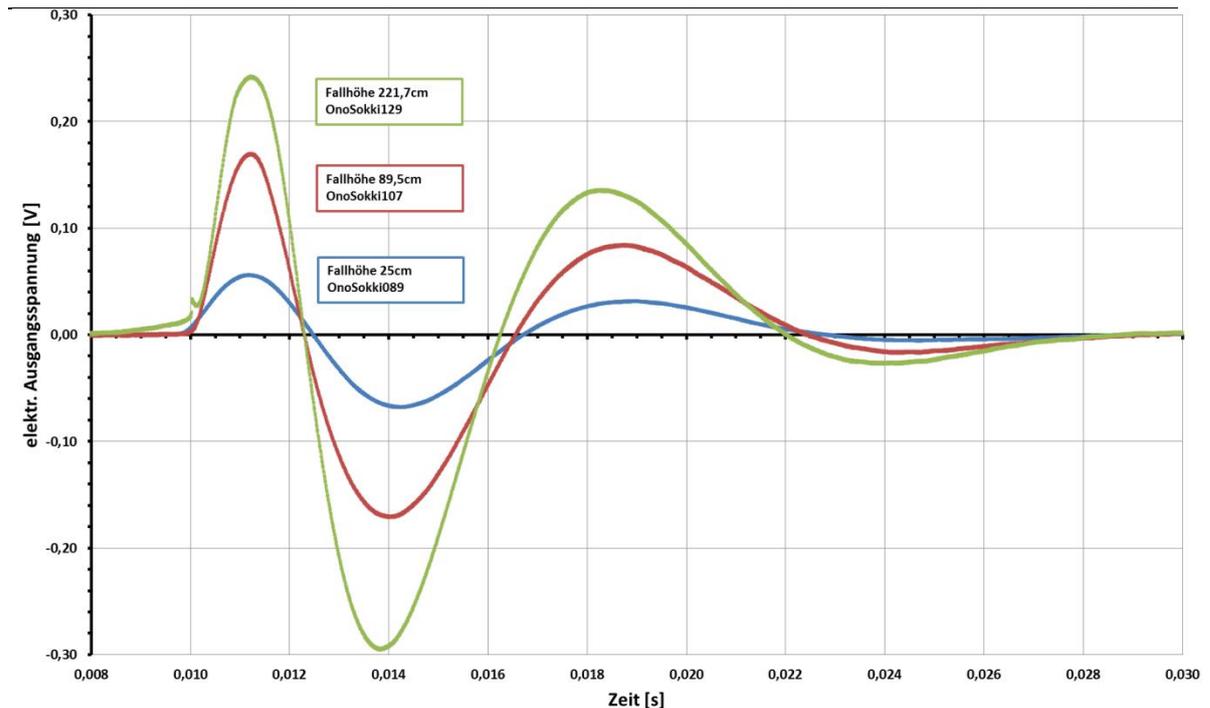


Abbildung 4-25: Zeitlicher Verlauf der gemessenen Sensorausgangsspannung für den ebenen Sensor auf massivem Aluminiumblock (Bulur, 2015)

Abbildung 4-25 führt zu dem Schluss, dass der Sensor über einen deutlich größeren Zeitraum angeregt wird. Die Simulation soll auch nach Wirken der Tropfenkraft das Strukturverhalten und das Sensorverhalten abbilden. Daher wird für die mittlere Fallhöhe von 89,5 cm eine transiente Rechnung durchgeführt werden, die einen Zeitraum von 5 ms ab dem Beginn des Tropfenauflaufes in 500 Zeitschritten untersucht. Unter der Annahme, dass der Tropfen auf der Sensoroberfläche ruht, wenn die Ausgangsspannung die Nulllage zum ersten Mal durchläuft, wird die Tropfenkraft mit der Cosinusverteilung über die ersten 250 Zeitschritte aufgebracht. Danach wird sie zu Null gesetzt. Die Tropfenkraft wurde dazu aus der experimentell ermittelten Sensorausgangsspannung mithilfe der Sensorempfindlichkeit berechnet. Somit entspricht der zeitliche Kraftverlauf dem in Abbildung 4-25 vom Verlassen der Nulllage bis zum ersten Durchlauf durch die Nulllage. Der Zeitpunkt an dem die Nulllage verlassen wird entspricht in der Simulation der Zeit 0. Die Sensorausgangsspannung auf der Oberseite des Sensors wird nach jedem Schritt ausgelesen und mit der Zeit in eine .txt-Datei gespeichert.

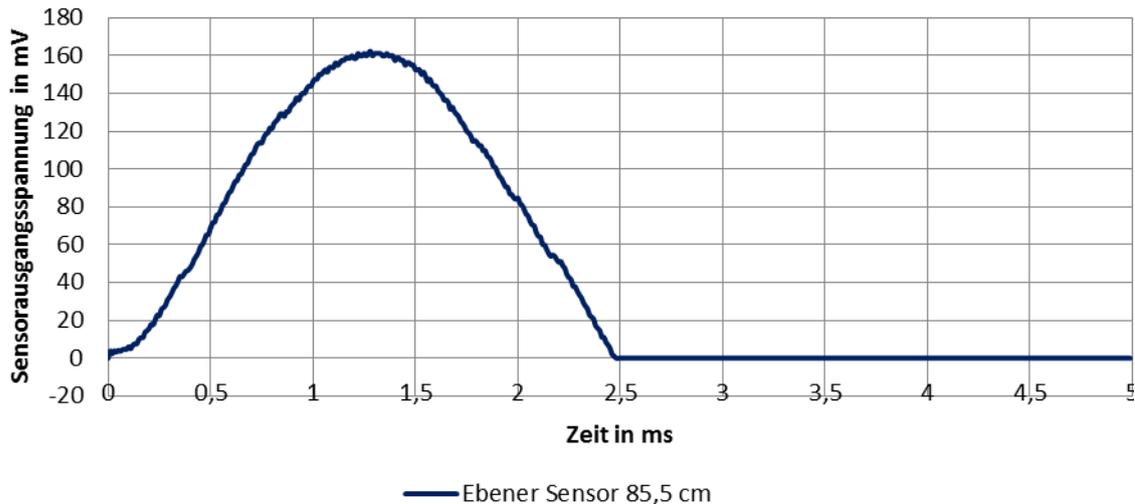


Abbildung 4-26: Zeitlicher Verlauf der Sensorausgangsspannung des ebenen Sensor bei transienter Rechnung

Abbildung 4-26 zeigt den zeitlichen Verlauf der Sensorausgangsspannung für den ebenen Sensor. Der betrachtete Zeitraum von 5 ms entspricht in etwa dem von 10 ms bis 15 ms in Abbildung 4-25. Der Verlauf der berechneten Ausgangsspannung stimmt bis zum ersten Erreichen der Nulllage gut mit dem Experiment überein. Danach wird die im Experiment aufgezeichnete Schwingung jedoch nicht ansatzweise berechnet. Um Fehler durch Vernachlässigen der Klebstoffschicht und der Folie auszuschließen, wird die Simulation mit einer dicken Schicht des verwendeten Epoxidharzgemisches wiederholt. Die Ergebnisse bleiben jedoch erwartungsgemäß identisch. Die Ursache für die widersprüchlichen Sensorausgangsspannungen bleibt zunächst unbekannt und wird im weiteren Verlauf untersucht.

Zusammenfassung Kapitel 4

In diesem Kapitel wird ein Simulationsmodell des in (Bulur, 2015) verwendeten PVDF-Sensors in ANSYS erstellt. Die in (Bulur, 2015), mithilfe der bekannten Sensorempfindlichkeit, aus der gemessenen Sensorausgangsspannung ermittelte Tropfenaufrallkraft, wird dem Simulationsmodell vorgegeben. Dazu werden zwei verschiedene Näherungsansätze entwickelt und miteinander verglichen. Das Modell berechnet daraus annähernd die für den ebenen Sensor gemessene Sensorausgangsspannung, und wird somit validiert. Weiterhin zeigt die Simulation den Einfluss der einzelnen piezoelektrischen Kraftkonstanten auf die resultierende Sensorausgangsspannung für verschiedene Sensoranordnungen auf unterschiedlich steifen Substratstrukturen. Die Simulation berechnet für dünnwandige Substratstrukturen negative Sensorausgangsspannungen, was beim Auswerten der Strukturverformung und der daraus resultierenden Dehnungen im Sensormaterial plausibel erscheint aber im Widerspruch zu den Daten in (Bulur, 2015) steht. Ebenfalls wird der Einfluss von dezentralen Treffern auf die Profilverformung und die Sensorausgangsspannung betrachtet. Weiterhin kann der berechnete, zeitliche Verlauf der Sensorausgangsspannung über die Zeit der Kraftvorgabe hinaus nicht in Einklang mit den experimentellen Daten gebracht werden.

Daher werden weitere Experimente durchgeführt, die den zeitlichen Ablauf des Tropfenaufpralls und die Dauer des Impulses im Vergleich zum Sensorausgangssignal näher untersuchen. Außerdem wird auch das Vorzeichen der Sensorausgangsspannung für den dünnwandigen Demonstrator überprüft.

5 Experimentelle Untersuchung des zeitlichen Verlaufs der Sensorausgangsspannung

Die Ergebnisse der transienten Rechnungen aus Abschnitt 4.5 und deren schlechte Übereinstimmung mit den von (Bulur, 2015) ermittelten Daten werfen einige Fragen auf. Die Zeitspanne in der die Tropfenkraft in die Simulationsmodelle eingeleitet wird, beruht auf der Annahme, dass der Tropfen die Sensoroberfläche bei Signalbeginn berührt und beim ersten Nulldurchlauf auf ihr zur Ruhe kommt. Dies muss kritisch hinterfragt werden. Des Weiteren weisen die Messdaten von (Bulur, 2015) nach dem ersten Signal einige weitere Schwingungen auf, von denen die erste sogar einen größeren Betrag besitzt. Dieses Verhalten kann nicht plausibel erklärt werden. In Frage kommen zunächst Effekte aus der Anregung der Struktur, dem Sensorverhalten, dem auf- und abprallenden Tropfen sowie aus den verwendeten Messgeräten. Um den Vorgang des Tropfenaufpralls und das daraus resultierende Sensorsignal im zeitlichen Verlauf besser zu verstehen, werden zwei weitere Experimente durchgeführt.

Der Sensor wird, statt durch einen Wassertropfen, durch einen Impulshammer angeregt. Mithilfe eines FFT-Analysegerätes kann so der zeitliche Verlauf des definierten Eingangssignals mit dem Ausgangssignal verglichen werden. Außerdem wird der Tropfenaufprall mit einer Hochgeschwindigkeitskamera gefilmt. Dabei wird auch wieder ein FFT-Analysegerät verwendet, um die Bilder mit dem zeitlichen Verlauf der Sensorausgangsspannung zu vergleichen.

Bei beiden Experimenten steht nicht im Fokus, die von (Bulur, 2015) ermittelten Werte zu überprüfen. Es geht um das grundlegende Verständnis des zeitlichen Verlaufs der Sensorausgangsspannung und darum, mögliche Ursachen dafür zu identifizieren. Daher wird kein Wert darauf gelegt exakt identische Versuchsparameter bezüglich Tropfengröße und Fallhöhe zu verwenden, sondern lediglich Vergleichbare. Vorgehensweise, Versuchsaufbau, FFT-Analysegerät, die Pipette zur Tropfenherstellung und der Versuchsstand werden übernommen. Für die Experimente werden ebenfalls die von (Bulur, 2015) verwendeten Demonstratoren mit ebenem Sensor auf massivem Aluminiumblock und der mit dem außen auf das Tragflügelprofil applizierten Sensor verwendet.

5.1 Versuch Impulshammer

Für diesen Versuch wird der Demonstrator mit dem eben auf einen massiven Aluminiumbalken applizierten Sensor verwendet. Das Ziel besteht darin, den zeitlichen Verlauf des zur Anregung des PVDF-Sensors verwendeten Impulses mit dem

resultierenden Ausgangssignal zu vergleichen. Der Sensor wird dazu orthogonal mit dem in Abbildung 5-1 gezeigten Impulshammer Brüel& Kjaer 8206-02 angeregt. Um störende Einflüsse zu vermeiden, wird der Demonstrator auf einem schwingungsgedämpften Tisch positioniert. Sowohl der Modalhammer als auch der PVDF-Sensor werden an das FFT-Analysegerät OnoSokki CF-7200 angeschlossen um ihre Ausgangsspannungen zeitgleich aufzuzeichnen. So wird überprüft, ob die anhand des Sensorausgangssignals angenommene Impulsdauer in (Bulur, 2015) korrekt ist oder korrigiert werden muss.

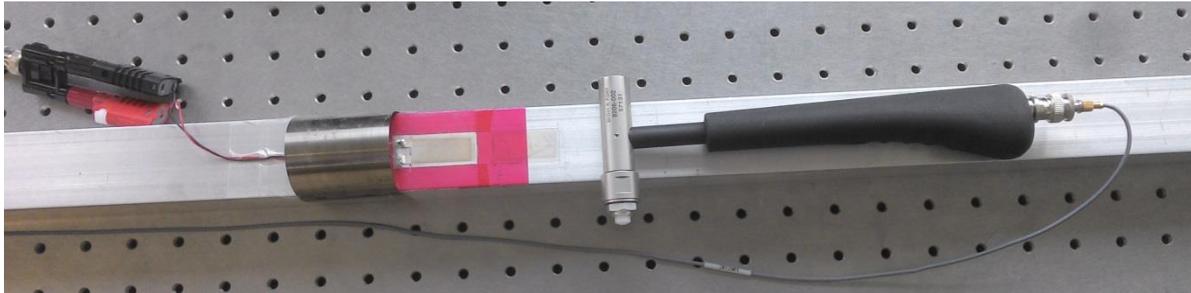


Abbildung 5-1: Impulshammer und Demonstrator mit eben appliziertem PVDF-Sensor

Für den Versuch wird die Kunststoffspitze verwendet. Der Impulshammer verwendet ebenfalls einen piezoelektrischen Sensor mit einer Empfindlichkeit von $2,3 \frac{mV}{N}$. Das Datenblatt mit den Anregungscharakteristiken und Abmessungen ist in Abbildung 8-5 hinterlegt. Für die Messung wurden folgende Einstellungen am FFT-Analysegerät vorgenommen:

Einstellungen OnoSokki	Kanal 1 (PVDF Sensor)	Kanal 2 (Impulshammer)
Abtastfrequenz	10 kHz	10 kHz
Sample	512	512
Filter	nein	nein
Triggerlevel	entfällt	5 %

Abbildung 5-2: Einstellungen am FFT-Analysegerät OnoSokki CF-7200

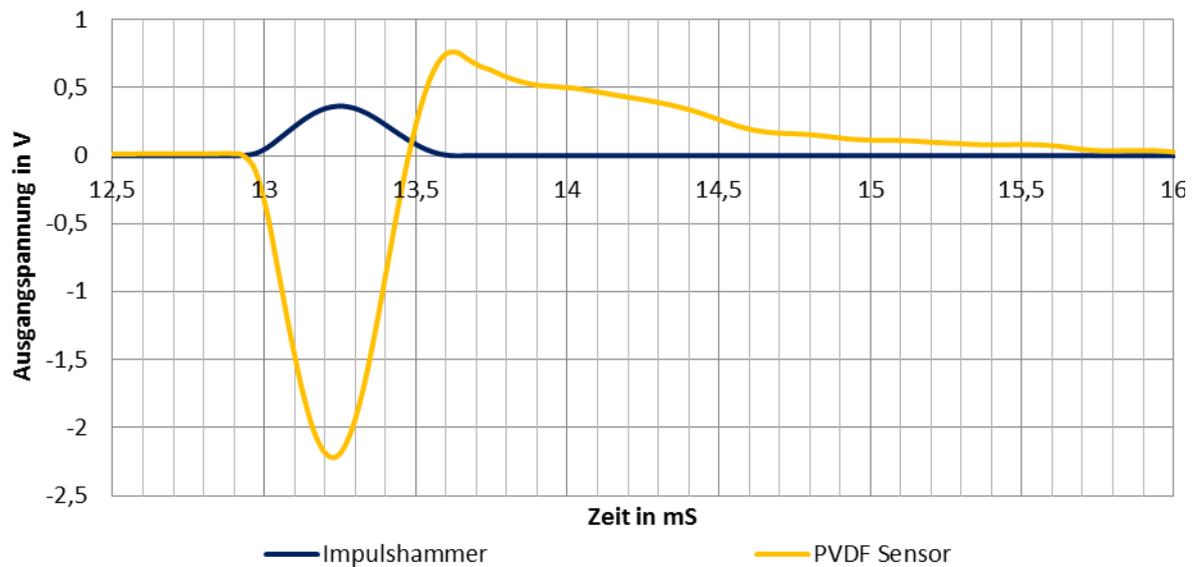


Abbildung 5-3: Zeitlicher Verlauf der Sensorausgangsspannungen von Impulshammer und ebenem PVDF-Sensor auf massivem Aluminiumbalken

Der zeitliche Verlauf des Impulses und der Sensorausgangsspannung in Abbildung 5-3 zeigt deutlich, dass die Annahme über die Impulsdauer zu revidieren ist. Beide Signale starten zeitgleich mit entgegengesetztem Vorzeichen, die Ausgangsspannung des PVDF-Sensors durchläuft die X-Achse jedoch deutlich bevor die Anregung durch den Impulshammer beendet ist. Sie schwingt wie beim Versuch von (Bulur, 2015) mit dem Tischtennisball durch und fällt dann ähnlich einer Kondensatorentladungskurve ab.

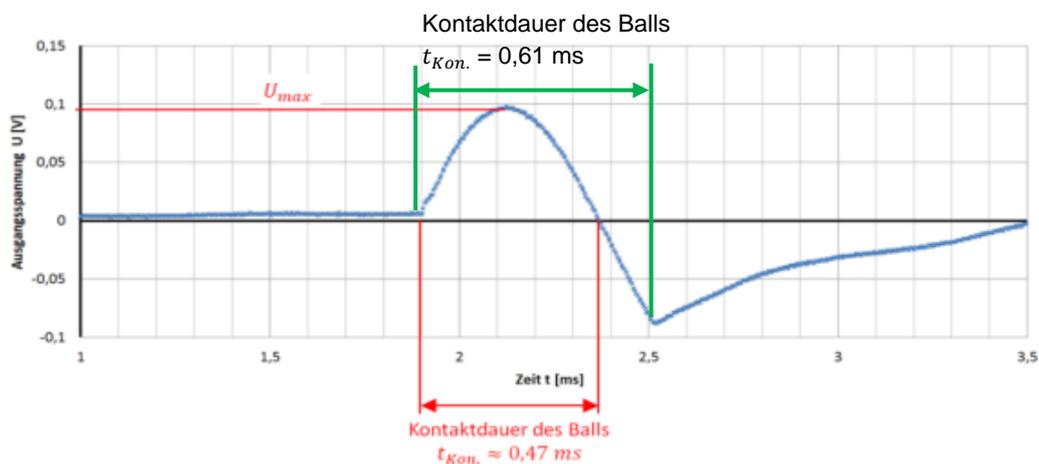


Abbildung 5-4: Diagramm Ausgangsspannung über Zeit und die Bestimmung der Kontaktdauer des Balls aus einer Fallhöhe von 2 cm (Bulur, 2015) mit Korrektur nach dem Versuch mit dem Impulshammer

Das Erreichen des Maximums fällt in etwa mit dem Ende des Impulshammersignals zusammen. Der Impuls dauert also deutlich länger als bisher angenommen.

Mit dieser Erkenntnis wird außerdem die Verifikation der Sensorausgangsspannung in (Bulur, 2015) in Frage gestellt. Die für die Berechnung der Dauer des Kraftstoßes verwendete Zeit beträgt 0,46 ms. Da aufgrund der sehr ähnlichen zeitlichen Verläufe der Sensorausgangsspannung anzunehmen ist, dass sich die Stoßvorhänge bei Impulshammer und Tischtennisball ähnlich verhalten, müsste die Kontaktdauer auf 0,61 ms korrigiert werden vgl. Abbildung 5-4. Die in (Bulur, 2015) berechnete Aufprallkraft würde sich dadurch verringern. Bei genauerer Betrachtung stellt man fest, dass die berechnete Kraft in (Bulur, 2015) der durchschnittlichen Stoßkraft entspricht und daher nicht die maximale Sensorausgangsspannung zur Berechnung der Sensorempfindlichkeit verwendet werden kann sondern die Mittlere. Diese lässt sich mit den vorhandenen Messwerten jedoch nur schwer ermitteln, da durch Begleiteffekte die Nulllage der Sensorausgangsspannung signifikant verschoben wird. Die Ursache dafür wird in Kapitel 5.4 behandelt.

Die Bestätigung der vom Hersteller angegebenen Sensorempfindlichkeit in (Bulur, 2015) ist also fehlerhaft und kann daher nicht weiter als gültig betrachtet werden. Es wird im weiteren Verlauf trotzdem weiter davon ausgegangen, dass die vom Hersteller angegebene Sensorempfindlichkeit korrekt ist.

5.2 Versuch und Aufnahme mit Hochgeschwindigkeitskamera

Dieser Versuch wird am Tragflügelprofil demonstrierer mit außen appliziertem PVDF-Sensor durchgeführt. Der Tropfen aufprall wird möglichst genau gefilmt, um die Bilder dem Sensorausgangssignal im zeitlichen Verlauf zuzuordnen. Außerdem wird das Vorzeichen des Sensorausgangssignals überprüft, da die Simulation für den Tropfen aufprall auf dem dünnwandigen, gekrümmten Profilmodell eine negative Sensorausgangsspannung berechnet, in den Versuchen jedoch eine positive dokumentiert ist.

Als Kamera wird eine Phantom V611 der Firma Vision Research verwendet. Diese verfügt über eine bildgesteuerte, automatische Auslösefunktion, die auch ein Ausgangssignal erzeugt, um weitere Kameras zeitgleich auszulösen. Obwohl es eigentlich nicht dafür vorgesehen ist, wird dieses Signal benutzt, um die Messung im FFT-Analysegerät zu starten. Dazu wird das Signal auf den Kanal 2 des OnoSokki gelegt. Die automatische Auslösung funktioniert analog zum Versuch mit dem Impulshammer. Das Triggersignal ist sehr genau, da der Schwellwert innerhalb eines Bildes erreicht wird.

Zur Steuerung der Kamera und zur Auswertung und Bearbeitung der Bilder wird ein PC mit der Phantom PCC Software benötigt. Dieser wird mittels eines speziellen, mitgelieferten Netzkabels mit der Kamera verbunden. Es ist darauf zu achten, dass der PC über genügend freien Speicherplatz verfügt, da die Kamera in sehr kurzer Zeit große Datenmengen produziert. Beim Speichern der Aufnahmen kann dies durch Beschränkung auf einen kleineren Zeitbereich reduziert werden.

Einstellungen OnoSokki	Kanal 1 (PVDF Sensor)	Kanal 2 (Hochgeschwindigkeitskamera)
Abtastfrequenz	25 kHz	25 kHz
Sample	16384	16384
Filter	nein	nein
Triggerlevel	entfällt	5 %
Kopplung	3,16 V ACrms	10 V DCrms

Tabelle 5-1: Einstellungen am FFT Analysegerät OnoSokki CF-7200

Um den Sensor und einen ausreichend großen Bereich darüber zu erfassen genügt eine Auflösung von 512 x 800 Pixeln. Bei dieser Bildgröße kann die Kamera 13000 Bilder pro Sekunde aufnehmen. Dadurch bedingt sich jedoch eine Belichtungszeit von maximal 76 μ s, welche eine sehr gute Ausleuchtung des Bildbereichs erfordert.

Dies stellt sich mit den vorhandenen Leuchtmitteln problematisch dar, sodass eine Bildkorrektur vorgenommen werden muss, um den fallenden Tropfen vor dem schwarzen Hintergrund und auf dem Demonstrator zu erkennen. Trotzdem bleiben die Aufnahmen sehr dunkel.

Kameraeinstellung	Wert
Auflösung	512 x 800 Pixel
Bilder pro Sekunde	13 002
Belichtungsdauer	76,482 μ s
Bildrate	76,91 μ s
Triggerlimit Bildpunkte	2 %
Triggerlimit Abweichung	3 %
Kontrollintervall für Trigger	50 ms
Objektiv	SIGMA 17-70 mm 1:2.8 - DC
Bildkorrektur	Abbildung 8-6

Tabelle 5-2: Einstellungen an der Hochgeschwindigkeitskamera Phantom V611

Der geringe Kontrast im Bild erschwert die automatische bildgesteuerte Auslösung erheblich. Die Auslösung erfolgt, wenn in einem definierten Bereich im aktuellen Bild eine bestimmte Anzahl an Pixeln eine kritische Abweichung überschreitet. Als Referenz wird dazu derselbe Bildausschnitt vor einem festzulegenden Zeitintervall genutzt. Genügt der Kontrast nicht um eine hinreichend große Änderung zuzulassen, ohne dass die automatische Auslösung auch ohne Tropfen spontan erfolgt, kann diese Methode nicht verwendet werden.

Genau dieses Problem entsteht während des Versuchs durch die mangelhafte Beleuchtung. Es wird umgangen indem mithilfe eines Laserpointers ein Lichtpunkt im Bildbereich genau über dem Sensor positioniert wird. Fällt der Tropfen vor diesen Punkt wird dieser verdunkelt und die Kamera löst zuverlässig aus. Befindet sich die Kamera im Aufnahmemodus, nimmt sie fortlaufend Bilder auf. Diese Bilder werden in einem Zwischenspeicher abgelegt und können der Aufnahme-datei für ein auszuwählendes Zeitfenster vorangestellt werden. Das Bild bei dem die Kamera die Aufnahme startet ist Bild 1. Die Bilder werden fortlaufend nummeriert.

Damit der Laserstrahl absolut stationär ist und die Kamera nicht spontan durch die Bewegung des Lichtpunktes ausgelöst wird, muss der Laserpointer auf einem Stativ

fixiert werden. Ein nützlicher Nebeneffekt dieses Aufbaus ist, dass nur solche Tropfen die Kamera auslösen die mittig auf den Sensor fallen. Der Lichtpunkt ist auf jedem Bild sehr gut zu erkennen und darf nicht mit dem Tropfen verwechselt werden, welcher viel dunkler erscheint.

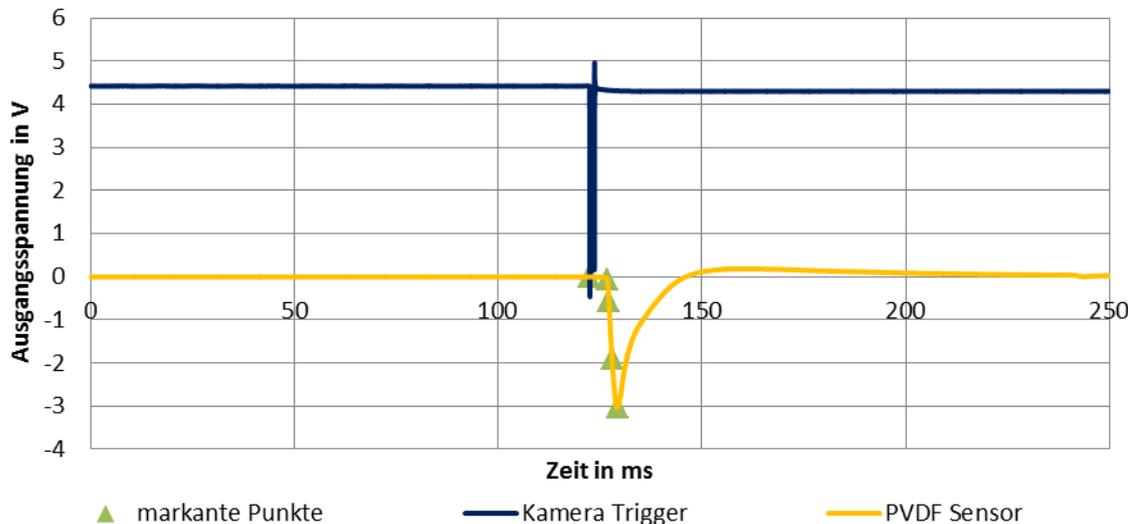


Abbildung 5-5: Zeitlicher Verlauf der mit dem OnoSokki gemessenen Spannungen

Der zeitliche Verlauf, der im FFT-Analysegerät gemessenen Spannungen, ist in Abbildung 5-5 dargestellt. Die blaue Linie zeigt, dass die vom Trigger der Kamera ausgemessene Spannung konstant bei etwa 4,4 V liegt und nur für das Auslösen weiterer Kameras schlagartig auf unter 0 V abfällt. Dabei wird die Messung des OnoSokki ausgelöst. Das auch die Zeit davor mit aufgezeichnet wurde liegt daran, dass vom Messgerät fortlaufend gemessen wird. Die gemessenen Daten verbleiben genau wie bei der Kamera für einen festgelegten Zeitraum in einem Zwischenspeicher und werden dann wieder gelöscht. Beim Auslösen der Messung wird aus dem Zwischenspeicher ein ausgewählter Zeitraum vor dem Auslösesignal in die Messdatei überschrieben. Die Sensorausgangsspannung ist in Gelb dargestellt und liegt bis zum Aufprall des Tropfens in etwa zwischen -0,5 mV und -4 mV. Diese Schwankungen werden als Rauschen interpretiert und vernachlässigt, da sie im Vergleich zum eigentlichen Signal sehr klein sind. Durch grüne Dreiecke sind markante Punkte im Verlauf des Tropfenaufpralls gekennzeichnet.

Punkt	Bedeutung	Frame	Zeit OnoSokki	Zeit nach Trigger
1	Auslösung durch das Triggersignal	0	122,484 ms	0 ms
2	Tropfen berührt die Sensoroberfläche	55	126,79 ms	4,306 ms
3	Tropfen zur Hälfte aufgeprallt	60	127,174 ms	4,690 ms
4	Tropfen ganz aufgeprallt	70	127,944 ms	5,460 ms
5	Pfütze maximal ausgedehnt	87	129,251 ms	6,767 ms

Tabelle 5-3: Zeit- und Bildabfolge der in Abbildung 5-6 betrachteten markanten Phasen des Tropfenaufpralls

Das Triggersignal und der Aufprall des Tropfens finden nur in einem sehr kleinen Zeitfenster der Messung statt. Die durch grüne Dreiecke gekennzeichneten markanten Punkte des Tropfenaufpralls können so nicht näher interpretiert werden. Deswegen wird nur ein kleiner Zeitausschnitt von 8 ms der gespeicherten Daten im Folgenden betrachtet.

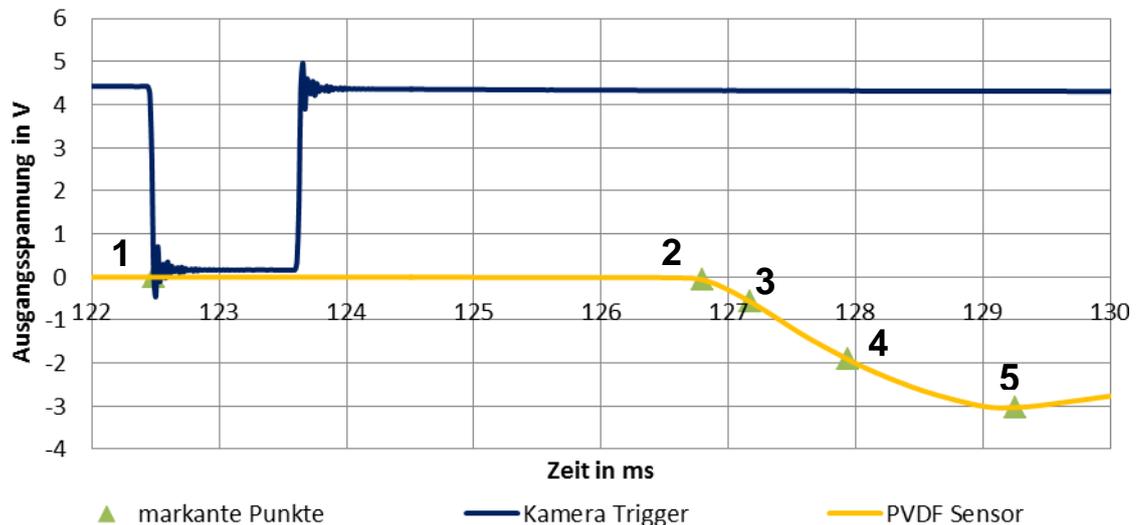


Abbildung 5-6: Ausschnitt aus Abbildung 5-5 um die zeitliche Abfolge markanter Stadien des Tropfenaufpralls besser zu erkennen

In Abbildung 5-6 ist ein kleiner Ausschnitt von 8 ms aus Abbildung 5-5 dargestellt. Die zeitlichen Verläufe des Triggersignals der Kamera und der Ausgangsspannung des PVDF- Sensors infolge des Tropfenaufpralls sind entsprechend detaillierter zu erkennen. Der genaue Verlauf des Triggersignals der Kamera ist von untergeordneter Bedeutung. Einzig wichtig ist, dass festgestellt werden kann, dass das eingestellte Triggerlevel von 0,5 V (+5 % von 10 V) am OnoSokki unverzüglich zu Beginn des Signals durchlaufen wird und damit keine Verzögerung zwischen der Bildaufzeichnung durch die Kamera und der Messung der Sensorausgangsspannung durch das OnoSokki berücksichtigt werden muss. Bild 9 in Abbildung 5-7 zeigt den Tropfen vor dem Lichtpunkt des Laserpointers ca. 0,71 ms nach dem Auslösen der Kamera. Bild 1 wurde nicht gespeichert. Das Prinzip der beschriebenen bildgesteuerten Auslösung ist aber trotzdem gut zu erkennen da der Tropfen in Bild 1 lediglich den oberen Bereich des Lichtpunktes verdeckt statt wie dargestellt den Unteren.

Bezüglich der Sensorausgangsspannung ist gut zu erkennen, dass ab dem Moment an dem der Tropfen die Sensoroberfläche berührt vgl. Punkt 2 Abbildung 5-7 (Seite - 75 -), auch eine deutlich fallende der Spannung gemessen wird. Nach nur etwa 0,384 ms ist bereits die Hälfte des Tropfens aufgeprallt vgl. Punkt 3 Abbildung 5-7. Die Sensorausgangsspannung liegt zu diesem Zeitpunkt bei -0,577 V. Nach weiteren 0,77 ms ist der Tropfen ganz aufgeprallt vgl. Punkt 4 Abbildung 5-7. Die Sensorausgangsspannung beträgt -1,91 V. Die entstandene Pfütze breitet sich noch weitere 1,437 ms aus, bis sie ihre maximale Ausdehnung erreicht hat und beginnt sich wieder zusammenzuziehen vgl. Punkt 5 Abbildung 5-7. Die Sensorausgangsspannung

beträgt nun $-3,03$ V. Dieser Zeitpunkt ist nur sehr schwer zu identifizieren und potentiell fehlerbehaftet. Das liegt daran, dass die Aufnahme nur schlecht belichtet ist und der Vorgang des Zusammenziehens nur sehr langsam beginnt. Obwohl bei diesem langsamen zusammenziehen keine nennenswerten Kräfte auf die Sensoroberfläche wirken können fällt die Sensorspannung relativ langsam in Form einer Entladungskurve ab und schwingt über das Nullniveau vgl. Abbildung 5-5.

Der Bereich, in dem augenscheinlich weder eine Expansion noch eine Kontraktion des Tropfens zu beobachten ist, ist relativ lang. Es ist davon auszugehen, dass der Impuls mit diesem Stadium endet, da offenbar die gesamte kinetische Energie umgewandelt wurde. Die maximale Sensorausgangsspannung mit $-3,0365$ V wird bei $129,141$ ms gemessen. Dies ist unter der Annahme, dass auch während des Krafteintrags durch den aufprallenden Tropfen Ladung abfließt zu erwarten.

Auffällig ist, dass der Impuls des Tropfens offensichtlich etwa mit Erreichen der maximalen Sensorausgangsspannung endet was der Beobachtung aus dem Versuch mit dem Impulshammer vgl. Abbildung 5-3 widerspricht. Die Sensorausgangsspannung startet bei Anregung durch den Impulshammer bei Null, fällt auf ein Minimum, durchläuft einmal die Nulllage und erreicht zum Ende des anregenden Impulses ein Maximum. Bei Anregung durch den Tropfen fällt die Sensorausgangsspannung, ausgehend von der Nulllage kontinuierlich und erreicht zum Ende des anregenden Impulses das Minimum. Der darauf folgende Anstieg der Sensorausgangsspannung, das Durchlaufen der Nulllage und das Erreichen, des deutlich weniger scharf abgegrenzten, Maximums kann nicht der Impulskraft des Tropfens zugeordnet werden, da dieser im betreffenden Zeitraum quasi statisch auf der Oberfläche ruht. Aus logischer Überlegung heraus müsste die Sensorausgangsspannung nach dem Impuls auch im negativen Bereich verbleiben und sich langsam an das Nullniveau annähern, da die Tropfenmasse im Vergleich zur Ausgangssituation auf dem Sensor verbleibt.

Mit der Hochgeschwindigkeitskamera wird also für den Impuls durch den Tropfen ein anderer zeitlicher Verlauf ermittelt als mit dem Impulshammer. Einerseits erscheint dies nicht plausibel, andererseits handelt es sich beim Impulshammer um einen nahezu ideal elastischen Stoß und beim Tropfenaufprall um einen vollständig inelastischen Stoß. In jedem Fall muss diese Erkenntnis berücksichtigt werden und die Ursache kritisch hinterfragt werden. Kapitel 5.3 klärt die Ursache dafür auf.

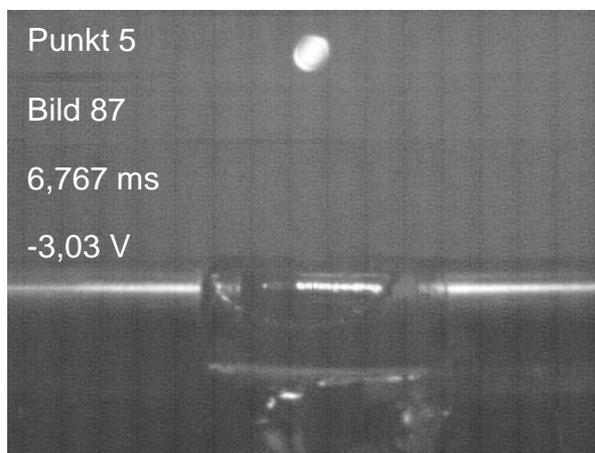
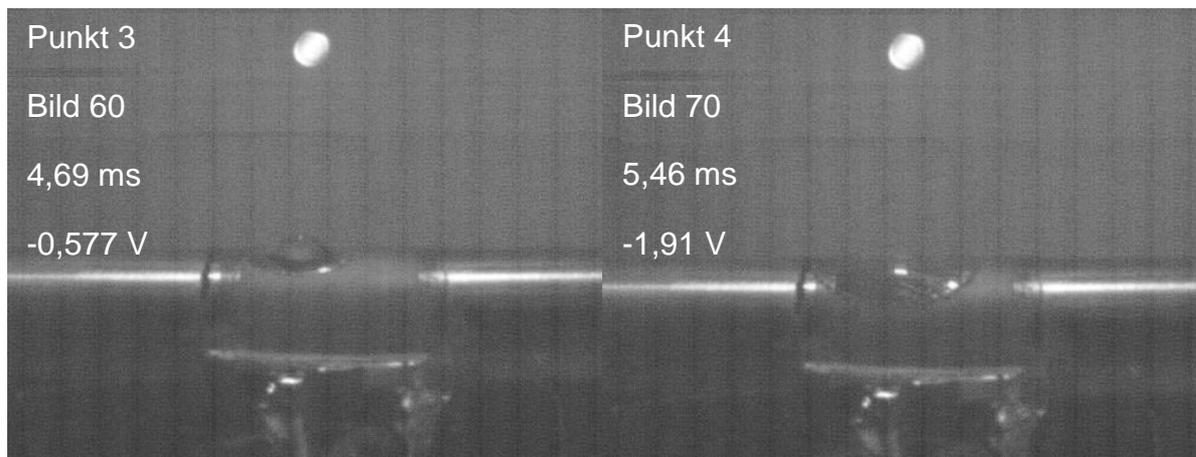
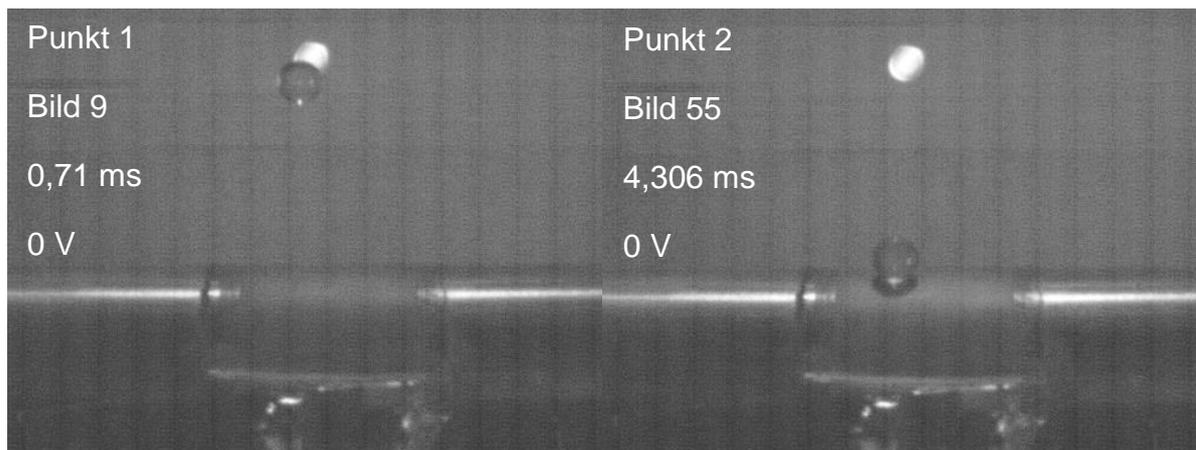


Abbildung 5-7: Aufnahmen der in Abbildung 5-6 dargestellten markanten Punkte mithilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera bei 13 000 Bildern pro Sekunde

Die mit der Kamera aufgezeichneten Bilder der ausgewählten und in Abbildung 5-6 eingezeichneten markanten Punkte sind in Abbildung 5-7 dargestellt. Zusätzlich zur Einordnung in den zeitlichen Verlauf der Sensorausgangsspannung wird auf das dazugehörige und auf den Bildern erkennbare Verhalten des Tropfens eingegangen um den Vorgang des Aufpralls besser zu verstehen.

Punkt 1 bzw. Bild 9 liegt zeitlich vor dem eigentlichen Tropfenaufprall und wird ersatzweise für das fehlende Bild 1 genutzt, das den Messvorgang und die Aufnahme startet, aber auf den Tropfenaufprall keinen Einfluss hat.

Punkt 2 bzw. Bild 55 zeigt den Beginn des Aufpralls. Der Tropfen berührt gerade eben die Sensoroberfläche, ist aber noch nicht verformt. Dieses Bild bestätigt auch die Kapitel 4.1 getroffene Annahme, dass der Tropfen in etwa kugelförmig ist.

Auf Bild 60 ist gut erkennbar, was beim Aufprall geschieht. Der Tropfen behält oberhalb der Kontaktfläche zum Sensor seine runde Form weitestgehend bei. Nach dem Kontakt benetzt der Tropfen die Sensoroberfläche und breitet sich dort in einer relativ runden Pfütze aus. Der Übergang vom nicht aufgeprallten, halbkugelförmigen Tropfenteil zur Pfütze ist erstaunlich scharf abgegrenzt.

Im Bild 70 ist nur noch diese Pfütze zu erkennen. In der Mitte scheint sie noch etwas dicker zu sein als in den Randbereichen. Bemerkenswert ist auch, dass der Aufprall der zweiten Tropfenhälfte doppelt so lange andauert wie der der ersten Hälfte. Die Pfütze breitet sich bis zum Bild 87 weiter aus und wird dabei so groß, dass sie über die Sensorfläche reicht.

Zum weiteren Ausbreiten der Pfütze muss die Oberflächenspannung des Tropfens überwunden werden. Als einzige Energiequelle steht dazu die Bewegungsenergie des Tropfens zur Verfügung. Damit wird deutlich, dass ein Teil der Bewegungsenergie somit noch in der Pfütze enthalten ist, nachdem der Tropfen bereits vollständig verschwunden ist. Es überrascht trotzdem, dass bei diesem Vorgang die Sensorausgangsspannung noch um etwa 50 % gegenüber Punkt 4 ansteigt. Auch hier wird zur Klärung des Phänomens auf Kapitel 5.3 verwiesen

Nach Bild 87 zieht sich die Pfütze von ihren Rändern her sehr langsam wieder zusammen und der Tropfen bleibt linsenförmig auf der Sensoroberfläche liegen. Diese Beobachtung deckt sich mit (Clanet, et al., 2004).

Während der Messungen für die Aufnahme des Tropfenaufpralls mit der Hochgeschwindigkeitskamera fällt auf, dass die Verläufe der Sensorausgangsspannung sich grundlegend von denen unterscheiden, die in (Bulur, 2015) dokumentiert sind und die mithilfe der transienten Rechnung in Kapitel 4.5 simuliert werden (vgl. Abbildung 4-25). Ein Vergleich der vorgenommenen Einstellung am bei beiden Versuchen verwendeten FFT-Analysegerät OnoSokki zeigt, dass die Messwerte in (Bulur, 2015) mit einem 100 Hz Hochpassfilter (HPF) aufgezeichnet wurden, um ein 50 Hz Störsignal zu unterbinden.

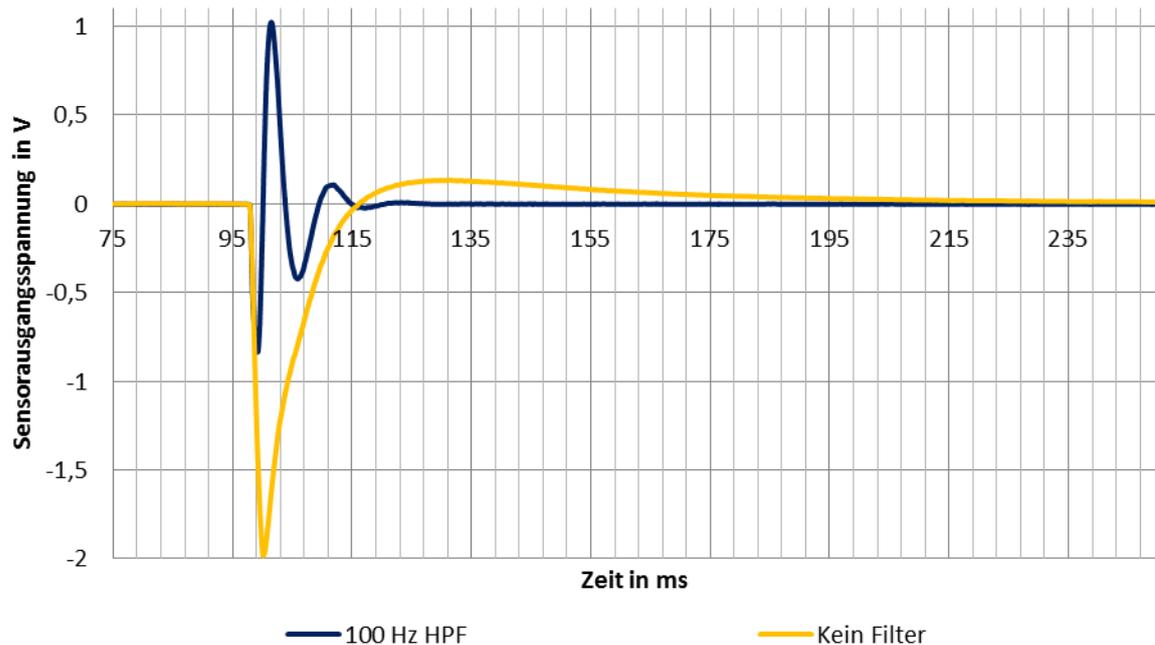


Abbildung 5-8: Zeitlicher Verlauf der Sensorausgangsspannung mit und ohne Verwendung eines Hochpassfilters mit einer Grenzfrequenz von 100 Hz

Vergleicht man die Verläufe der Sensorausgangsspannungen mit und ohne den 100 Hz HPF in Abbildung 5-8 sieht man sofort, dass dadurch das Messergebnis völlig verändert wird. Aufbau und Versuchsdurchführung sind für beide Verläufe identisch. Der einzige Unterschied besteht in der Verwendung des 100 Hz Hochpassfilters. Diese Erkenntnis führt zu dem Schluss, dass die als Grundlage für die bisherige Arbeit verwendeten Messergebnisse aus (Bulur, 2015) durch den HPF verändert wurden und nicht verwendet werden können.

Zusätzlich weisen die Messungen trotz ähnlicher Randbedingungen Sensorausgangssignale auf, die in einer völlig anderen Größenordnung angesiedelt sind. Zum Einen weist das Signal ein negatives Vorzeichen auf, zum Anderen liegen die Ausgangsspannungen in durchgeführten Tropfenfallversuch zwischen -2 und -3 V anstatt 113 mV die in den Versuchen von (Bulur, 2015) ermittelt wurden. Das trifft auch auf die Messung mit eingeschaltetem 100 Hz HPF zu. Hier liegt das Minimum bei den selbst durchgeführten Versuchen noch bei ca. -800 mV bis -1 V und ist damit um ein mehrfaches größer als in den vorangegangenen Experimenten (Bulur, 2015). Da die Versuchsbedingungen vergleichbar sind ist dies zunächst nicht zu erklären. Einflussparameter, die sich vom Versuch in (Bulur, 2015) unterscheiden, sind unter anderem die Tropfengröße die nicht kontrolliert wurde, da sie als zumindest sehr ähnlich angenommen werden kann, die Fallhöhe von 72 cm statt 68,5 cm, mögliche Temperatureinflüsse auf die Sensorempfindlichkeit durch die Abstrahlwärme der Leuchtmittel und das Blech des Demonstrators, das sicherlich nicht mit derselben Schraubenvorspannkraft montiert wurde. Außerdem besteht generell die Möglichkeit, dass ein Teil der Sensorausgangsspannung auf den pyroelektrischen Effekt zurückzuführen ist. Bei jedem nicht vollständig elastischen Stoß wird nach dem Energieerhaltungssatz Bewegungsenergie u.A. durch Reibung auch in thermische Energie umgewandelt. Zudem verdunstet flüssiges Wasser ständig, solange die

umgebende Luft keine gesättigte Luftfeuchtigkeit aufweist. Durch die Verdunstungskälte wird so das verbleibende Wasser unter die Umgebungstemperatur gekühlt. Es kann davon ausgegangen werden, dass dieser Effekt, für den kleinen Tropfen mit einer im Verhältnis zur Oberfläche kleinen Masse und der durch den Fall erzwungenen Umströmung eine messbare Temperaturänderung zur Folge hat. Die Überlagerung von piezoelektrischem und pyroelektrischem Effekt stellt auch eine mögliche Ursache für die Abweichung von der Nulllage des Sensorausgangssignals zum Ende des Tropfenaufpralls dar.

Um die Schlüsse aus dem mit der Hochgeschwindigkeitskamera durchgeführten Experiment zu bestätigen und korrekte Eingabewerte für die Simulation zu erhalten, wird das Experiment mit dem ebenen Sensor auf dem massiven Aluminiumbalken analog zu (Bulur, 2015) wiederholt. Zusätzlich werden Tropfen mit identischer Fallhöhe aber verschiedenen Temperaturen verwendet, um den möglichen Einfluss des pyroelektrischen Effekts genauer zu untersuchen. Außerdem wird ein Frequenzspektrum des Tropfenaufpralls erstellt, um einen Eindruck zu bekommen welche Frequenzen im Sensorausgangssignal enthalten sind und wie groß die jeweiligen Anteile sind.

5.3 Experiment zur Ermittlung der elektrischen Ausgangsspannung eines eben auf einen massiven Aluminiumblock applizierten PVDF-Sensors bei konstanter Fallhöhe für verschiedene Tropfentemperaturen

Für die gesamte Versuchsreihe werden dieselben Versuchsbedingungen verwendet wie in (Bulur, 2015). Der einzige Unterschied ist, dass zur Messung der Sensorausgangsspannung kein Frequenzfilter verwendet wird. Da der originale Sensor leider beschädigt wurde, wird ein neuer Sensor derselben Bauart appliziert. Das Vorgehen dazu wird analog zu dem in (Bulur, 2015) gewählt, um die Randbedingungen des Experiments so identisch wie möglich zu halten. Außerdem muss die Tropfengröße überprüft werden. Dazu wird die Mettler Toledo AX 205 verwendet. Es wird destilliertes Wasser verwendet und eine Tropfenmasse von 13,47 mg bei Raumtemperatur ermittelt. Die Standardabweichung beträgt 0,384 mg. Die einzelnen Messwerte sind in Tabelle 8-7 zusammengestellt.

Einflussparameter	Junglewitz	(Bulur, 2015)
Pipette	13,93 µl	13 µl
Tropfengröße	13,47 mg	12,63 mg ±0,19 mg
Fallhöhe	89,7 cm	25 cm; 89,5 cm; 221,7 cm
Umgebungstemperatur	23,7 °C – 24,9 °C	k.A.
Wassertemperatur	80 °C, 60 °C, 40 °C, 23,3 °C, 10 °C, 0 °C,	k.A.
Wasser	destilliertes Wasser	k.A.
Sensor	MEAS DT1-052K	MEAS DT1-052K
Klebstoff	SICOMIN SR1710	SICOMIN SR1710
Härter	SICOMIN SD8824	SICOMIN SD8824
Mischungsverhältnis	100:23	100:23
Aushärtungszyklus	8h bei 60 °C	8h bei 60 °C
FFT Analysegerät	OnoSokki FFT CF-7200	OnoSokki FFT CF-7200
Kabel	Standardkabel	Standardkabel
Frequenzfilter	kein	100 Hz HPF
Sample	16384	16384
Abtastfrequenz	50 kHz	100 kHz
Triggerlevel	±5 %	5 %
Messbereich	10 V	
Feinwaage	Mettler Toledo AX 205	Mettler Toledo AX 205
Frequenzanalyse nach	Hannig	k.A.

Tabelle 5-4: Gegenüberstellung der Versuchsrandbedingungen für das Experiment mit dem eben auf einen massiven Aluminiumblock applizierten Sensor im Vergleich zum gleichen Experiment in (Bulur, 2015)

Alle Meßgeräte, falls erforderlich deren Einstellungen, und alle Versuchsparameter, die einen Einfluss auf das Messergebnis haben könnten, sind in Tabelle 5-4 aufgelistet und, falls möglich, den Randbedingungen aus dem äquivalenten Versuch in (Bulur, 2015) gegenübergestellt.

Durchführung der Versuchsreihe

Es werden je Temperaturstufe 5 Messwerte aus einer konstanten Fallhöhe von 89,8 cm aufgenommen. Da sich die Temperatur in dem Wasserbehälter insbesondere für die höheren Temperaturen rasch ändert, und auch im Wasserbehälter nicht konstant verteilt ist, werden einige °C Abweichung toleriert. Die genauen Temperaturen und die dazugehörigen Messwerte sind in Tabelle 8-8 dokumentiert und beziehen sich auf die Temperatur des Wassers im Becher. Die Temperatur des Tropfens beim Aufprall auf den Sensor ist von dieser verschieden und kann durch den Versuchsaufbau bedingt nicht als konstant angenommen werden. Um die Temperatur beim Aufprall zumindest annähernd vergleichbar zu halten wird der Pipettenspitze beim Aufziehen stets einige Zeit gelassen um die Wassertemperatur anzunehmen. Außerdem wird der Versuch zügig innerhalb von etwa 10 s ausgeführt, um das Abkühlen bzw. Erwärmen des Wassers durch die Umgebungsluft zu minimieren. Aufgrund der sehr kleinen Tropfengröße ist aber zu erwarten, dass während des Fallvorgangs ein nennenswerter Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfindet. Die gewonnenen Messergebnisse können also lediglich für eine qualitative Betrachtung herangezogen werden und eine Tendenz anzeigen.

Insbesondere bei 80 °C und 0 °C stellt das Ablösen des Tropfens von der Pipette ein Problem dar. Bei 0 °C, weil der Tropfen zu stabil ist und bei 80 °C weil er oft nicht als ein

Tropfen ablöst, sondern zum Zerfallen neigt. Es ist also davon auszugehen, dass die Tropfengröße auch durch die Temperatur beeinflusst wird, was auch plausibel erscheint. Aus Zeitgründen wird aber darauf verzichtet die Tropfenmasse für jede Temperaturstufe zu bestimmen. Weiterhin ist es für diese beiden Temperaturen besonders schwierig den Sensor mittig zu treffen, da sich die Pipettenspitze ein wenig verformt und auch die Flugbahn des Tropfens unruhig erscheint.

Die Umgebungstemperatur erhöht sich während der Versuchsdurchführung langsam von 23,7 °C auf 24,9 °C. Dabei liegt die Temperatur des Wassers bei Raumtemperatur mit 23,3 °C etwa 0,4 °C unter der Lufttemperatur, welcher die Temperatur der Sensoroberfläche und des Demonstrators zum Versuchsbeginn entspricht. Die weitere Temperaturentwicklung in Verlauf des Experimentes wurde nicht überprüft.

Zum Start der Messwertaufnahme wird wieder die Triggerfunktion des OnoSokki FFT-Analysegerätes verwendet. Das Triggerlevel wird für Temperaturen oberhalb der Raumtemperatur auf -5 % des Messbereiches gesetzt und für alle anderen auf 5 %. Unter der Annahme, dass die Anstiege der gemessenen Sensorausgangsspannung ähnlich verlaufen wird so eine zeitlich passende Aufzeichnung der Messwerte angestrebt.

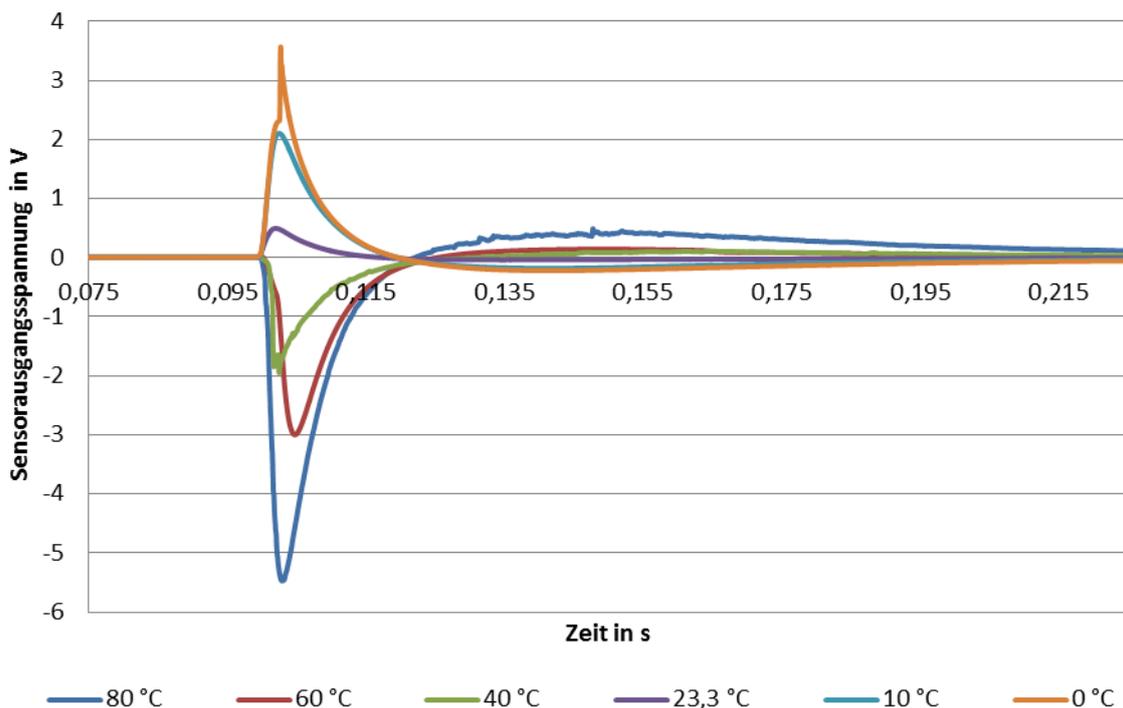


Abbildung 5-9: Zeitlicher Verlauf der Sensorausgangsspannung für den ebenen Sensor auf dem massiven Aluminiumblock ohne Hochpassfilter für unterschiedliche Wassertemperaturen.

Abbildung 5-9 zeigt die durchschnittlichen Sensorausgangsspannungen der jeweiligen Temperaturstufen im zeitlichen Verlauf. Der Zeitverlauf der Messreihen wurde so verschoben, dass der Tropfenaufprall für jede Temperatur gleichzeitig beginnt. Es fällt

sofort auf, dass die gemessene Sensorausgangsspannung für Temperaturen oberhalb der Raumtemperatur negativ ist und für alle anderen positiv.

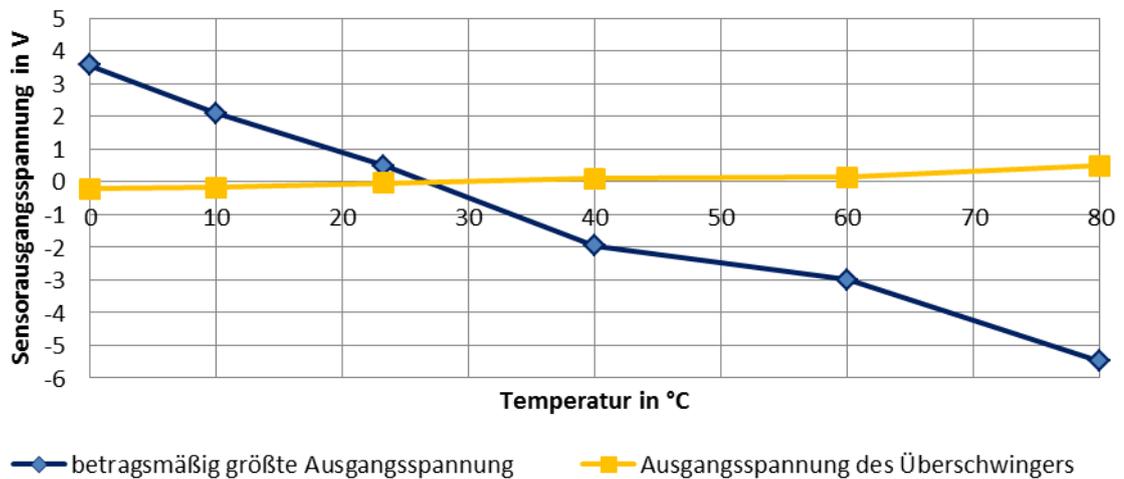


Abbildung 5-10: maximale elektrische Ausgangsspannung und Ausgangsspannung des Überschingers in Abhängigkeit von der Wassertemperatur

Der Betrag der Amplitude nimmt mit der Differenz zur Raumtemperatur rapide zu. Der Überschinger scheint an das Hauptsignal gebunden zu sein, da er sich proportional dazu jedoch mit entgegengesetztem Vorzeichen verhält.

Dieses Verhalten kann unmöglich durch die Impulskraft des aufprallenden Tropfens erklärt werden. Vielmehr wird daraus deutlich, dass die gemessene Sensorausgangsspannung in hohem Maße von der Temperaturdifferenz zwischen Tropfen und Sensoroberfläche abhängig ist. Das gemessene Signal ist damit nicht dem piezoelektrischen Effekt zuzuordnen, sondern maßgeblich dem pyroelektrischen Effekt. Mithilfe dieses Experiments kann keine Aufprallkraft ermittelt werden. Dies wird auch deutlich, wenn man die Tropfen aufprallkraft in erster Näherung mithilfe der Kraftstoßgleichung berechnet.

$$F_T = \frac{m_T * (k + 1)}{\Delta t} * \sqrt{2 * g * h} \quad (5-1)$$

Für einen vollständig unelastischen Stoß wird die Stoßzahl k zu Null da der Tropfen auf der Sensoroberfläche liegen bleibt. Mit der durch die Hochgeschwindigkeitsaufnahme bestimmten Aufprallzeit $\Delta t = 2,5 \text{ ms}$, der Tropfenmasse $m_T = 13,47 \text{ mg}$ ergibt sich für eine Fallhöhe von 89,7 cm

$$F_T = \frac{13,47 * 10^{-6} \text{ kg} * (0 + 1)}{2,5 * 10^{-3} \text{ s}} * \sqrt{2 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0,897 \text{ m}} = 0,0226 \text{ N} \quad (5-2)$$

Die berechnete Kraft stellt die theoretische Durchschnittskraft dar, ohne weiter auf Energieverluste einzugehen, die beispielsweise durch Reibung zu erwarten sind und die Impulskraft weiter mindern. Mit der vom Hersteller angegebenen Sensorempfindlichkeit in d_{33} von $13 \frac{mV}{N}$ ergibt sich damit eine durchschnittliche Sensorausgangsspannung U_q von nur

$$U_q = 0,013 \frac{V}{N} * 0,0226 N = 0,00029 V \quad (5-3)$$

Das aus dem Impuls zu erwartende Sensorsignal ist im Vergleich zu den aus den, offenbar aus dem pyroelektrischen Effekt, resultierenden Spannungen verschwindend klein. Der Sensor besitzt eine pyroelektrische Empfindlichkeit von $8 \frac{V}{K}$. Aus Glg.(5-3) folgt, dass eine Kraft von $615,38 N$ auf die Sensoroberfläche wirken muss, um dieselbe Ausgangsspannung durch den d_{33} -Effekt zu erzeugen.

Die in der Atmosphäre vorhandenen Wassertröpfchen sind mit maximal $50-100 \mu m$ deutlich kleiner, als der im Versuch verwendete Tropfen. Dafür wird er aber vom Flugzeug mit deutlich höherer Geschwindigkeit getroffen. Die Stoßzahl ist für solch hohe Geschwindigkeiten neu zu bewerten, daher wird für die Berechnung zur groben Abschätzung die obere Grenze verwendet. Nach Glg. (4-1) und (4-2) ergibt sich die Tropfenmasse zu

$$m = 1000 \frac{kg}{m^3} * \frac{4}{3} \pi * (100 * 10^{-6} m)^3 = 4,18 * 10^{-9} kg \quad (5-4)$$

Für eine Fluggeschwindigkeit von $250 \frac{m}{s}$ und eine angenommene Aufprallzeit von $1 ms$ ergibt sich damit ein Kraftstoß von

$$F_T = \frac{4,18 * 10^{-9} kg * (1 + 1)}{1 * 10^{-3} s} * 250 \frac{m}{s} = 0,00209 N \quad (5-5)$$

Die maximal zu erwartende Tropfenkraft ist also etwa um einen Faktor 10 kleiner. Diese abschätzende Rechnung birgt natürlich Ungenauigkeiten zeigt aber, dass im Flugbetrieb nur sehr kleine Sensorausgangsspannungen unter Verwendung des d_{33} -Effekts des Verwendeten oder ähnlichen Sensors zu erwarten sind.

Ein weiterer Focus dieser Versuchsreihe ist es das Frequenzspektrum des Tropfenaufralls zu untersuchen und so das in Abbildung 5-8 dargestellte Ergebnis des Tropfenaufrallversuchs mit und ohne Hochpassfilter zu bestätigen. Das Frequenzspektrum wird bei der Messung der Sensorausgangsspannung mithilfe des FFT-Analysegerätes mitgemessen und beim Speichern der Daten automatisch in einer separaten Datei abgelegt.

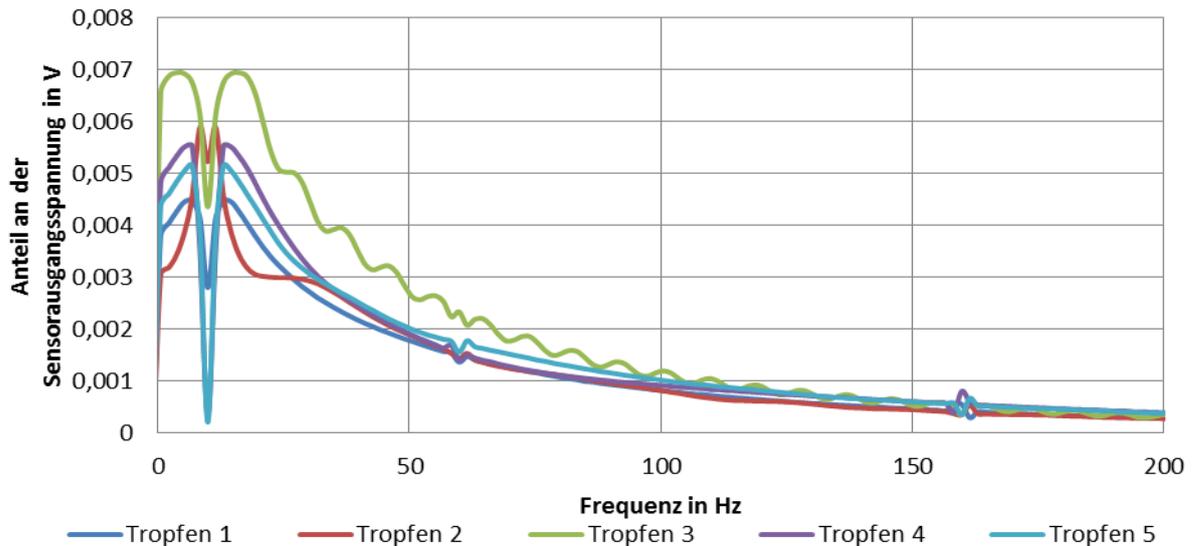


Abbildung 5-11: Ausschnitt der in der Sensorausgangsspannung enthaltenen Frequenzen und ihre Anteile für Tropfen mit Raumtemperatur

Für die Messreihe mit 23,3 °C warmem Wasser ergeben sich die in Abbildung 5-11 dargestellten Frequenzspektren. Dargestellt ist nur ein Ausschnitt, da die Spannungen für höhere Frequenzen gegen Null streben. Es ist gut zu sehen, dass durch Herausfiltern von Anteilen unter 100 Hz, wie in (Bulur, 2015) geschehen, ein Großteil des Sensorsignals verloren geht. Die Verwendung eines Filters ist daher für die Untersuchung des Tropfenaufpralls nicht zulässig.

5.4 Einfluss der Messausrüstung auf die gemessene Sensorausgangsspannung

Obwohl fest steht, dass die gemessene Ausgangsspannung für den Tropfenfallversuch nicht auf den piezoelektrischen Effekt zurückgeht, ist es dennoch von Interesse, warum das gemessene Sensorsignal, sowohl für den Versuch mit dem Impulshammer, als auch für den Tischtennisballversuch in (Bulur, 2015) nicht wie erwartet in die Nulllage zurückkehrt, sondern zunächst überschwingt. Diese beiden Versuche nutzen den piezoelektrischen Effekt und sollten daher vom Simulationsmodell im zeitlichen Verlauf abgebildet werden können.

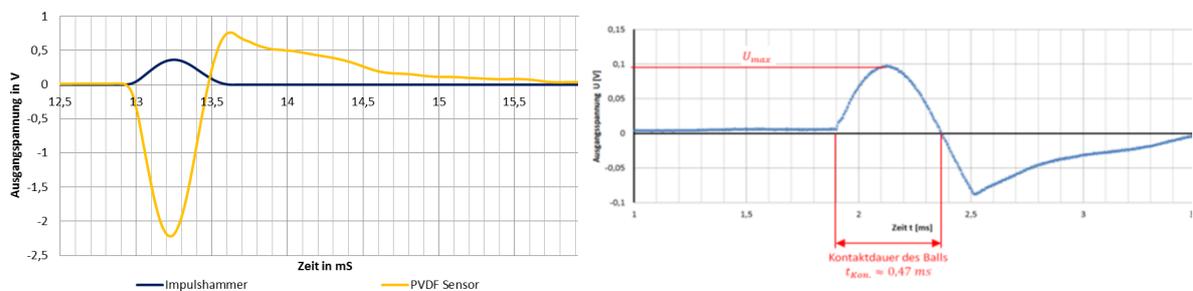


Abbildung 5-12: Zeitlicher Verlauf der gemessenen Sensorausgangsspannung aus dem Versuch mit Impulshammer (links) und dem Tischtennisballversuch in (Bulur, 2015)(rechts) vgl. Abbildung 5-3 und Abbildung 2-1

Der in Kapitel 0 berechnete zeitliche Verlauf fällt nach dem Impuls wieder auf das Ausgangsniveau zurück. Damit stehen die Simulationsergebnisse einerseits zwar im Widerspruch zu den experimentellen Daten vgl. Abbildung 5-12, die einen Überschwinger nach dem ersten Nulldurchlauf aufweisen. Andererseits erfüllen die Simulationsergebnisse aber die theoretische Erwartung, dass die Sensorausgangsspannung nach Ende der Krafteinwirkung sofort zu Null wird.

Da dieser Überschwinger auch im Tropfenfallversuch bei der Sensorausgangsspannung infolge des pyroelektrischen Effekts unabhängig von der Tropfentemperatur auftritt, liegt die Vermutung nahe, dass es sich hierbei nicht um einen phänomenologisch begründeten Effekt handelt sondern um einen systematischen Messfehler.

Daher werden alle Bestandteile der Messstrecke erneut kritisch betrachtet. Die Literatur (Measurement Specialities, Inc., 2008) liefert den entscheidenden Hinweis, dass der piezoelektrische Wandler als eine ideale Spannungsquelle betrachtet werden kann. Die Elektroden des Sensors bilden einen Kondensator der Kapazität C und der verwendete FFT-Analysegerät besitzt einen Widerstand R und ebenfalls eine Kapazität. Dadurch bildet die Messstrecke eine Reihenschaltung aus Kondensator und Widerstand was einem Hochpassfilter entspricht.

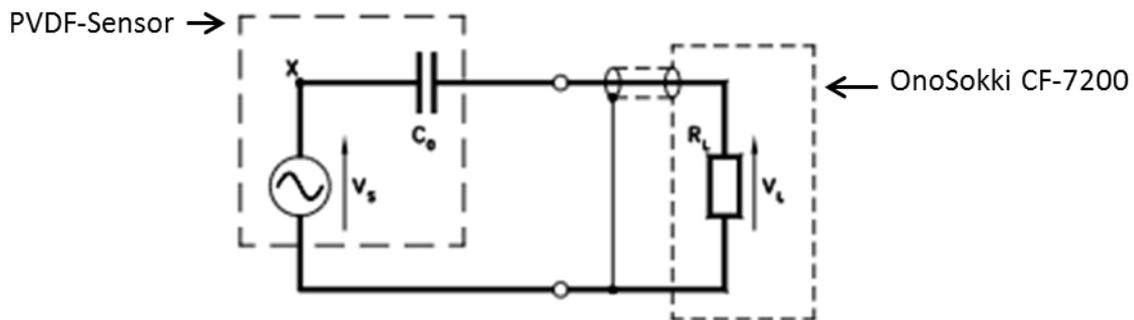


Abbildung 5-13: Ersatzschaltbild der Messstrecke für alle Versuche nach (Measurement Specialities, Inc., 2008)

Die untere Grenzfrequenz f_{gu} des HPF berechnet sich zu:

$$f_{gu} = \frac{1}{2 * \pi * R * C} \quad (5-6)$$

Um diesen Ansatz zu bestätigen, wird das Simulationsmodell des ebenen Sensors mit dem der Versuch mit dem Impulshammer aus Abschnitt 5.1 durchgeführt wurde, um einen Stromkreis erweitert. Dieser enthält vereinfachend nur einen Kondensator und einen Widerstand. Für den Stromkreis wird der Elementtyp CIRCU94 verwendet da er für die Kopplung mit piezoelektrischen Elementen geeignet ist und mit der entsprechenden Keyopt-Einstellung als Kondensator und als Widerstand verwendet werden kann. Die entsprechenden Eigenschaften, Kapazität und Widerstand, werden über sogenannte Real Constants zugewiesen

Einstellung	Kondensator	Widerstand
Elementtyp	CIRCU94	CIRCU94
Elementtypnummer	4	5
Keyopt 1	2	0
Keyopt 6	0	0
Real Constant	650 pF	1 MΩ

Tabelle 5-5: Einstellungen in APDL zur Definition der Messstreckenelemente

Die Kontaktierung des Stromkreises erfolgt über die Zuordnung der Endknoten zu den Komponenten „obere_elektrode“ und „untere_elektrode“. Dadurch ist zu jedem Zeitpunkt der Knotenfreiheitsgrad VOLT identisch mit der jeweiligen Elektrode. Über die bekannte Empfindlichkeit des Impulshammers wird aus der gemessenen Ausgangsspannung der Kraftverlauf des Impulses auf den PVDF-Sensor berechnet.

Dieser Kraftverlauf wird mithilfe der für den Tropfenaufprall entwickelten cosinusförmigen Kraftverteilung auf den Sensor aufgebracht. Als Kapazität wird vereinfachend die Herstellerangabe bei 1 kHz von 650 pF verwendet und als Widerstand der Eingangswiderstand des OnoSokki von 1 MΩ .

Damit ergibt sich eine untere Grenzfrequenz von:

$$f_{gu} = \frac{1}{2 * \pi * 1 * 10^6 \Omega * 650 * 10^{-12} F} = 244,85 \text{ Hz} \quad (5-7)$$

Die Frequenz- und Temperaturabhängigkeit der Kapazität des Kondensators werden ebenso, wie Kapazitäten aus den Kabeln und dem FFT-Analysegerät, vernachlässigt. Dasselbe gilt für Widerstände aus dem Kondensator und den Kabeln.

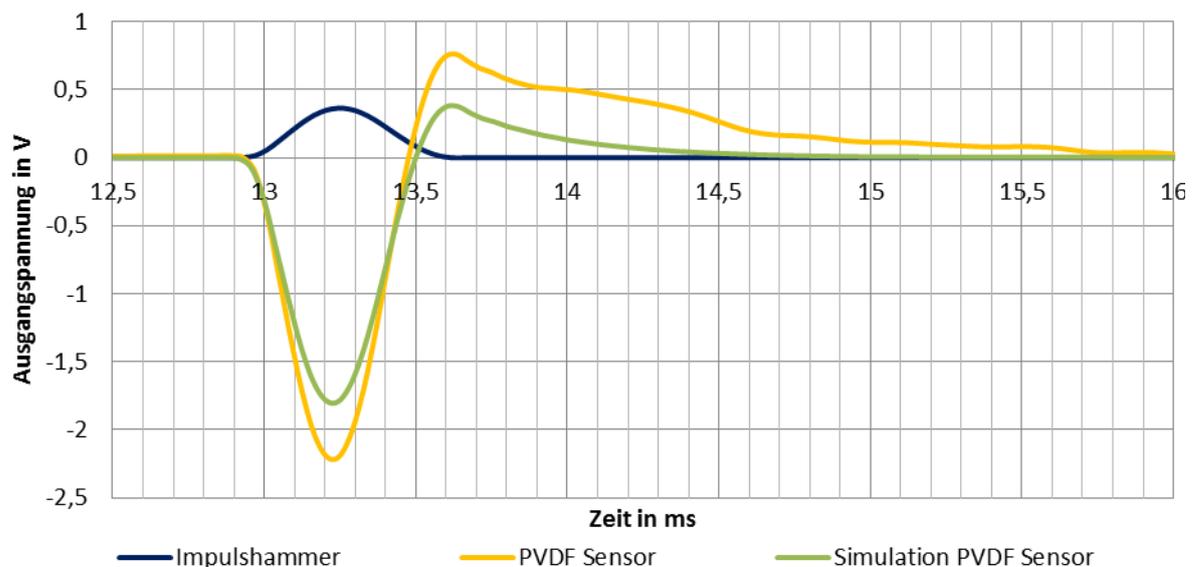


Abbildung 5-14: Zeitlicher Verlauf der gemessenen und der berechneten Ausgangsspannung des PVDF-Sensor im Vergleich zum gemessenen Verlauf der Ausgangsspannung des Impulshammers

Der berechnete zeitliche Verlauf zeigt eine gute qualitative Übereinstimmung mit dem gemessenen Verlauf. Die Amplitude fällt insgesamt kleiner aus, der Überschwinger sogar etwas mehr. Dabei muss berücksichtigt werden, dass weder die Kapazität noch der Widerstand dem realen Wert entsprechen. Zudem ist die Empfindlichkeit des PVDF-Sensors stark temperaturabhängig, und entspricht unter den, während des Versuchs herrschenden warmen Temperaturen, vermutlich nicht der in der Simulation berechneten Empfindlichkeit. Die zur Berechnung der Impulskraft verwendete Empfindlichkeit des Impulshammers beträgt $2,09 \frac{mV}{N}$ bei 25 °C, was in etwa der Versuchsumgebung entspricht. Für die für das Simulationsmodell verwendeten piezoelektrischen Konstanten und die Steifigkeitsmatrix ist keine Referenztemperatur bekannt. Es ist aber davon auszugehen, dass sie sich auf eine Temperatur um 20 °C beziehen.

Weiterhin wurde zur Krafterleitung die für den Tropfenaufrall entwickelte cosinusförmige Kraftverteilung verwendet. Bessere Ergebnisse sind zu erwarten, wenn stattdessen die Kunststoffspitze des Impulshammers modelliert wird und diese mit der vorgegebenen Kraft auf die Sensoroberfläche gedrückt werden würde. Aus Zeitgründen und weil es nicht zur Zielsetzung dieser Arbeit gehört, wird darauf verzichtet. Die qualitative Aussage wird dadurch nicht beeinträchtigt.

Durch diese Simulation kann also der systematische Messfehler korrekt abgebildet werden. Somit ist gezeigt, dass die Simulation gut geeignet ist, um die ideale Sensorausgangsspannung infolge einer Kraft zu ermitteln und darüber hinaus auch Einflüsse aus der Messstrecke zu berücksichtigen. Für weiterführende Experimente wird aber deutlich, dass die Messstrecke verbessert werden muss, um eine untere Grenzfrequenz nahe Null zu erreichen und somit die ungewollte Filtercharakteristik aus dem System zu entfernen. Dazu kann zum Beispiel der Eingangswiderstand im Messgerät vergrößert werden oder ein Sensor mit größerer Kapazität verwendet werden.

6 Zusammenfassung

Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse und Schlussfolgerungen der durchgeführten Simulationen und Experimente qualitativ zusammengefasst.

Es werden zwei Modelle entwickelt, die es ermöglichen auf Grundlage der experimentell ermittelten durchschnittlichen Tropfenkraft die tatsächliche räumliche Kraftverteilung besser anzunähern. Weiter wird, auf Grundlage von aus der Literatur entnommenen Kennwerten, für ein uniaxial gestrecktes PVDF ein Simulationsmodell des in (Bulur, 2015) verwendeten, eben auf einen massiven Aluminiumblock applizierten, PVDF-Sensors erstellt. Sowohl für die elliptische, als auch für die cosinusförmige Tropfenkraftverteilung, wird der Einfluss der Vernetzung auf die berechnete Sensorausgangsspannung untersucht. Die vom Simulationsmodell, unter Vorgabe der experimentell ermittelten durchschnittlichen Tropfenkräfte, berechneten Sensorausgangsspannungen geben die gemessenen relativ gut wieder, vgl. Abbildung 4-7. Aufgrund der geringeren Abweichung, wird die cosinusförmige Kraftverteilung für alle weiteren Simulationen verwendet. Die aus den entsprechenden Tropfenkräften berechneten Sensorausgangsspannungen treffen auch für die anderen Fallhöhen in

(Bulur, 2015) zu, vgl. Abbildung 4-9. Damit kann das Simulationsmodell als validiert betrachtet werden.

Für die Implementierung des PVDF-Sensors verwendete piezoelektrische Kraftkonstanten und die Steifigkeitsmatrix werden, bis auf die Konstante e_{33} , aus der Literatur recherchierte Werte verwendet. Da die Tropfenkraft in Richtung des d_{33} -Effekts wirkt, wird angenommen, dass dieser maßgeblich angesprochen wird. Um den Einfluss von eventuellen Abweichungen zu untersuchen, werden die Richtungsanteile der Sensorausgangsspannung und die dazu gehörigen Dehnungen in X-, Y- und Z-Richtung des Sensors berechnet. Dies wird auch für einen auf einem halbrohrförmigen Aluminiumprofil applizierten Sensor getan. Dabei beträgt die Blechdicke 0,5 bzw. 5 mm. Die Simulationen zeigen dabei, dass der d_{33} -Effekt isoliert angesprochen wird und Abweichungen bei allen anderen piezoelektrischen Konstanten toleriert werden können solange der Sensor auf einem steifen Substrat appliziert ist vgl. Tabelle 4-9. An diesen Profilmodellen wird auch der Einfluss eines dezentralen Treffers auf die Sensorausgangsspannung untersucht. Auch hier zeigen sich starke Abweichungen für das dünnwandige Profilmodell und nur geringe für das Dickwandige.

Der in (Bulur, 2015) ermittelte, zeitliche Verlauf der Sensorausgangsspannung kann durch eine transiente Simulation über 5 ms nicht berechnet werden. Da zunächst keine Ursachen für die deutlichen Abweichungen gefunden werden können, werden erneut Experimente durchgeführt um den Vorgang des Tropfenaufpralls im zeitlichen Verlauf der Sensorausgangsspannung besser nachvollziehen zu können.

Dazu wird der eben auf einem massiven Aluminiumblock applizierte Sensor mit einem Impulshammer angeregt und die Ausgangsspannungen von Impulshammer und PVDF-Sensor gleichzeitig aufgezeichnet vgl. Abbildung 5-3. Daraus wird deutlich, dass die bisherige Annahme über die Dauer des Tropfenaufpralls zu revidieren ist und der Aufprall deutlich länger andauert. Der Verlauf ähnelt dem Tischtennisballversuch in (Bulur, 2015) und das Überschwingen der Ausgangsspannung des PVDF-Sensors kann an dieser Stelle nicht erklärt werden.

Außerdem wird ein weiterer Tropfenfallversuch auf das Profilmodell mit außen appliziertem Sensor durchgeführt und mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen. Dabei werden einige sehr wichtige Beobachtungen gemacht. Es wird festgestellt, dass in (Bulur, 2015) das Messsignal, durch Verwendung eines 100 Hz Hochpassfilters, massiv verändert wurde und der zeitliche Verlauf und die Charakteristik der Sensorausgangsspannung anders ist, als bis dahin angenommen. Die dabei gemessenen Sensorausgangsspannungen fallen rund 15 bis 20-fach höher aus, obwohl die Versuchsparameter in etwa vergleichbar sind. Dies trifft auch auf die Referenzmessung mit dem 100 Hz HPF zu und kann zunächst nicht plausibel erklärt werden.

Der Vergleich der Hochgeschwindigkeitsaufnahme mit der zeitgleich aufgezeichneten Sensorausgangsspannung zeigt, dass etwa $1/3$ der maximalen Sensorausgangsspannung erzeugt wird, nachdem der Tropfen bereits völlig aufgeprallt ist und nur noch eine geringe kinetische Restenergie vorhanden sein kann. Dies erscheint unter Gesichtspunkten der Energiebilanz nicht plausibel, kann aber auch nicht ausgeschlossen werden, da die Vorgänge im Inneren des Tropfens komplex und

unbekannt sind. Weiterhin wirft das Überschwingen des Sensorausgangssignals ebenso Fragen auf, wie das im Vergleich zum Experiment mit dem Impulshammer unterschiedliche zeitliche Zusammenspiel von Sensorausgangsspannung und Impuls. Um die gemessenen Ausgangsspannungen zu bestätigen und mit denen in (Bulur, 2015) ermittelten vergleichbar zu machen, wird der Tropfenfallversuch auf den ebenen Sensor unter sehr ähnlichen Bedingungen wiederholt.

Da der Verdacht besteht, dass zusätzlich zum piezoelektrischen Effekt der pyroelektrische Effekt für die als fragwürdig zu beurteilenden Verläufe der Sensorausgangsspannung verantwortlich ist, wird dieser Versuch mit verschiedenen Wassertemperaturen oberhalb und unterhalb der Raumtemperatur durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen eindeutig eine sehr starke Abhängigkeit zwischen Sensorausgangsspannung und Tropfentemperatur, vgl. Abbildung 5-9. Dies führt zu dem Schluss, dass die gemessene Sensorausgangsspannung maßgeblich auf den pyroelektrischen Effekt zurückzuführen ist und nur einen sehr geringen Anteil aus dem piezoelektrischen Effekt aufweist. Um das zu bestätigen, wird die theoretische Tropfenaufprallkraft aus der Fallhöhe und der Tropfenmasse mithilfe der Kraftstoßgleichung ermittelt. Das Ergebnis stützt die getroffene Schlussfolgerung, da die berechnete Kraft etwa 0,2 %, der in (Bulur, 2015) aus den Sensorausgangsspannungen berechneten Kraft beträgt.

Die Gültigkeit der Validierung des Sensormodells, mithilfe der falsch berechneten Tropfenkräfte, bleibt davon jedoch unberührt. Die Tropfenkräfte wurden mit der piezoelektrischen Empfindlichkeit des Sensors aus den gemessenen Sensorausgangsspannungen ermittelt. Da das Simulationsmodell aus diesen Kräften die gemessenen Spannungen berechnet, ist gezeigt, dass das implementierte Modell dieselbe Empfindlichkeit besitzt und somit den Sensoreffekt in d_{33} Richtung korrekt simuliert.

Der von den Experimenten unterschiedliche zeitliche Verlauf der Sensorausgangsspannung in der Simulation wird in Kapitel 5.4 erneut betrachtet. Das Simulationsmodell wird dazu um einen Stromkreis erweitert, der die Kapazität des Sensors und den Eingangswiderstand des verwendeten Messgerätes in Reihenschaltung berücksichtigt. Als Kraftvorgabe wird die Sensorausgangsspannung des Impulshammers mithilfe seiner bekannten Empfindlichkeit umgerechnet und an die Simulation übergeben. Der damit berechnete zeitliche Verlauf der Sensorausgangsspannung stimmt gut mit dem experimentell ermittelten überein, vgl. Abbildung 5-14. Abweichungen in der Amplitude können den für die Simulation vorgenommenen Vereinfachungen und der von der Simulation abweichenden Umgebungstemperatur zugeordnet werden. Anzumerken ist zu diesem Ergebnis, dass die Simulation somit ebenfalls einen systematischen Messfehler aufgrund der Hochpassfiltercharakteristik der Messstrecke mit simuliert. Dieser muss für weitere Versuche beseitigt werden.

7 Ausblick

Im Verlauf dieser Arbeit wurde deutlich, dass die gemessene Sensorausgangsspannung, in der in (Bulur, 2015) verwendeten Versuchsanordnung, keine Rückschlüsse auf die Tropfenauflprallkraft zulässt. Die gemessene Sensorausgangsspannung wird dabei durch den pyroelektrischen Effekt dominiert. Es ergeben sich daraus zwei verschiedene Ansätze, wie PVDF trotzdem zur Indikation von Wassertröpfchen in der durchflogenen Atmosphäre verwendet werden kann.

Zum einen kann durch Isolation des Sensors und Korrekturrechnen der Messwerte versucht werden den Einfluss des pyroelektrischen Effekts zu unterdrücken. Dabei muss aber zusätzlich die Empfindlichkeit des Sensors erhöht werden. Dies könnte bei Ausnutzung des d_{33} -Effekts durch einen dickeren Sensor mit kleinerer Oberfläche geschehen. Durch Verwenden einer dickeren PVDF-Folie verringert sich die Kapazität des Sensors und die gemessene Ausgangsspannung steigt. Eine Verkleinerung der Sensorfläche senkt ebenfalls die Kapazität des Sensors. Durch Kombination beider Maßnahmen ließe sich leicht eine Steigerung der, infolge der Tropfenauflprallkraft gemessenen Sensorausgangsspannung um einen Faktor 10 oder mehr erreichen. Eine weitere Möglichkeit besteht darin eine Anordnung zu finden, die den deutlich empfindlicheren d_{31} -Effekt anstelle des d_{33} -Effekts verwendet. Um dies zu erreichen, muss die Tropfenauflprallkraft so auf den Sensor übertragen werden, dass dieser in Sensor-X-Richtung gedehnt wird. Hierfür ist eine Vielzahl von Anordnungen denkbar. Mithilfe einer entsprechenden Mimik kann die Tropfenkraft idealerweise Verstärkt werden bevor sie auf in den Sensor eingeleitet wird. Das scheint sowohl unter Ausnutzung des d_{33} –Effekts als auch des d_{31} -Effekts vielversprechend. Die Sensorfläche kann für die Ausnutzung des d_{33} -Effekts so unabhängig von der Tropfenauflprallfläche sehr klein gestaltet werden. Als weiterer Vorteil kann diese Mimik dazu genutzt werden den piezoelektrischen Effekt vor pyroelektrischen Einflüssen abzuschirmen.

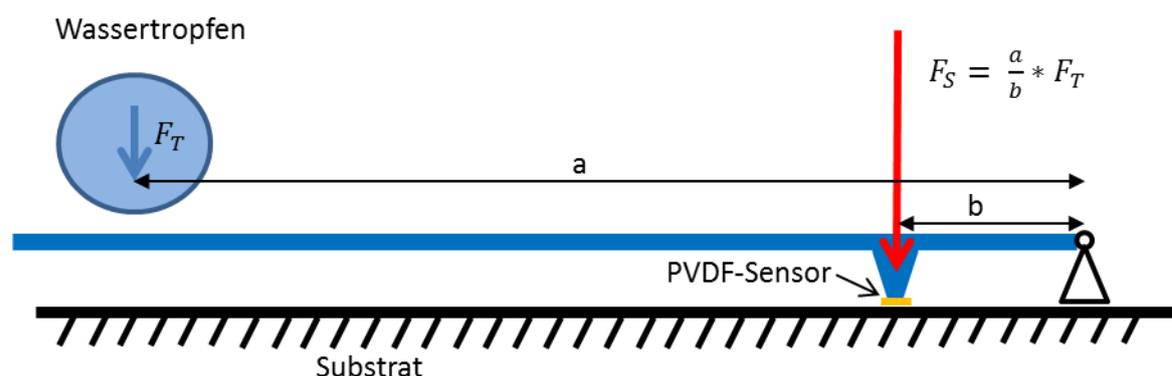


Abbildung 7-1: Prinzipskizze einer einfachen Mimik, zur räumlichen und thermischen Trennung von Wassertropfen und PVDF-Sensor, gleichzeitigen Verstärkung der Tropfenkraft sowie Steigerung der Sensorausgangsspannung durch Verringerung der Sensorfläche und Erhöhung der Sensordicke

Nimmt man für die in Abbildung 7-1 dargestellte Mimik an, dass $a = 10 * b$ ist, die Sensorfläche A_E von 12 mm x 30 mm auf 2 mm x 2 mm verringert wird und die

Sensordicke d verdoppelt wird, ergibt sich nach Gleichung (3-10) eine Verstärkung der gemessenen Sensorausgangsspannung das 1800-Fache.

$$\frac{U_{Mimik}}{U_{direkt}} = \frac{\frac{2 * d}{\varepsilon_0 * \varepsilon_r * \frac{A_E}{90}} * d_{33} * 10 * F_Z}{\frac{d}{\varepsilon_0 * \varepsilon_r * A_E} * d_{33} * F_Z} = 1800 \quad (7-1)$$

Zum anderen erscheint es auf Grund der hohen pyroelektrischen Empfindlichkeit des verwendeten PVDF-Sensors vielversprechend zu untersuchen, ob dieser Effekt vorteilhaft ausgenutzt werden kann. Dazu erscheint es sinnvoll, zunächst den Effekt und die Einflussparameter genau zu recherchieren und durch entsprechende Experimente und Simulationen zu überprüfen.

8 Anhang

	PVDF (DT1 052K von MEAS)	PVDF ⁹		
Dichte kg/m^3	1780			
Relative Permittivität (Annahme: Gilt für alle Raumrichtungen)	12,5			
E – Modul $+ 10^9 N/m^2$	3		2,6	
Piezoeletrische Ladungskonstanten $+ 10^{-10} C/N$	$d_{31} = 0,23$ $d_{33} = -0,33$	$d_{31} = 0,214$ $d_{33} = 0,023$ $d_{33} = -0,333$		
Piezoelektrische Kraftkonstante N/V		$e_{31} = 0,011$ $e_{32} = -0,007$ $e_{31} = -0,059$		
Elastische Koeffizienten $+ 10^{10} N/V$		0,702 0,382 0,443	0,382 0,488 0,301	0,443 0,301 0,482

Tabelle 8-1: Eigenschaften des simulierten PVDF (Bulur, 2015) (Keppler & Anderson, 1978)

Table 1 Piezoelectric, Pyroelectric, and Thermal Expansion Coefficients and Mechanical Properties of PVDF Thin Films

Material property	Coefficient	Biaxially oriented film	Uniaxially oriented film
Piezoelectric coefficients (pC/N)	d_{31}	4.34	21.4
	d_{32}	4.36	2.3
	d_{33}	-12.4	-31.5
	d_h	-4.8	-9.6
	d_{33}^*	-13.5	-33.3
Pyroelectric coefficients (10^{-5} C/m ² K)	p_3	-1.25	-2.74
	p_3^* (calculated)	-0.44	-1.48
Thermal expansion coefficients (10^{-4} K ⁻¹)	α_1	1.24	0.13
	α_2	1.00	1.45
Mechanical properties	E (10^9 Pa)	2.5	2.5
	K (10^{-10} Pa ⁻¹)	2.6	2.6
	ν	0.392	0.392
	s_{11} (10^{-10} Pa ⁻¹)	4.0	4.0
	s_{12} (10^{-10} Pa ⁻¹)	-1.57	-1.57
	c_{11} (10^9 Pa)	5.04	5.04
	c_{12} (10^9 Pa)	3.25	3.25

*Calculated from the hydrostatic piezoelectric coefficients d_{31} and d_{32} .

Source: From Ref. 81.

Ref 81:

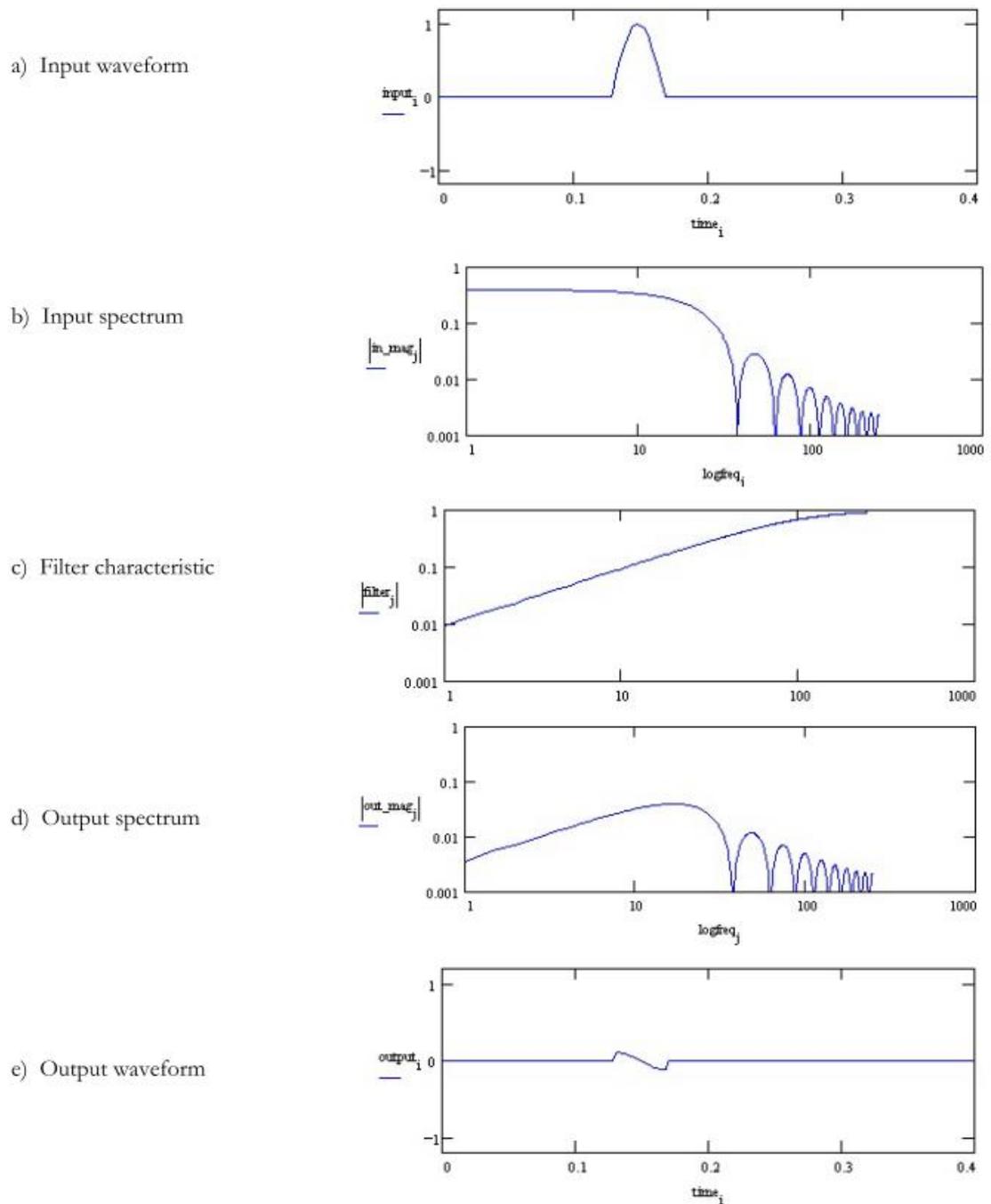
R.G. Kepler, R. A Anderson; Piezoelectricity and Pyroelectricity in poly(vinylidene fluoride); J. Appl. Phys., 49:4490 (1978)

Tabelle 8-2: Eigenschaften von biaxial und uniaxial gerecktem PVDF (Nalwa)

Titel	Quelle
FEM für Praktiker Band 1: Grundlagen	(Müller & Groth, 2007)
FEM für Praktiker Band 2: Strukturdynamik	(Stelzmann, et al., 2008)
FEM für Praktiker Band 3: Temperaturfelder	(Groth & Müller, 2009)
FEM für Praktiker Band 4: Elektrotechnik	(Schätzig & Müller, 2003)
FEM für Praktiker Band 5: Nichtlinearitäten	

Tabelle 8-3: Titel und Quellen der Buchreihe FEM für Praktiker

Figure 21. Effect of R-C filter on Slow Half-Sine Transient input waveform



Page 2

Abbildung 8-1: Einfluss der R-C Filtercharakteristik eines PVDF Foliensensors auf ein halb-sinusförmiges Signal aus (Measurement Specialties, Inc., 2008)

Figure 22. Effect of R-C filter on Slow Sawtooth Transient input waveform

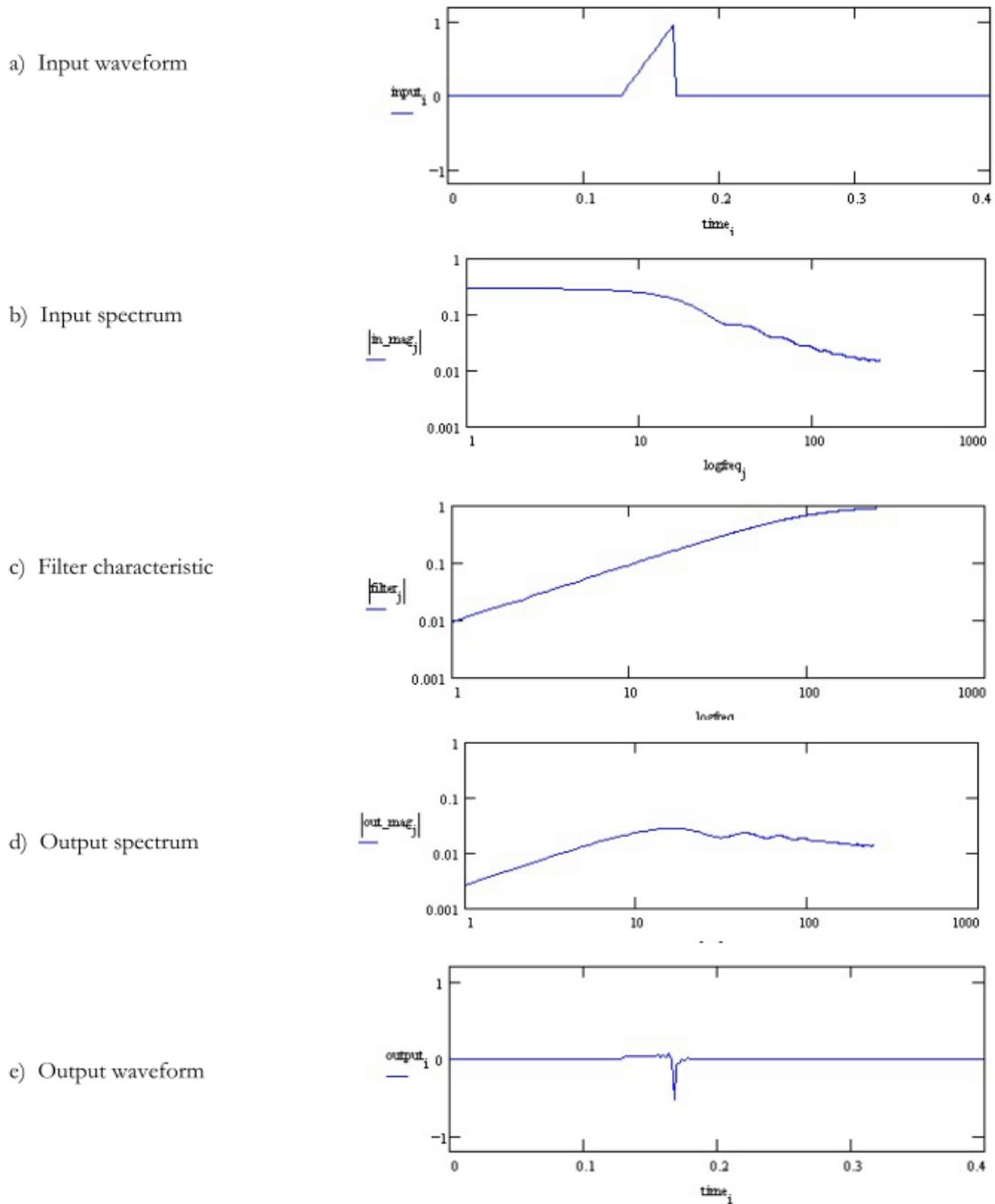


Abbildung 8-2: Einfluss der R-C Filtercharakteristik eines PVDF Foliensensors auf ein sägezahn-förmiges Signal aus (Measurement Specialties, Inc., 2008)

APPLICATIONS OF PIEZO FILM

COMPUTER INPUT/OUTPUT

Keypad arrays

Digitizer
Air Mouse
Joystick
Pen (Signature verification; Handwriting Recognition)

Printers

Impact Flight Time
Ink Drop Generation and Detection
Toner and Ink Jet Level
Toner Activation

Business Equipment

Antitamper for ATM Machine
Coin Counters
Copiers
Switches
Paper Path Switches
Toner Level and Activation

Disc Drives

Shock Sensing Accelerometers

INDUSTRIAL

Switches

Solid State Momentary
Snap Action
Cantilever Beam
Keypad
Vandal-Proof
Intrinsically Safe
CMOS Wake-up
Low-Deflection
Singing Switch (a.c. switch)
Coin Counter
Acoustic Switch
Shaft Rotation Counter

Robotics

Tactile Sensor
Micropositioner
Safety Mats & Switches
Bumper Impact

Physical Security & Energy Management

Glass Break Detectors
Floor/Mat Sensor
Penetration Detection
Contact Microphone
Piezo Cable Perimeter Protection
Pyrometer/Flame Sensor

Flow/Level

Vortex
Fluidic Oscillator
Air Flow
Doppler Ultrasound
Solid State Fluid Level
Laminar/Turbulent Boundary Layer
Fan Failure

INSTRUMENTATION

Machine Health Monitor

Accelerometers
Contact Microphones
Hi-Strain Dynamic Strain Gages

Weather Sensors

Rain Intensity
Hail Detection
Wind Velocity

Active Vibration Damping

Strain Gages Sensor Arrays
Actuator Arrays

Non Destructive Engineering

Flexible Contact NDT Probes
NDT Arrays
Acoustic Emission Sensors

Air Ranging Ultrasound

Safety
Distance

Adaptive Optics

Fiber Optic Shutters/Modulators
Deformable Mirrors
Laser Scanners

Oil Exploration

Hydrophones
Seismic Geophones

<p><u>MEDICAL</u></p> <p><i>Diagnostics</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Apnea Monitor Ambulatory/Gait Monitors Blood Pressure Cuff Pulse Counter Stethoscope Sleep Disorder Monitors Respiratory Air Flow Isokinetics Patient Bed Monitor <p><i>Ultrasound</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Near Field Imaging Prostate Transdermal Transluminal Coronary Arterial Breast Lithotripter Hydrophone Calibration Probes <p><i>Handicapped Aides</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Switches Braille Reader Hearing Aid Speech Intensification <p><i>Implantables</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Pacemaker Activity Monitor Implantable Switch Vascular Graft Monitor Micropower Source <p><i>Instrumentation</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Intravenous Drop Counter IV Air Bubble Detection Laser Switch/Modulator <p><u>AUTOMOTIVE</u></p> <ul style="list-style-type: none"> Accelerometers Occupancy Seat Sensor <p><i>Switches</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Passenger Compartment Switches Horn Switch Control Panel <p><i>Fuel Level, Tire Rotation, Security</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Keyless Entry Motion (Theft) Sensor 	<p><u>CONSUMER</u></p> <p><i>Musical Instruments</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Piano Keys Pick-up Drum Trigger <p><i>Sports Equipment</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Target Location Reaction Time Foul Line Force (Karate, Impact) Sweet Spot <p><i>Toys/Games</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Switches Proximity (Air Ranging Ultrasound, Pyro) Novelty Speakers (Microphones) Target Scoring <p><i>Audio</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Tweeter Balloon Speakers Novelty Speakers (Visor, Poster) Microphone Speaker distortion Feedback Accelerometer <p><i>Appliance</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Washer Imbalance Vacuum Soil Sensing Dishwasher Spray Arm Level Sensing Switches <p><u>MILITARY/GOVERNMENT</u></p> <p><i>Hydrophones</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Towed Cable Array Hull Mounted Arrays Sonobuoys Active Noise Suppression <p><i>Ballistics</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Safety and Arming Fuses Shock Wave Gages Seismic Accelerometers <p><i>Physical Security</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Perimeter Security Cable (Buried or Fence) Seismic/Geophones Covert Microphones <p><i>Traffic Sensors</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Vehicle Classification Weight-In-Motion Speed, Red Light Enforcement Lane Designation Toll Booth
---	--

Tabelle 8-4: Anwendungsbereiche von PVDF Foliensensoren (Measurment Specialities, Inc., 2008)

Table 1. Typical properties of piezo film

Symbol	Parameter		PVDF	Units
t	Thickness		9, 28, 52, 110	μm (micron, 10^{-6})
d ₃₁	Piezo Strain Constant		23	$10^{-12} \frac{\text{m/m}}{\text{V/m}}$ or $\frac{\text{C/m}^2}{\text{N/m}^2}$
d ₃₃			-33	
g ₃₁	Piezo Stress constant		216	$10^{-3} \frac{\text{V/m}}{\text{N/m}^2}$ or $\frac{\text{m/m}}{\text{C/m}^2}$
g ₃₃			-330	
k ₃₁	Electromechanical Coupling Factor		12%	
k _t			14%	
C	Capacitance		380 for 28 μm	pF/cm ² @ 1KHz
Y	Young's Modulus		2-4	10^9 N/m^2
V ₀	Speed of Sound	stretch:	1.5	10^3 m/s
		thickness:	2.2	
p	Pyroelectric Coefficient		30	$10^{-6} \text{ C/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$
ϵ	Permittivity		106-113	10^{-12} F/m
ϵ/ϵ_0	Relative Permittivity		12-13	
ρ_m	Mass Density		1.78	10^3 kg/m
ρ_e	Volume Resistivity		$>10^{13}$	Ohm meters
R _□	Surface Metallization Resistivity		<3.0	Ohms/square for NiCu
R _□			0.1	Ohms/square for Ag Ink
tan δ_e	Loss Tangent		0.02	@ 1KHz
	Yield Strength		45-55	10^6 N/m^2 (stretch axis)
	Temperature Range		-40 to 80...100	$^\circ\text{C}$
	Water Absorption		<0.02	% H ₂ O
	Maximum Operating Voltage		750 (30)	V/mil(V/ μm), DC, @ 25 $^\circ\text{C}$
	Breakdown Voltage		2000 (80)	V/mil(V/ μm), DC, @ 25 $^\circ\text{C}$

Table 2. Comparison of piezoelectric materials

Property	Units	PVDF Film	PZT	BaTiO ₃
Density	10 ³ kg/m ³	1.78	7.5	5.7
Relative Permittivity	ϵ/ϵ_0	12	1,200	1,700
d_{31} Constant	(10 ⁻¹²)C/N	23	110	78
g_{31} Constant	(10 ⁻³)Vm/N	216	10	5
k_{31} Constant	% at 1 KHz	12	30	21
Acoustic Impedance	(10 ⁶)kg/m ² -sec.	2.7	30	30

OPERATING PROPERTIES FOR A TYPICAL PIEZO FILM ELEMENT

The DT1 element is a standard piezo film configuration consisting of a 12x30 mm active area printed with silver ink electrodes on both surfaces of a 15x40 mm die-cut piezo polymer substrate.

1. Electro-Mechanical Conversion

(1 direction) 23 x 10⁻¹²m/V, 700 x 10⁻⁶N/V
 (3 direction) -33 x 10⁻¹²m/V

2. Mechano-Electrical Conversion

(1 direction) 12 x 10⁻³V per microstrain, 400 x 10⁻³V/ μ m, 14.4V/N
 (3 direction) 13 x 10⁻³V/N

3. Pyro-Electrical Conversion

8V/ $^{\circ}$ K (@ 25 $^{\circ}$ C)

4. Capacitance

1.36 x 10⁻⁹F; Dissipation Factor of 0.018 @ 10 KHz; Impedance of 12 K Ω @ 10 KHz

5. Maximum Operating Voltage

DC: 280 V (yields 7 μ m displacement in 1 direction)
 AC: 840 V (yields 21 μ m displacement in 1 direction)

6. Maximum Applied Force (at break, 1 direction)

6-9 kgF (yields voltage output of 830 to 1275 V)

Tabelle 8-5: Auszug aus dem Datenblatt des Sensorherstellers (Measurement Specialities, Inc., 2008)

Befehl	Kommentar
cmsel,s,Aufprallfläche,node	!select nodes of component "Aufprallfläche"
*get,nnumber,node,0,count nnode=0	!count nodes
csys,1	!cylindrical koordinate system
*do,n,1,nnumber,1	!loop over nodes
*get,nnode,node,0,nxth,	!get next highest number of selected nodes
*get,dist,node,nnode,loc,x	!get distance to center of impact area
f,nnode,fz,(0.5*pi*(-tropfenkraft)*cos((dist*pi)/(2*rt)))/nnumber	!apply cosine force
f,nnode,fz,4*(-tropfenkraft)/pi*(sqrt(1-((dist*dist)/(rt*rt))))/nnumber	!apply elliptic force distribution
nsel,u,node,,nnode	!unselect current node from set
*enddo	!exit do loop
csys,0	!cartesian koordinate system
allsel,all	!select everything

Tabelle 8-6: Kraftübergaberoutine des Simulationsprogramm mit beiden Kraftverläufen

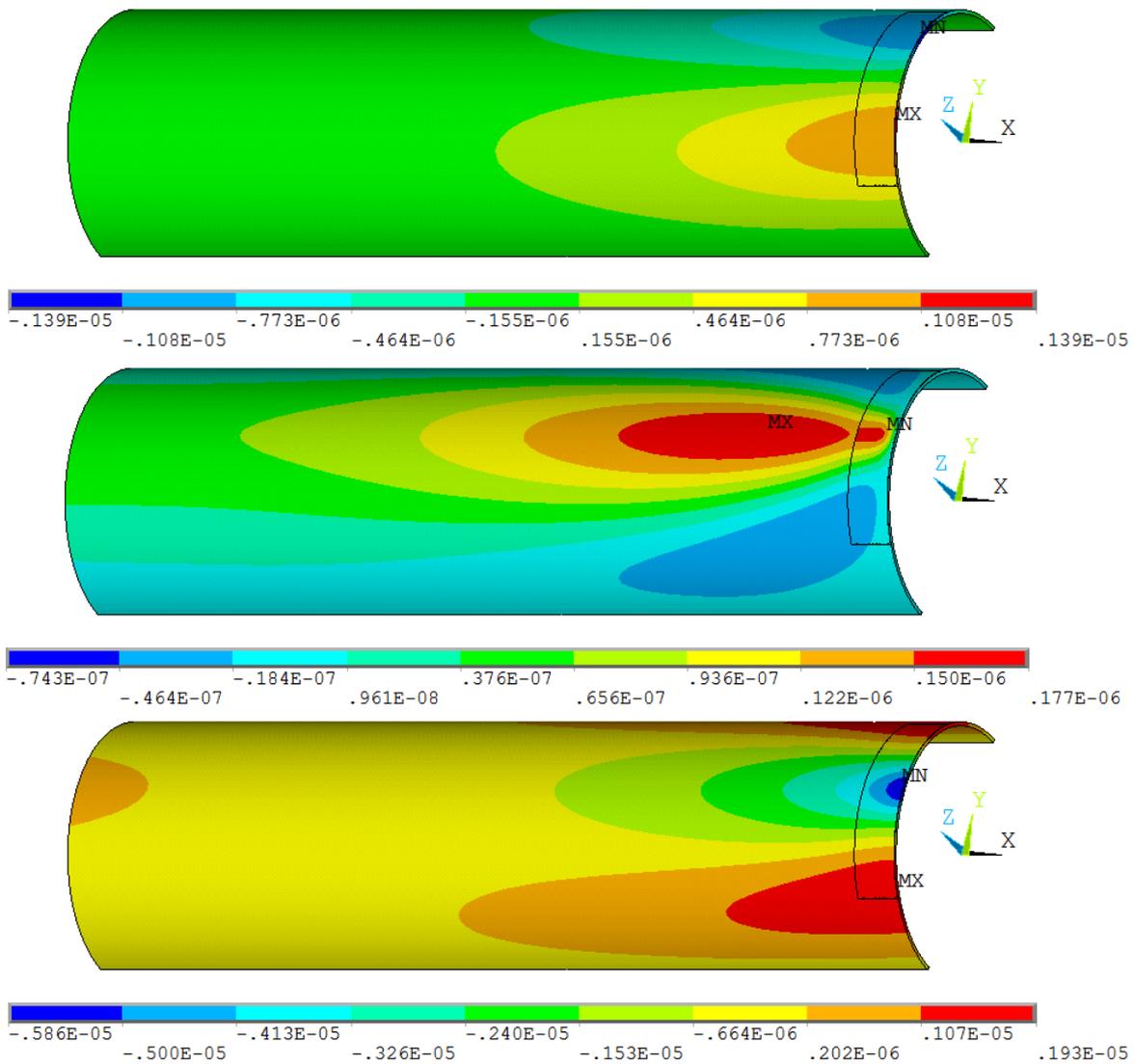


Abbildung 8-3: Zeigt die maximalen Verschiebungen der Profiloberseite und des Sensors in Sensor X-, Y- und Z-Richtung (von oben nach unten) für das dünnwandige Profilmodell im Halbschnitt

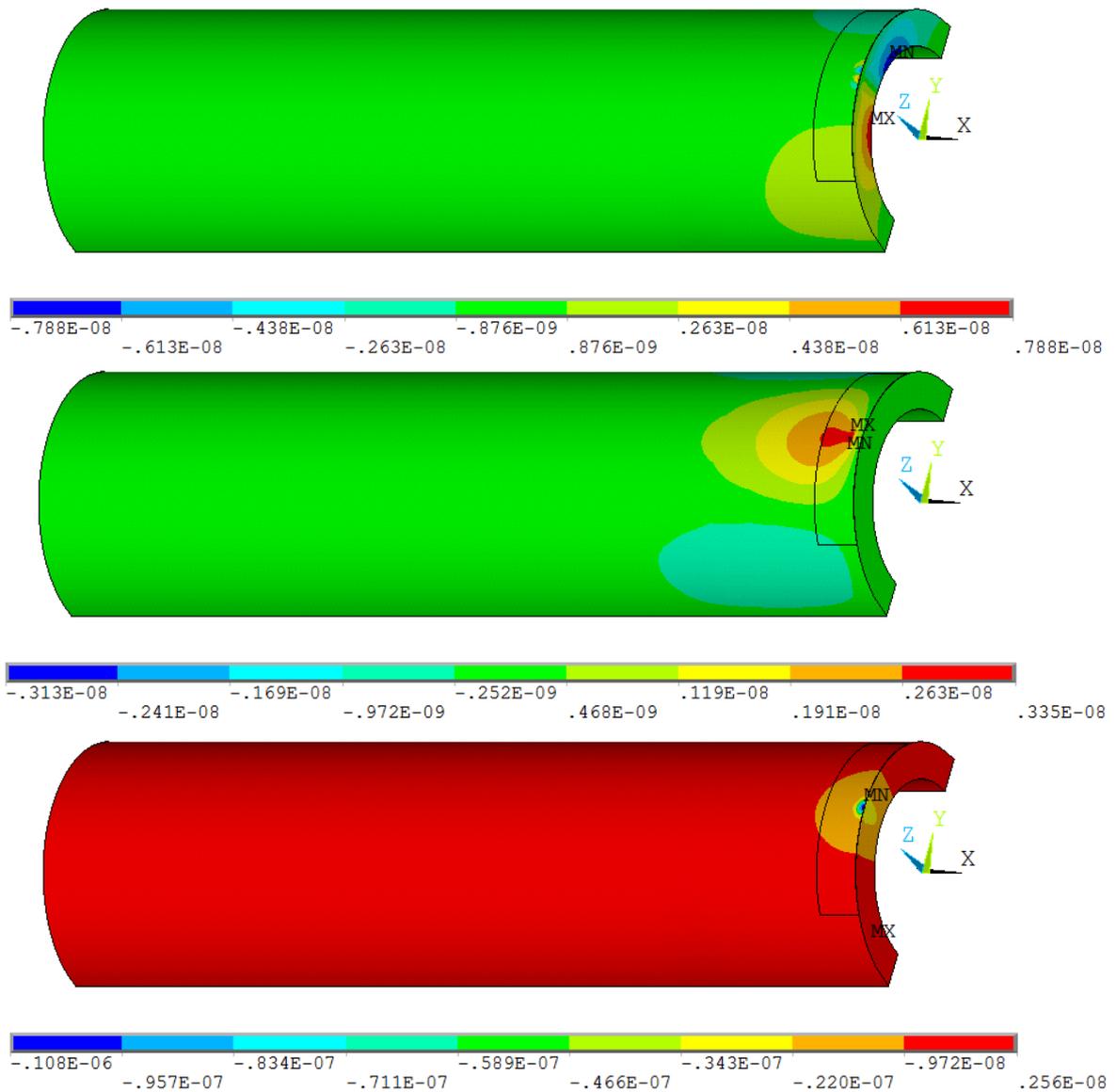


Abbildung 8-4: Zeigt die maximalen Verschiebungen der Profilloberseite und des Sensors in Sensor X-, Y- und Z-Richtung (von oben nach unten) für das dickwandige Profilmodell im Halbschnitt

Item	Description	Qty	Description
-8206-002-	Impact Hammer, 2.3 mV/N, cable included		
DB-3996---	✓ Head extender (40 grams) for impact hammer Type 8206	1	
JP-0145---	✓ Adaptor BNC (M) to 10-32 UNF (F)	1	

Briel & Kjaer

Packing Note

Page 9 / 11

Item	Description	Qty	Description
AO-0531-D-050-	✓ Cable single screen coax, 10-32 UNF (M) to BNC (M), 5m (16.7ft), max. +70°C (158°F)	1	
DB-3991-001-	✓ Aluminum impact tip for impact hammers	1	
DB-3991-002-	✓ Plastic impact tip for impact hammers	1	
DB-3991-003-	✓ Soft Plastic impact tip for impact hammers	1	

Calibration Chart for Impact Hammer Type 8206-002

Serial No.: 57331

Reference Sensitivity: 25.2 ± 0.2 mV/N

Measuring Range: Full Scale at $\pm 5V$

Linear Error at Full Scale: $\leq \pm 1\%$

Polarity of the electrical signal is positive for compression.

Briel & Kjaer



This calibration is obtained on Briel & Kjaer Calibration System, Serial No. 151217. J. and is traceable to the National Institute of Standards and Technology, USA and the International Bureau of Weights and Measures, France. The expanded uncertainty is 1.0% (k=2) determined in accordance with IEC 60770. This certificate is a copy of the original certificate of calibration.

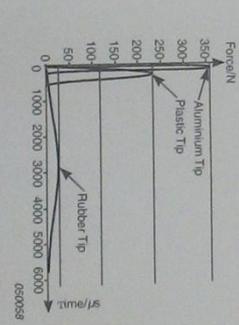
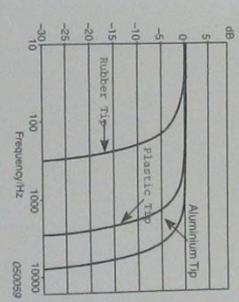
Electrical:

Bias Voltage: at full temperature and current range: +7 to +11V

Power Supply Requirements: Constant Current: +2 to +20 mA

Unloaded Supply Voltage: +18V to +30V

Output Impedance: $< 100 \Omega$



Environmental:

Temperature Range: -73 to +80°C

Maximum Force (Non-Destructive): 4448 N

Mechanical:

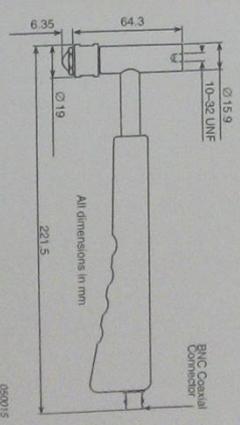
Impact Tip Material: Aluminum, Plastic, Rubber

Sensor Housing Material: Stainless Steel

Effective Seismic Mass: 100 gram

Seismic Mass of Head Extender: 40 gram

Electrical Connector: BNC



Date: 15. apr. 2013, 15:45 Operator: KJW

Specifications obtained in accordance with ANSI S2.11-1989 and parts of ISO 5447

All values are typical at 25°C (77°F) unless measurement uncertainty is specified.

Serial No.: 57331

050015

Abbildung 8-5: Datenblatt Brüel& Kjaer 8206-002

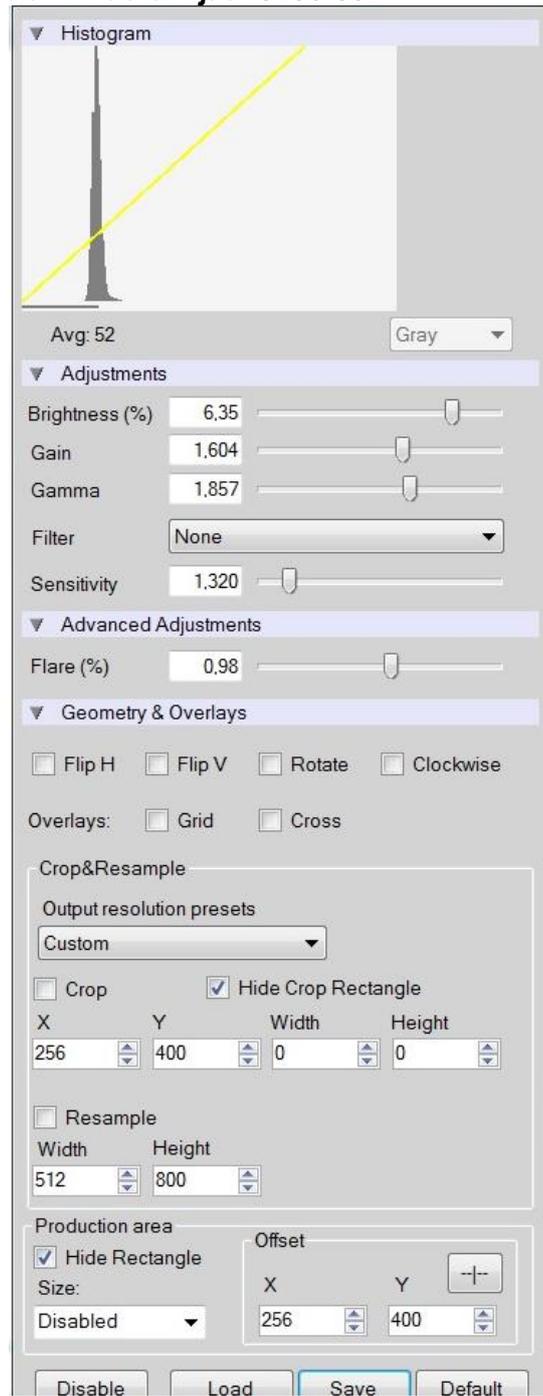


Abbildung 8-6: Bildkorrektureinstellungen im Steuerungsprogramm der Hochgeschwindigkeitskamera Phantom V611

Tropfen Nr.	Masse in mg
1	12,8
2	10,75*
3	10,65*
4	13,58
5	13,74
6	11,06*
7	11,56*
8	13,12
9	13,87
10	13,73
Durchschnitt	13,47 (mit * 12,49)
Standardabweichung	0,38 (mit* 1,6)

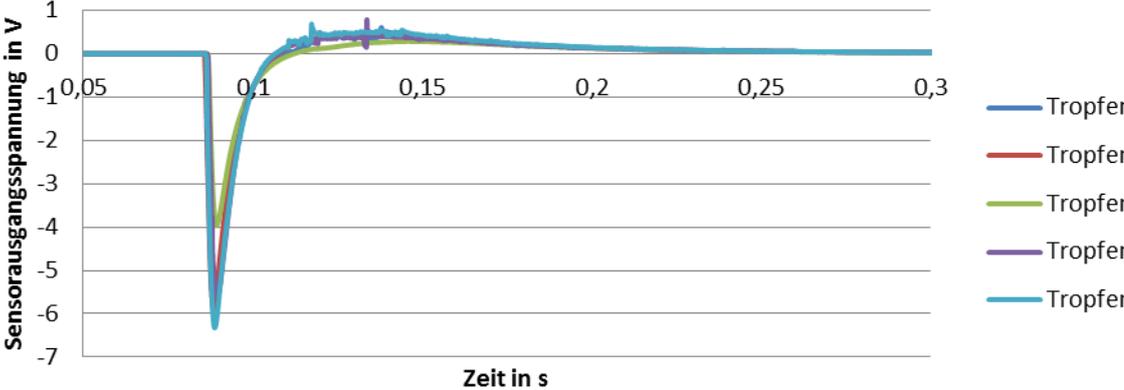
Tabelle 8-7: Messreihe zur Bestimmung der Tropfenmasse

(Die mit * gekennzeichneten Messwerte sind durch Zittern mit der Hand verfälscht und werden für die Berechnung der durchschnittlichen Tropfenmasse nicht verwendet.)

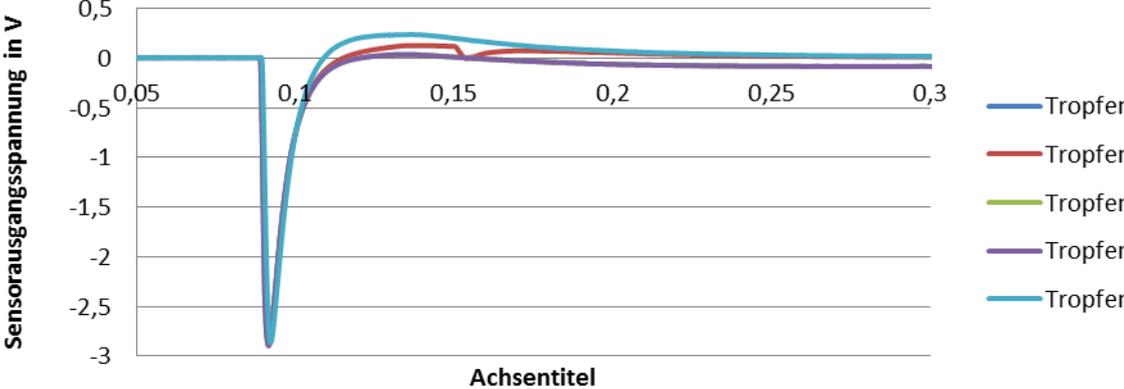
Wassertemperatur / Tropfen		1	2	3	4	5
80 °C	Temperatur	82°C	80°C	78°C	79°C	78°C
	OnoSokki	140/141	142/143	144/145	150/151	152/153
60 °C	Temperatur	62°C	59°C	57°C	58°C	59°C
	OnoSokki	146/147	124/125	126/127	128/129	148/149
40 °C	Temperatur	42°C	41°C	41°C	40°C	39°C
	OnoSokki	130/131	132/133	134/135	136/137	138/139
RT	Temperatur	23,3°C	23,3°C	23,3°C	23,3°C	23,3°C
	OnoSokki	114/115	116/117	118/119	120/121	122/123
10 °C	Temperatur	10°C	10°C	10°C	10°C	10°C
	OnoSokki	164/165	166/167	168/169	170/171	172/173
0 °C	Temperatur	0°C	0°C	0°C	0°C	0°C
	OnoSokki	154/155	156/157	158/159	160/161	162/163

Tabelle 8-8: Temperaturen und Rohdaten- Dateien für den Tropfenfallversuch aus konstanter Höhe mit verschiedenen Wassertemperaturen auf den ebenen Sensor

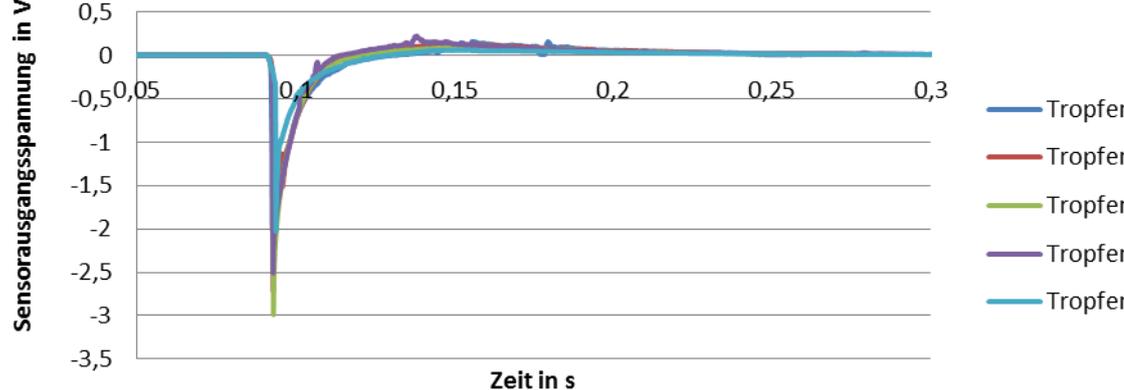
Wassertemperatur 80 °C



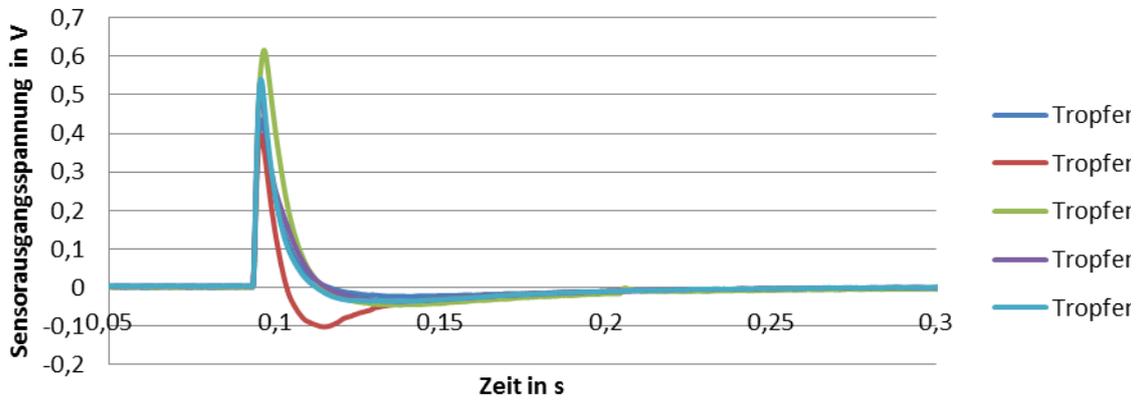
Wassertemperatur 60 °C



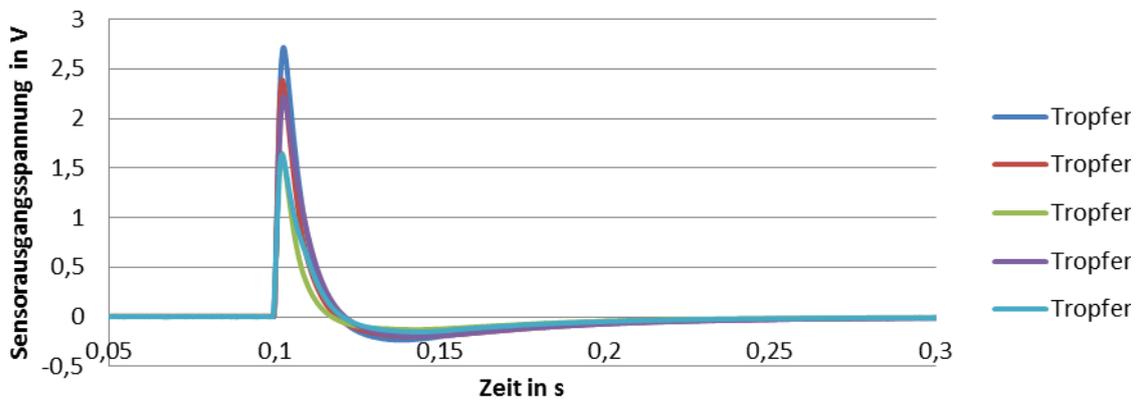
Wassertemperatur 40 °C



Wassertemperatur 23,3 °C



Wassertemperatur 10 °C



Wassertemperatur 0 °C

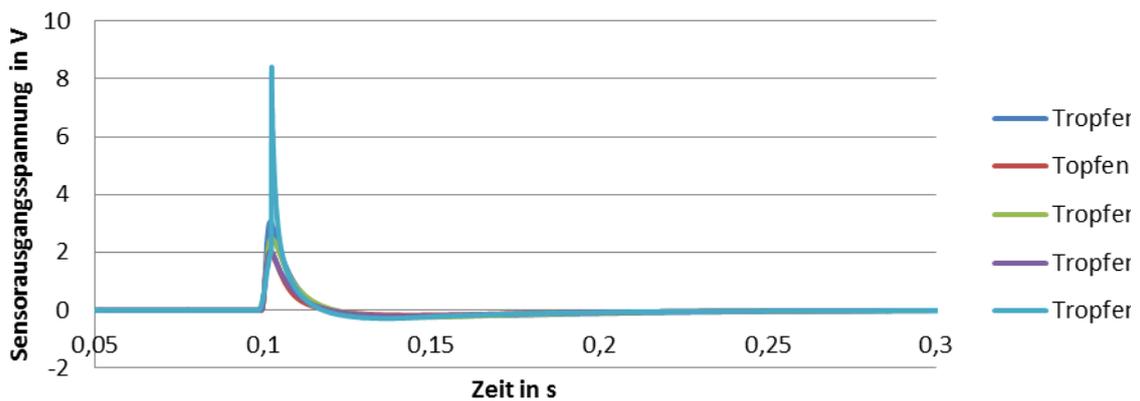


Abbildung 8-7: Zeitlicher verlauf der Sensorausgangsspannungen für die 6 untersuchten Temperaturbereiche

9 Literaturverzeichnis

Bathe, K.-J., 2002. *Finite-Elemente-Methoden*. 2 Hrsg. s.l.:Springer.

Bulur, E., 2015. *Experimentelle und simulative Tropfenaufprallbestimmung mit einem piezoelektrischen Sensor*. Braunschweig: s.n.

Clanet, C., Béguin, C., Richard, D. & Quéré, D., 2004. Maximal deformation of an impacting drop. In: *J. Fluid Mech.*. United Kingdom: Cambridge University Press, pp. 199-208.

Fujitsuka, N. et al., 1998. Monolithic pyroelectric infrared image sensor using PVDF thin film. *Sensors and Actuators*, pp. 237- 248.

Gaudenzi, P., 2009. *Smart Structures: Physical Behavior, Mathematical Modelling and Applications*. s.l.:John Wiley & Sons Ltd..

Gautschi, G., 2002. *Piezoelectric Sensorics*. s.l.:Springer Verlag Berlin Heidelberg.

Groth, C. & Müller, G., 2009. *FEM für Praktiker - Band 3: Temperaturfelder*. 5 Hrsg. Renningen: Expert Verlag.

Hering, E. & Schönfeld, G. (.), 2012. *Sensoren in Wissenschaft und Technik*. s.l.:Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.

Kaltenbacher, M., 2015. *Numerical Simulation of Mechatronic Sensors and Actuators*. s.l.:Springer Verlag Berlin Heidelberg.

Keppler, R. & Anderson, R., 1978. In: *Journal of Applied Physics*. s.l.:s.n.

Lynch, C. S., 1993. Polyvinylidene fluoride (PVDF) elastic, piezoelectric, pyroelectric, and dielectric coefficients and their nonlinearities. In: *Ferroelectrics Vol. 150*. United States of America: Gordon and Breach Science Publishers S.A., pp. 331-342.

Measurement Specialties, Inc., 2008. *Piezo Film Sensors Technical Manual*, Hampton: www.meas-spec.com.

Michaeli, W., 2006. *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*. s.l.:Hanser.

Müller, G. & Groth, C., 2007. *FEM für Praktiker - Band 1: Grundlagen*. 8 Hrsg. Renningen: Expert Verlag.

Müller, M., 2013. *Detektion und Klassifikation von Kräfteinwirkungen auf die Fahrzeugaussenhaut auf Grundlage Piezoelektrischer Signale*. Rostok: s.n.

Nalwa, 1995. *Ferroelectric Polymers*. New York: Marcel Dekker, Inc..

Peligrin, M. & Schänzer, 1997. *Sicherheit im Luftverkehr*. s.l.:s.n.

- PI Ceramic GmbH, 2016. *piceramic*. [Online]
Available at: <http://www.piceramic.de/piezo-technologie/eigenschaften-piezoaktoren.html>
[Zugriff am 16 06 2016].
- Schätzig, W. & Müller, G., 2003. *FEM für Praktiker Band 4: Elektrotechnik*. Renningen: Expert Verlag.
- Schiessle, E., 1992. *Sensortechnik und Meßwertaufnahme*. Würzburg: Vogel-Fachbuch.
- Sinapius, P. D.-I. J., 2013. *Adaptronik*. Braunschweig: TU Braunschweig.
- Stelzmann, U., Groth, C. & Müller, G., 2008. *FEM für Praktiker - Band 2: Strukturodynamik*. 5 Hrsg. Renningen: Expert Verlag.
- Thompson, M. L., 2002. *On the Material Properties and Constitutive Equations of Piezoelectric Poly Vinyliden Fluoride (PVDF)*, Drexel University: s.n.
- Tipler, P. & Mosca, G., 2012. *Physik für Wissenschaft und Ingenieure*. 6.Auflage Hrsg. s.l.:Springer Verlag Berlin Heidelberg.
- Vinogradov, A. & Holloway, F., 1999. Elektromechanical properties of the piezoelectric polymer PVDF. In: *Ferroelectrics Vol. 226*. s.l.:Gordon and Breach Science Publisher, pp. 169-181.
- Vinogradov, A. M., Schmidt, V. H., Tuthill, G. F. & Bohannon, G. W., 2004. Mechanics of Material 36. In: s.l.:s.n., pp. 1007-1016.
- Wang, T., Herbert, J. & Glass, A., 1988. *The Applications of Ferroelectric Polymers*. s.l.:s.n.
- Wikipedia, 2016. *Wikipedia*. [Online]
Available at: <https://de.wikipedia.org/wiki/Polyvinylidenfluorid>
[Zugriff am 08 April 2016].
- Wikipedia, 2016. *Wikipedia*. [Online]
Available at: https://de.wikipedia.org/wiki/ANSYS_%28Software%29
[Zugriff am 14 04 2016].
- Y.R.V.V.R.T.V.V.Vardan, 1989. *Measurement Of All The Elastic And Dielectric Constants of Poled PVDF Films*.
s.l.:<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=67082>.
- Yadav, V. S., Singh, Y. & Dhubkarya, D., 2010. *The Effekt of Frequency and Temperature on Dielektric Properties of Pure PVDF Thin Films*. Hong Kong, IMECS.