

# Inhaltsverzeichnis

|                            |    |
|----------------------------|----|
| <b>Formelzeichen</b> ..... | xx |
|----------------------------|----|

## Teil I Grundlagen des haptischen Entwurfs

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| <b>1 Motivation und Anwendungen haptischer Systeme</b> .....          | 7  |
| 1.1 Bedeutung der Haptik aus philosophischer und sozialer Sicht ..... | 7  |
| 1.1.1 Haptik als <i>Grenze des physischen Seins</i> .....             | 7  |
| 1.1.2 Was prägte den Tastsinn .....                                   | 11 |
| 1.1.3 Besonderheiten im Entwurfprozess .....                          | 13 |
| 1.2 Die Bedeutung der Haptik im beruflichen Alltag .....              | 15 |
| 1.2.1 Der Tastsinn im medizinischen Alltag .....                      | 16 |
| 1.2.2 Der Tastsinn im Cockpit .....                                   | 18 |
| 1.2.3 Der Tastsinn am Schreibtisch .....                              | 19 |
| 1.2.4 Der Tastsinn in der Musik .....                                 | 19 |
| <b>2 Begriffsklärungen</b> .....                                      | 23 |
| 2.1 Wissenschaftliche Disziplinen in der haptischen Forschung .....   | 23 |
| 2.2 Begriffe und Bezeichnungen beim Umgang mit haptischen Systemen    | 25 |
| 2.2.1 Grundbegriffe der Haptik .....                                  | 25 |
| 2.2.2 Definition haptischer Systeme .....                             | 26 |
| 2.2.3 Eigenschaften haptischer Systeme .....                          | 30 |
| 2.2.4 Charakterisierung haptischer Objekteigenschaften .....          | 32 |
| 2.2.5 Technische Beispiele .....                                      | 33 |
| <b>3 Biologische Grundlagen haptischer Wahrnehmung</b> .....          | 39 |
| 3.1 Biologie des Tastsinns .....                                      | 39 |
| 3.2 Haptische Wahrnehmung .....                                       | 44 |
| 3.2.1 Psychophysikalische Konzepte .....                              | 44 |
| 3.2.2 Frequenzabhängigkeit .....                                      | 50 |
| 3.2.3 Kennwerte haptischer Interaktion .....                          | 55 |
| 3.3 Schlussfolgerungen aus der Biologie der Haptik .....              | 60 |

|          |                                                                       |           |
|----------|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.3.1    | Steifigkeiten .....                                                   | 60        |
| 3.3.2    | Ein Kiloherz - Bedeutung für den technischen Entwurf .....            | 62        |
| <b>4</b> | <b>Nutzermodellbildung .....</b>                                      | <b>65</b> |
| 4.1      | Zuordnung der Frequenzbereiche auf das Nutzermodell .....             | 65        |
| 4.2      | Modell des Nutzers als mechanische Last .....                         | 69        |
| 4.2.1    | Griffarten .....                                                      | 71        |
| 4.2.2    | Messverfahren und Messmittel .....                                    | 72        |
| 4.2.3    | Modelle .....                                                         | 73        |
| 4.2.4    | Modellparameter .....                                                 | 76        |
| 4.3      | Modellbildung haptischer Wahrnehmung .....                            | 84        |
| 4.4      | Anwendungsbeispiele .....                                             | 88        |
| 4.4.1    | Kinästhetisches System .....                                          | 88        |
| 4.4.2    | Taktils System .....                                                  | 90        |
| 4.4.3    | Beispielanalysen im Zeit- und Frequenzbereich .....                   | 91        |
| 4.5      | Zusammenfassende Anmerkungen zur Anwendung der Methodik ..            | 95        |
| <b>5</b> | <b>Strukturen haptischer Systeme .....</b>                            | <b>97</b> |
| 5.1      | Systembetrachtungen .....                                             | 97        |
| 5.1.1    | Impedanz-gesteuert .....                                              | 98        |
| 5.1.2    | Impedanz-geregt .....                                                 | 99        |
| 5.1.3    | Admittanz-gesteuert .....                                             | 101       |
| 5.1.4    | Admittanz-geregt .....                                                | 102       |
| 5.1.5    | Qualitative Gegenüberstellung der möglichen<br>Systemstrukturen ..... | 104       |
| 5.2      | Abstraktion der weiteren Systembestandteile .....                     | 106       |
| 5.2.1    | Grundlegende Systemzerlegung .....                                    | 106       |
| 5.2.2    | Analyse der Systemanteile .....                                       | 108       |

## Teil II Entwurf haptischer Systeme

|          |                                                      |     |
|----------|------------------------------------------------------|-----|
| <b>6</b> | <b>Identifikation von Anforderungen</b>              | 119 |
| 6.1      | Die richtigen Fragen für Spezifikationen             | 119 |
| 6.1.1    | Interaktion als Klassifizierungsmerkmal              | 121 |
| 6.1.2    | Cluster "Kinästhetik"                                | 122 |
| 6.1.3    | Cluster "Surface-tactile"                            | 123 |
| 6.1.4    | Cluster "Vibro-Taktil"                               | 124 |
| 6.1.5    | Cluster "Vibro-Directional"                          | 125 |
| 6.1.6    | Cluster "Omni-Dimensional"                           | 126 |
| 6.1.7    | Cluster "always"                                     | 126 |
| 6.2      | Experimente mit dem Kunden                           | 127 |
| 6.3      | Das Pflichtenheft eines haptischen Systems           | 128 |
| 6.4      | Abfolge der zu treffenden Technologie-Entscheidungen | 132 |
| <b>7</b> | <b>Methoden zur Regelung haptischer Systeme</b>      | 135 |
| 7.1      | Einführung                                           | 135 |
| 7.2      | Methoden der Systembeschreibung                      | 136 |
| 7.2.1    | Klassische Methoden für lineare Eingrößensysteme     | 136 |
| 7.2.2    | Beschreibung linearer Systeme im Zustandsraum        | 141 |
| 7.2.3    | Methoden für nichtlineare Systeme                    | 144 |
| 7.3      | Stabilität gekoppelter Systeme                       | 146 |
| 7.3.1    | Stabilitätsanalyse linearer Systemanteile            | 146 |
| 7.3.2    | Stabilitätsanalyse nichtlinearer Systemanteile       | 150 |
| 7.3.3    | Passivität gekoppelter Systeme                       | 155 |
| 7.4      | Regelung haptischer gekoppelter Systeme              | 158 |
| 7.4.1    | Ansätze zur Strukturierung                           | 158 |
| 7.4.2    | Anforderungsdefinition                               | 160 |
| 7.4.3    | Reglerentwurf                                        | 162 |
| 7.5      | Fazit                                                | 168 |
| <b>8</b> | <b>Kinematikentwurf</b>                              | 171 |
| 8.1      | Grundlagen                                           | 171 |
| 8.1.1    | Mechanismen und deren Einordnung                     | 171 |
| 8.1.2    | Kinematische Berechnungen                            | 175 |
| 8.1.3    | Übertragungsverhalten und die Jakobi Matrix          | 176 |
| 8.1.4    | Optimierung des Übertragungsverhaltens               | 180 |
| 8.2      | Serielle Mechanismen                                 | 181 |
| 8.2.1    | Topologiesynthese                                    | 182 |
| 8.2.2    | Berechnung der kinematischen Probleme                | 183 |
| 8.2.3    | Beispiel eines seriellen Mechanismus                 | 186 |
| 8.3      | Parallele Mechanismen                                | 189 |
| 8.3.1    | Topologiesynthese                                    | 189 |
| 8.3.2    | Berechnung der kinematischen Probleme                | 192 |
| 8.3.3    | Beispiel eines parallelen Mechanismus                | 193 |

|           |                                                            |     |
|-----------|------------------------------------------------------------|-----|
| 8.4       | Gesamtablauf des kinematischen Entwurfs                    | 195 |
| <b>9</b>  | <b>Aktorentwurf</b>                                        | 199 |
| 9.1       | Allgemeines zum Aktorentwurf                               | 200 |
| 9.1.1     | Übersicht über nutzbare Aktorprinzipien                    | 200 |
| 9.1.2     | Aktor-Auswahlhilfe Dynamik                                 | 204 |
| 9.1.3     | Getriebe                                                   | 205 |
| 9.2       | Elektrodynamische Aktoren                                  | 208 |
| 9.2.1     | Der Elektrodynamische Effekt und seine Einflussgrößen      | 208 |
| 9.2.2     | Aktorentwurf                                               | 222 |
| 9.2.3     | Aktorelektronik                                            | 228 |
| 9.2.4     | Beispiele elektrodynamischer Aktoren in haptischen Geräten | 234 |
| 9.2.5     | Fazit zum Entwurf elektrodynamischer Aktoren               | 238 |
| 9.3       | Elektromagnetische Aktoren                                 | 239 |
| 9.3.1     | Magnetische Energie                                        | 239 |
| 9.3.2     | Auslegung des Eisenkreises                                 | 242 |
| 9.3.3     | Beispiele elektromagnetischer Aktoren                      | 246 |
| 9.3.4     | Magnetische Aktoren in haptischen Geräten                  | 249 |
| 9.3.5     | Fazit zum Entwurf magnetischer Aktoren                     | 252 |
| 9.4       | Piezelektrische Aktoren                                    | 254 |
| 9.4.1     | Der piezelektrische Effekt                                 | 254 |
| 9.4.2     | Bauformen und Eigenschaften piezelektrischer Aktoren       | 259 |
| 9.4.3     | Entwurf piezelektrischer Aktoren für haptische Systeme     | 270 |
| 9.4.4     | Vorgehen beim Entwurf piezelektrischer Aktoren             | 270 |
| 9.4.5     | Piezelektrische Aktoren in haptischen Systemen             | 276 |
| 9.5       | Elektrostatische Aktoren                                   | 288 |
| 9.5.1     | Größen des elektrischen Feldes                             | 288 |
| 9.5.2     | Bauformen kapazitiver Luftspaltaktoren                     | 290 |
| 9.5.3     | Dielektrische Polymeraktoren                               | 297 |
| 9.5.4     | Elektorrheologische Fluide                                 | 304 |
| 9.6       | Sonderformen haptischer Aktoren                            | 313 |
| 9.6.1     | Haptisch-Kinästhetische Geräte                             | 313 |
| 9.6.2     | Haptisch-Taktile Geräte                                    | 317 |
| <b>10</b> | <b>Kraftsensorentwurf</b>                                  | 325 |
| 10.1      | Randbedingungen                                            | 325 |
| 10.1.1    | Struktur des Displays                                      | 326 |
| 10.1.2    | Kontaktsituation                                           | 326 |
| 10.1.3    | Mechanische Eigenschaften des Messobjekts                  | 328 |
| 10.1.4    | Textur des Messobjekts                                     | 330 |
| 10.1.5    | Ermittlung der Entwurfskriterien                           | 332 |
| 10.2      | Sensorprinzipien                                           | 332 |
| 10.2.1    | Grundlagen der Elastomechanik                              | 334 |
| 10.2.2    | Resistive Dehnungsmessung                                  | 338 |
| 10.2.3    | Piezoresistive Silizium-Sensoren                           | 342 |

|                                                                                |            |
|--------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 10.2.4 Weitere resistive Sensoren .....                                        | 347        |
| 10.2.5 Kapazitive Sensoren .....                                               | 348        |
| 10.2.6 Optische Sensoren .....                                                 | 354        |
| 10.2.7 Piezoelektrische Sensoren .....                                         | 362        |
| 10.2.8 Exoten .....                                                            | 364        |
| 10.3 Auswahl eines geeigneten Sensors .....                                    | 368        |
| <b>11 Einsatz von Positionssensoren .....</b>                                  | <b>373</b> |
| 11.1 Grundprinzipien der Positionsmessung .....                                | 373        |
| 11.2 Anforderungen im haptischen Zusammenhang .....                            | 375        |
| 11.3 Optische Sensoren .....                                                   | 376        |
| 11.4 Magnetische Sensoren .....                                                | 379        |
| 11.5 Weitere Wegsensoren .....                                                 | 382        |
| 11.6 Elektronik für absolute Positionssensoren .....                           | 384        |
| 11.7 Beschleunigung und Geschwindigkeitsmessung .....                          | 385        |
| 11.7.1 Integration und Differentiation von Signalen .....                      | 385        |
| 11.7.2 Induktionssysteme .....                                                 | 387        |
| 11.7.3 Kraftsensoren als Beschleunigungssensoren .....                         | 388        |
| 11.8 Fazit .....                                                               | 388        |
| <b>12 Schnittstellenauswahl .....</b>                                          | <b>389</b> |
| 12.1 Grenzfrequenzen im Übertragungsweg .....                                  | 390        |
| 12.1.1 Bandbreite in Telemanipulationssystemen .....                           | 390        |
| 12.1.2 Bandbreite bei Simulator-Systemen .....                                 | 391        |
| 12.1.3 Datenraten und Latenzen .....                                           | 391        |
| 12.2 Konzepte zur Bandbreitenreduktion .....                                   | 393        |
| 12.2.1 Betrachtung der wirklich auftretenden Dynamiken .....                   | 393        |
| 12.2.2 Lokale haptische Modelle im Regler .....                                | 393        |
| 12.2.3 Ereignis-orientierte Haptik .....                                       | 394        |
| 12.2.4 Bewegungsextrapolation .....                                            | 395        |
| 12.2.5 Kompensation extremer Totzeiten .....                                   | 396        |
| 12.2.6 Kompression .....                                                       | 396        |
| 12.3 Standardschnittstellen .....                                              | 397        |
| 12.4 Fazit .....                                                               | 402        |
| <b>13 Softwareentwurf .....</b>                                                | <b>403</b> |
| 13.1 Überblick über das Themenfeld „Virtual Reality“ .....                     | 404        |
| 13.2 Aufbau und Architektur von VR-Systemen .....                              | 407        |
| 13.2.1 Hardware-Komponenten .....                                              | 407        |
| 13.2.2 Anbindung von Geräten und Geräteabstraktion .....                       | 408        |
| 13.2.3 Software-Komponenten .....                                              | 410        |
| 13.2.4 Simulation .....                                                        | 413        |
| 13.2.5 Darstellungs-Subsysteme, „Renderer“ .....                               | 416        |
| 13.2.6 Entkopplung des Haptik-Renderers von anderen<br>Sinnesmodalitäten ..... | 419        |

|           |                                                                       |            |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------|------------|
| 13.2.7    | Haptische Interaktionsmetaphern .....                                 | 421        |
| 13.3      | Algorithmen .....                                                     | 423        |
| 13.3.1    | Virtuelle Wand .....                                                  | 425        |
| 13.3.2    | „Penalty“-Ansätze .....                                               | 428        |
| 13.3.3    | Constraint-basierte Ansätze .....                                     | 430        |
| 13.3.4    | 6 DoF-Interaktion: Voxmap-PointShell-Algorithmus .....                | 434        |
| 13.4      | Kollisionserkennung .....                                             | 441        |
| 13.5      | Fazit .....                                                           | 449        |
| <b>14</b> | <b>Abschließende Betrachtung zum Entwurf haptischer Systeme .....</b> | <b>451</b> |

**Teil III Anhang**

|           |                                                                                                         |            |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>15</b> | <b>URLs</b> .....                                                                                       | <b>457</b> |
| <b>16</b> | <b>Mechanische Impedanzen und Admittanzen bei translatorischen<br/>und rotatorischen Systemen</b> ..... | <b>461</b> |
| <b>17</b> | <b>Erläuterung zur Gyrator und Transformator</b> .....                                                  | <b>463</b> |
|           | <b>Literaturverzeichnis</b> .....                                                                       | <b>467</b> |
|           | <b>Sachverzeichnis</b> .....                                                                            | <b>481</b> |

Entwicklung Haptischer Geräte

Ein Einstieg für Ingenieure

Kern, T.A. (Hrsg.)

2009, XXX, 486 S. 289 Abb., Hardcover

ISBN: 978-3-540-87643-4