

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	III
Kurzfassung	V
Abstract	VII
Inhaltsverzeichnis	IX
Symbolverzeichnis	XIII
Abkürzungsverzeichnis	XV
1 Einleitung und Überblick	1
2 Theoretische Grundlagen zum mechanischen Verhalten von Silizium-Federkörpern	6
2.1 Eigenschaften von einkristallinem Silizium	6
2.1.1 Kristallographische Eigenschaften	6
Die Atombindungen von Metallen und Kristallen	6
Kristallstruktur von Silizium	6
Beschreibung der Richtungen durch Millersche Indizes	8
Anisotrope Eigenschaften von Silizium	8
Materialparameter von Silizium, Aluminium und Stahl im Vergleich	9
2.1.2 Mechanisches Verhalten unter Krafteinwirkung	10
Elastisches Verhalten	10
Kriechen	11
Bruchverhalten	12
2.2 Voruntersuchungen zum Materialverhalten von Silizium beim Einsatz in Wägezellen	12
2.2.1 Analytische Berechnungen	13
Mechanische Spannung	13
Verformung	14
Dehnungsverhalten	15
Bruchverhalten	17
2.2.2 Verifizierung des numerischen Berechnungsverfahrens	18
Numerisches Modell	18
Vergleich der numerischen Ergebnisse mit den analytischen Berechnungen	19

3 Numerische Untersuchungen zum mechanischen Verhalten von Silizium-Federkörpern	21
3.1 Untersuchungen zur Federkörpergeometrie	21
3.1.1 Anforderungen an die Federkörpergeometrie	21
3.1.2 Modelle verschiedener Federkörper in Doppelbiegebalkengeometrie	22
Doppelbiegebalken als Parallellenker	22
Doppelbiegebalken mit geraden Dünnstellen	23
Doppelbiegebalken mit abgerundeten Dünnstellen	23
3.1.3 Dehnungs- und Verformungsverhalten der unterschiedlichen Geometrien	24
Festlegung der Geometrie	26
3.1.4 Einfluss der Geometrieparameter auf das Dehnungs- und Spannungsverhalten im Federkörper	26
Modell des Federkörpers in Doppelbiegebalkengeometrie	26
Auswertung	27
Variation der Breite b	28
Variation der Höhe h	29
Variation der Dünnstellendicke d	29
Variation des Dünnstellenabstandes s	30
3.1.5 Festlegung der Geometrieparameter	31
3.2 Untersuchungen zum anisotropen Verhalten von Silizium	31
3.2.1 Modellbildung und untersuchte Orientierungen des Siliziums im Federkörper	32
3.2.2 Einfluss der Anisotropie auf das Dehnungsverhalten des Federkörpers	33
3.2.3 Festlegung der Orientierung des Siliziums im Federkörper	35
3.3 Untersuchungen zur Einspannung und zur Krafteinleitung	35
3.3.1 Modellbildung zur Einspannung des Federkörpers	36
3.3.2 Einfluss der Einspannung auf das Dehnungsverhalten des Federkörpers	37
3.3.3 Festlegung der Einspannung und der Krafteinleitung	41
3.4 Mechanisches Verhalten der herzustellenden Federkörper	41
3.4.1 Geometrie der Federkörper und Orientierung des Siliziums	41
3.4.2 Verformungs- und Dehnungsverhalten der Federkörper unter Last	42
4 Herstellung der einkristallinen Silizium-Federkörper	45
5 Experimentelle Untersuchung der Silizium-Federkörper	48
5.1 Versuchsaufbau und Messablauf	48
5.2 Auswertung	50

5.2.1	Verkippung des Federkörpers im Versuchsaufbau	50
5.2.2	Verformung und Auslenkungsempfindlichkeit	53
5.2.3	Mechanische Nachwirkungen	54
5.2.4	Zusammenfassung der Ergebnisse	57
6	Herstellung der Silizium-Wägezellen	58
6.1	Applikation der Dünnschicht-Dehnungsmessstreifen	58
6.1.1	Beschichtung der Federkörper	58
6.1.2	Strukturierung der Schichten	59
6.2	Zusammenschaltung der Dehnungsmessstreifen zu Vollbrücken	61
6.2.1	Widerstandsabgleich der Dehnungsmessstreifen	62
6.2.2	Temperaturabhängigkeit der Dehnungsmessstreifen	63
6.2.3	Vollbrückenschaltung der Dehnungsmessstreifen	63
7	Experimentelle Untersuchungen an Silizium-Wägezellen	66
7.1	Zeitverhalten im Temperaturbereich von -10 °C bis 40 °C	66
7.2	Kennlinie im Temperaturbereich von -10 °C bis 40 °C	69
7.2.1	Beurteilung in Anlehnung an die Norm DIN EN ISO 376	69
7.2.2	Versuchsaufbau und Messablauf	71
7.2.3	Auswertung	72
Empfindlichkeit	72	
Reproduzierbarkeit / Relative Wiederholpräzision	74	
Hysterese / Relative Umkehrspanne	76	
Nullpunktabweichung / Relative Nullpunktabweichung	77	
Linearität / Relative Interpolationsabweichung	78	
7.2.4	Zusammenfassung der Ergebnisse	81
8	Kompensation des Temperatureinflusses und der Nichtlinearität	82
8.1	Kompensationsverfahren	82
8.2	Auswertung der kompensierten Messdaten	84
9	Bewertung in Anlehnung an die OIML Empfehlung R60	85
9.1	Genauigkeitsklassen der OIML Empfehlung R60	85
9.2	Kriechprüfung	86
9.2.1	Kriechfehler E_{Kr}	86
9.2.2	Kriechfehlerdifferenz $E_{Kr,20-30}$	86
9.2.3	Rückkehrfehler $E_{Rück}$	86
9.2.4	Klassifizierung der Silizium-Wägezellen	86
9.3	Richtigkeitsprüfung	88

9.3.1 Wägezellenfehler E_{WZ}	88
9.3.2 Reproduzierbarkeitsfehler E_{Rep}	88
9.3.3 Temperaturfehler des Nullpunktes E_{TK0}	88
9.3.4 Klassifizierung der Silizium-Wägezellen	88
9.4 Bewertung des Einsatzbereiches	91
10 Zusammenfassung und Ausblick	92
Anhänge	95
A Materialeigenschaften von einkristallinem Silizium	95
B Zuordnung der Richtungen des Si im FK zu den definierten Orientierungen	96
C Widerstände und Temperaturkoeffizienten der Dehnungsmessstreifen	97
D Zuordnung der Dehnungsmessstreifen zu den Brückenwiderständen	99
E Messdaten der Kriechmessungen	100
F Messdaten der Untersuchungen zur Kennlinie	102
G Auswertung der kompensierten Messdaten nach R60	110
Literatur	XVII
Veröffentlichungsliste	XXI