

## Inhaltsverzeichnis

Danksagung .....	III
Kurzfassung .....	V
Abstract .....	VII
Inhaltsverzeichnis .....	IX
Symbolverzeichnis .....	XIII
Abkürzungsverzeichnis .....	XV
<b>1 Einleitung und Überblick .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Theoretische Grundlagen zum mechanischen Verhalten von Silizium-Federkörpern .....</b>	<b>6</b>
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

<b>3</b>	<b>Numerische Untersuchungen zum mechanischen Verhalten von Silizium-Federkörpern</b>	<b>21</b>
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 Parallelenker	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
<b>4</b>	<b>Herstellung der einkristallinen Silizium-Federkörper</b>	<b>45</b>
<b>5</b>	<b>Experimentelle Untersuchung der Silizium-Federkörper</b>	<b>48</b>
5.1	Versuchsaufbau und Messablauf	48
5.2	Auswertung	50

5.2.1	Verkipfung 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
<b>6</b>	<b>Herstellung der Silizium-Wägezellen .....</b>	<b>58</b>
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
<b>7</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen an Silizium-Wägezellen .....</b>	<b>66</b>
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
<b>8</b>	<b>Kompensation des Temperatureinflusses und der Nichtlinearität .....</b>	<b>82</b>
8.1	Kompensationsverfahren .....	82
8.2	Auswertung der kompensierten Messdaten .....	84
<b>9</b>	<b>Bewertung in Anlehnung an die OIML Empfehlung R60 .....</b>	<b>85</b>
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
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>92</b>
<b>Anhänge</b>	<b>.....</b>	<b>95</b>
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
<b>Literatur</b>	<b>.....</b>	<b>XVII</b>
<b>Veröffentlichungsliste</b>	<b>.....</b>	<b>XXI</b>