

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	xx
----------------------------	----

Teil I Grundlagen des haptischen Entwurfs

1 Motivation und Anwendungen haptischer Systeme	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
2 Begriffsklärungen	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
3 Biologische Grundlagen haptischer Wahrnehmung	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
4	Nutzermodellbildung	65
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	Taktiler System	90
4.4.3	Beispielanalysen im Zeit- und Frequenzbereich	91
4.5	Zusammenfassende Anmerkungen zur Anwendung der Methodik ..	95
5	Strukturen haptischer Systeme	97
5.1	Systembetrachtungen	97
5.1.1	Impedanz-gesteuert	98
5.1.2	Impedanz-geregelt	99
5.1.3	Admittanz-gesteuert	101
5.1.4	Admittanz-geregelt	102
5.1.5	Qualitative Gegenüberstellung der möglichen 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

6	Identifikation von Anforderungen	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
7	Methoden zur Regelung haptischer Systeme	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
8	Kinematikentwurf	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
9	Aktorentwurf	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	Piezoelektrische Aktoren	254
9.4.1	Der piezoelektrische Effekt	254
9.4.2	Bauformen und Eigenschaften piezoelektrischer Aktoren	259
9.4.3	Entwurf piezoelektrischer Aktoren für haptische Systeme	270
9.4.4	Vorgehen beim Entwurf piezoelektrischer Aktoren	270
9.4.5	Piezoelektrische 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
10	Kraftsensorentwurf	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
11	Einsatz von Positionssensoren	373
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
12	Schnittstellenauswahl	389
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
13	Softwareentwurf	403
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 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
14	Abschließende Betrachtung zum Entwurf haptischer Systeme	451

Teil III Anhang

15	URLs	457
16	Mechanische Impedanzen und Admittanzen bei translatorischen und rotatorischen Systemen	461
17	Erläuterung zur Gyrator und Transformator	463
	Literaturverzeichnis	467
	Sachverzeichnis	481