

Inhalt

1	Einleitung	11
1.1	Wissenschaftliche Motivation	12
1.2	Definition von »hoch-g«	13
1.3	Stand von Wissenschaft und Technik	14
1.4	Zielstellung und Vorgehen	15
1.5	Aufbau der Arbeit	16
2	Physikalische Grundlagen	19
2.1	Messgröße Beschleunigung	19
2.1.1	Zeitabhängige Ortsbestimmung	19
2.1.2	Elektromagnetische Strahlung	20
2.1.3	Scheinkräfte	20
2.2	Grundlegende Funktionsweise von Beschleunigungssensoren	21
2.2.1	Sensortypen	21
2.2.2	Feder-Masse-System	22
2.2.3	Auslesemechanismus	24
2.2.4	Signalauswertung	30
2.3	Dynamisches Verhalten von Beschleunigungssensoren	33
2.3.1	Differentialgleichung des harmonischen Oszillators	33
2.3.2	Periodische Beschleunigungen und Vibrationen	33
2.3.3	Transiente Beschleunigungen	36
2.3.4	Fourier-Transformation von transienten Anregungen	42
2.4	Warum MEMS?	44
2.4.1	Robustheit	44
2.4.2	Resonanzfrequenz	45
2.5	Dämpfung	46
2.5.1	Intrinsische Dämpfung	47
2.5.2	Extrinsische Dämpfung	47
2.6	Silizium	50
2.6.1	Mechanische Eigenschaften	51
2.6.2	Piezoresistiver Effekt in Silizium	53
3	Sensorspezifische Grundlagen	57
3.1	Kenngrößen von Hoch-g-Beschleunigungssensoren	57
3.1.1	Leistungsmerkmale	57
3.1.2	Anforderungen an die Störimpfindlichkeit	60
3.2	Bewertungsfaktor von Beschleunigungssensoren	64
3.3	Design-Strategien	66
3.4	Referenzsensoren	68

4	Numerische und experimentelle Methoden.....	71
4.1	Numerische Simulation	71
4.2	Erzeugung hoher Beschleunigungen.....	71
4.2.1	Hopkinson-Stab.....	72
4.2.2	Impakt-Experimente	75
4.2.3	Anregung der Resonanzfrequenz.....	75
4.3	Mikrosystemtechnik.....	77
5	Erweiterung und Diskussion zentraler Design-Grundlagen	79
5.1	Transiente Anregung oszillatorischer Systeme	79
5.1.1	Zusammenhang zwischen Fourier- und Schockantwort-Spektrum transienter Pulse	80
5.1.2	Fourier-Spektrum transienter Anregungen	84
5.1.3	Auswirkung von Dämpfungsmaßnahmen	90
5.1.4	Konsequenzen für das Sensor-Design	92
5.2	Die geometrische Konstante	97
5.2.1	Berechnung der Konstante	100
5.3	Bewertungsfaktor piezoresistiver Sensorgeometrien.....	102
5.3.1	Zusammensetzung des Bewertungsfaktors	103
5.3.2	Analyse des Bewertungsfaktors	105
6	Design des Fühlelements	109
6.1	Feder-Masse-System	109
6.2	Ausgangsgeometrie.....	111
6.3	Materialwahl	112
6.4	Dotierung und Orientierung der piezoresistiven Elemente.....	113
6.4.1	Widerstand.....	115
6.4.2	k -Faktor.....	115
6.5	Theoretischer Wert des Bewertungsfaktors	116
6.6	Numerische Auslegung des Fühlelements	117
6.6.1	Simulationsumgebung	118
6.6.2	Schwachstellen der Ausgangsgeometrie	119
6.6.3	Simulation der Fühlelementeigenschaften	123
6.6.4	Numerische Optimierung.....	131
6.6.5	Designvariante »Doppelplatte«	131
6.6.6	Liste der Fühlelementvarianten	133
6.7	Diskussion des Designs	134

7	Design des Gehäuses.....	137
7.1	Notwendigkeit der 90°-Umkontaktierung	137
7.2	Gehäusekonzepte.....	140
8	Experimentelle Charakterisierung und Bewertung des Sensors	143
8.1	Bestimmung der Eigenfrequenz	143
8.1.1	Schwebungsverhalten.....	143
8.1.2	Ergebnisse	144
8.2	Bestimmung der Sensitivität.....	147
8.2.1	Experimenteller Aufbau und Auswertung	147
8.2.2	Allgemeine Signaltreue	149
8.2.3	Absolutwert.....	149
8.2.4	Reproduzierbarkeit	151
8.2.5	Linearität	152
8.2.6	Messbereich	153
8.3	Untersuchung von Störeffekten	154
8.3.1	Rauschen.....	154
8.3.2	Temperaturabhängigkeit der Sensitivität	156
8.3.3	Querempfindlichkeit	157
8.4	Bewertung des Fühlelements	158
8.4.1	Vergleich mit Referenzsensoren	158
8.4.2	Vergleich mit Theorie.....	160
8.4.3	Vergleich mit Anforderungen	160
8.4.4	Schwachstellen des Designs.....	161
9	Diskussion des Designkonzepts	163
9.1	Nutzen der Spektralanalyse.....	163
9.2	Nutzen des Bewertungsfaktors	163
9.3	Nutzen der geometrischen Konstante	164
9.4	Grenzen des Konzepts	165
10	Zusammenfassung und Ausblick.....	167
11	Referenzen	169
12	Eigene Veröffentlichungen und betreute Abschlussarbeiten.....	181

13	Anhang	183
13.1	Strahlungsleistung einer beschleunigten Ladung.....	183
13.2	Berechnung des residualen Schockantwort-Spektrums	184
13.3	Herleitung des asymptotischen Verhaltens von Fourier-Spektren.....	189
13.4	Umsetzungsfaktor für Biegeelemente mit Endmasse	190
13.5	Abmessungen der Fühlelementvarianten	192