

# Inhaltsverzeichnis

|                                                                     |           |
|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....                                  | <b>7</b>  |
| <b>Zusammenfassung</b> .....                                        | <b>15</b> |
| <b>Summary</b> .....                                                | <b>17</b> |
| <b>1. Einleitung</b> .....                                          | <b>27</b> |
| 1.1 Anwendungen von Gyroskopen .....                                | 32        |
| 1.1.1 Marktanalysen .....                                           | 32        |
| 1.1.2 Navigationssysteme .....                                      | 33        |
| 1.1.3 Stabilisierung .....                                          | 35        |
| 1.1.4 Fahrdynamikregelung .....                                     | 36        |
| 1.1.5 Überschlagerkennung .....                                     | 37        |
| 1.1.6 Übersicht .....                                               | 37        |
| 1.2 Funktionsprinzipien von Gyroskopen .....                        | 39        |
| 1.2.1 Mechanische Gyroskope .....                                   | 39        |
| 1.2.2 Akustische und Gasstrahl-Gyroskope .....                      | 46        |
| 1.2.3 OFW-Gyroskope .....                                           | 47        |
| 1.2.4 Optische Gyroskope .....                                      | 49        |
| 1.2.5 Magnetohydrodynamischer Sensor .....                          | 51        |
| 1.2.6 Elektronen-Gyroskop .....                                     | 51        |
| 1.2.7 Kernspinkreisel .....                                         | 52        |
| 1.3 Mechanische Gyroskope - Stand der Technik .....                 | 53        |
| 1.3.1 Rotierende Massen .....                                       | 53        |
| 1.3.2 Formschwingungen .....                                        | 54        |
| 1.3.3 Biegeschwingungen .....                                       | 55        |
| 1.3.4 Lineare Primärschwingung .....                                | 59        |
| 1.3.5 Drehschwingung der Primärmode .....                           | 63        |
| 1.3.6 Zusammenfassung .....                                         | 66        |
| 1.4 DAVED®-Drehratengyroskop .....                                  | 69        |
| 1.4.1 Kopplung von Antriebsmechanismus und Sekundärschwingung ..... | 69        |
| 1.4.2 Entkopplung (DAVED®) .....                                    | 70        |
| 1.4.3 Targetspezifikation .....                                     | 73        |

|                                                                           |            |
|---------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>2. Betriebsmodi von schwingenden Coriolis-Gyroskopen</b>               | <b>74</b>  |
| 2.1 Beschreibung der Betriebsmodi                                         | 75         |
| 2.1.1 Drehratenmessung mit freier Sekundärschwingung                      | 75         |
| 2.1.2 Drehratenmessung mit kraftkompensierter Sekundärschwingung          | 76         |
| 2.1.3 Drehwinkelmessung (integrierende Drehratenmessung)                  | 77         |
| 2.2 Meßsignal bei Drehratenmessungen                                      | 77         |
| 2.2.1 Freie Sekundärschwingung, elektrisch geregelte Primärschwingung     | 87         |
| 2.2.2 Freie Sekundärschwingung, mechanisch stabilisierte Primärschwingung | 88         |
| 2.2.3 Kraftkompensierte Sekundärschwingung                                | 90         |
| 2.2.4 Kompensation mit Referenzschwingung                                 | 91         |
| <b>3. Gyro-Gleichungen</b>                                                | <b>94</b>  |
| 3.1 Drehimpuls und Eulersche Gleichungen                                  | 94         |
| 3.2 Gyro-Gleichung für rotierende Systeme                                 | 97         |
| 3.3 Gyro-Gleichung für quasirotierende Systeme                            | 99         |
| <b>4. Kapazitäten und elektrostatische Kräfte</b>                         | <b>105</b> |
| 4.1 Kapazitäten                                                           | 105        |
| 4.1.1 Kammelektroden                                                      | 105        |
| 4.1.2 Detektionselektroden                                                | 107        |
| 4.2 Elektrostatische Kräfte                                               | 111        |
| 4.2.1 Kammantrieb                                                         | 112        |
| 4.2.1.1 Instabilität des elektrostatischen Antriebs                       | 114        |
| 4.2.1.2 Levitation                                                        | 117        |
| 4.2.1.3 Durchschlagspannung                                               | 119        |
| 4.2.2 Ausleseelektroden                                                   | 121        |
| 4.2.2.1 Elektrostatische Kraftkonstante                                   | 122        |
| 4.2.2.2 Berechnung von $f_{ap10}$                                         | 124        |
| 4.2.2.3 Steuer- und Regelkräfte                                           | 125        |
| 4.2.2.4 Berechnung von $f_{fp0}$                                          | 126        |
| <b>5. Strukturmechanik</b>                                                | <b>128</b> |
| 5.1 Mechanische Kraftkonstanten                                           | 128        |
| 5.2 Resonanzfrequenzen                                                    | 135        |
| 5.3 Elektrostatische Resonanzfrequenzverschiebung                         | 139        |
| 5.4 Temperaturabhängigkeit der Resonanzfrequenzen                         | 140        |
| 5.5 Verwölbung durch Spannungsgradient                                    | 141        |
| 5.6 Asymmetrie der Primärbalken                                           | 142        |

|                                                                                  |            |
|----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>6. Dämpfung und Güte</b>                                                      | <b>144</b> |
| 6.1 Einführung in die Problematik                                                | 144        |
| 6.2 Primärschwingung                                                             | 148        |
| 6.3 Sekundärschwingung                                                           | 155        |
| <b>7. Nichtlineare Schwingungen - Mechanisch stabilisierte Primärschwingung</b>  | <b>160</b> |
| 7.1 Theoretische Grundlagen                                                      | 161        |
| 7.2 Frequenzgänge von nichtlinearen Oszillatoren                                 | 165        |
| 7.3 Mechanisch stabilisierte Primärschwingung                                    | 168        |
| <b>8. Berechnung der Leistungsparameter</b>                                      | <b>172</b> |
| 8.1 Skalenfaktor                                                                 | 172        |
| 8.2 Rauschen                                                                     | 179        |
| 8.2.1 Mechanisch-thermisches Rauschen                                            | 179        |
| 8.2.2 Elektrische Rauschanteile                                                  | 183        |
| 8.2.3 Gesamttrauschen                                                            | 187        |
| 8.3 Sensorbandbreite                                                             | 189        |
| 8.4 $NP$ , $QU$ und $UD$                                                         | 191        |
| 8.5 Temperaturempfindlichkeit von Nullpunkt und Skalenfaktor                     | 193        |
| 8.6 Beschleunigungsempfindlichkeit                                               | 200        |
| 8.7 Quer- und Drehbeschleunigungsempfindlichkeit                                 | 203        |
| <b>9. Design</b>                                                                 | <b>205</b> |
| 9.1 Designfluß                                                                   | 205        |
| 9.2 Designparameter, berechnete mechanische Eigenschaften und Leistungsparameter | 209        |
| <b>10. Auswerteelektronik</b>                                                    | <b>216</b> |
| 10.1 Analoge Auswerteelektronik                                                  | 216        |
| 10.2 Digitale Auswerteelektronik                                                 | 222        |
| <b>11. Herstellung</b>                                                           | <b>226</b> |
| 11.1 Waferprozessierung                                                          | 226        |
| 11.1.1 Prozeßablauf                                                              | 227        |
| 11.1.2 Designregeln                                                              | 234        |
| 11.2 Aufbau- und Verbindungstechnik                                              | 236        |
| 11.3 Sensorgehäuse                                                               | 237        |

|                                                                 |            |
|-----------------------------------------------------------------|------------|
| <b>12. Meßtechnik</b>                                           | <b>240</b> |
| 12.1 Drehtisch und Vakuumtechnik                                | 240        |
| 12.2 Meßgeräte und Meßprogramm                                  | 245        |
| <b>13. Messungen</b>                                            | <b>246</b> |
| 13.1 Mechanische Eigenschaften                                  | 246        |
| 13.1.1 Frequenzgänge                                            | 247        |
| 13.1.2 Resonanzfrequenzen                                       | 253        |
| 13.1.3 Verwölbung                                               | 256        |
| 13.1.4 Mechanische Gütefaktoren                                 | 257        |
| 13.2 Leistungsparameter                                         | 261        |
| 13.2.1 Skalenfaktor                                             | 261        |
| 13.2.2 Rauschen und Auflösung                                   | 263        |
| 13.2.3 Bandbreite                                               | 268        |
| 13.2.4 Temperaturempfindlichkeit von Nullpunkt und Skalenfaktor | 270        |
| 13.2.5 Beschleunigungsempfindlichkeit                           | 273        |
| 13.2.6 Sensorspezifikation                                      | 275        |
| <b>14. Diskussion der Ergebnisse und Ausblick</b>               | <b>277</b> |
| <b>A Anhang: Physikalische Konstanten und Materialdaten</b>     | <b>287</b> |
| <b>Literaturverzeichnis</b>                                     | <b>289</b> |
| <b>Liste der Veröffentlichungen</b>                             | <b>299</b> |
| <b>Lebenslauf</b>                                               | <b>301</b> |