

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	5
2.1	Kommerzielle Lasertrackersysteme.....	5
2.2	Forschungsarbeiten	9
2.3	Ziel und Gliederung der Arbeit.....	12
3	Konzeption und Komponenten des Lasertrackers	15
3.1	Schematischer Aufbau des Systems.....	16
3.2	Funktionsprinzip der Zwei-Frequenz-Interferometrie	17
3.2.1	Merkmale der Heterodyn-Interferometrie	20
3.2.2	Aufbau des Einstrahlinterferometers	20
3.2.3	Receiver	21
3.3	Strahlteiler.....	22
3.4	Quadrantendiode.....	22
3.5	Bandpassfilter	24
3.6	Umlenkspiegel	24
3.7	Galvanometerscanner.....	25
3.8	Retroreflektoren	26
4	Modellierung und Entwurf	29
4.1	Theorie der Retroreflektoren.....	30
4.1.1	Tripelreflektoren	30
4.1.2	Katzenauge-Reflektoren	40
4.2	Regelung der Strahlnachführung	42
4.2.1	Modellierung des Galvanometerscanners.....	43
4.2.2	Modellierung der Quadrantendiode.....	45

4.2.3	Einfluss des Retroreflektors auf den Lichtweg	52
4.2.4	Reglerentwurf.....	54
4.2.5	Auswahl des Reglers	56
4.2.6	Abstandsanpassung.....	60
4.3	3D-Simulation der Nachführeinheit	65
4.3.1	Ablauf einer Simulation	65
4.3.2	Graphische Darstellung	69
4.3.3	Aufbau der optischen Bibliothek für das Simulink-Modell	71
4.3.4	Modellierung der Strahlbrechung.....	75
4.3.5	Modellierung der physikalischen Größen	76
4.3.6	Modellierung eines Teilstrahls bzw. Strahlbündels.....	77
4.3.7	Allgemeine Modellierung einer optischen Grenzfläche.....	78
4.3.8	Modellierung einer realen Grenzfläche	79
4.3.9	Vorgehen zur Kollisionsdetektion.....	80
4.3.10	Einfluss der Divergenz	84
4.3.11	Simulation der Rampenantwort mit 3D-Modell.....	84
4.4	Analytisches Modell des Lasertrackers	86
4.4.1	Modellierung des Strahlengangs im Scannersystem	86
4.4.2	Modellierung der inversen Kinematik.....	97
4.4.3	Einflussanalyse der Systemparameter des Lasertrackers	101
4.4.4	Entwicklung eines Algorithmus zur Kalibrierung.....	103
4.4.5	Sensitivitätsanalyse.....	105
4.4.6	Kalibrierung des Scannersystems.....	115
4.4.7	Simulation der Kalibrierung	121
4.4.8	Vorgehen zur dynamischen Schleppfehlerkorrektur	147
5	Realisierung	153
5.1	Reglerumsetzung und Verifikation.....	153
5.1.1	Mikrocontroller.....	153
5.1.2	Basisschaltung des analogen <i>PI</i> -Reglers	154
5.1.3	Online-Parameteranpassung des Reglers	155
5.1.4	Einfluss der Diskretisierung	159
5.1.5	Untersuchung der Regelgüte	160

5.1.6	Einstellung beliebiger Spiegelwinkel	162
5.1.7	Realisierung der Abstandsschätzung	164
5.1.8	Test der Abstandsschätzung	167
5.1.9	Test bei automatischer Abstandsanpassung.....	168
5.1.10	Vorgehen bei Strahlverlust	169
5.2	Signalverarbeitung mittels programmierbarer Logik.....	171
5.2.1	Anforderungen an die Signalverarbeitung.....	171
5.2.2	FPGA-Entwicklungsboard.....	173
5.2.3	Einfluss der Umgebung	174
5.2.4	Sensoren für die Umgebungskompensation	177
5.2.5	Digitalisierung der Spiegelwinkel	178
5.2.6	Aufbau der Signalverarbeitung.....	178
5.2.7	Aufbau der Signalverarbeitung innerhalb des FPGAs.....	180
5.2.8	VHDL vs. Elektronikentwicklung am Beispiel des Zählers....	181
5.2.9	Implementierung des Modells	184
5.2.10	Zusatzfunktionen der Signalverarbeitung.....	187
5.2.11	Praktische Umsetzung	188
5.3	Realisierung des Messkopfes.....	189
5.3.1	Aufbau der modularen Plattform.....	189
5.3.2	Ausrichtung der Komponenten.....	192
5.3.3	Materialien des Messkopfes	192
5.4	Messungen	193
5.4.1	Referenzsystem.....	193
5.4.2	Drift beim Anschalten.....	196
5.4.3	Einfluss des Reglers.....	199
5.4.4	Einfluss der AD-Wandler	202
5.4.5	Nahe Kalibrierung, ferne Kalibrierung.....	203
5.4.6	Punktstabilität	208
5.4.7	Wiederholgenauigkeit.....	211
5.4.8	Strukturqualität	213
6	Entwicklung neuer Komponenten	217
6.1	Entwicklung eines neuartigen Sensorarrays	217

6.1.1	Probleme des konventionellen Aufbaus	217
6.1.2	Aufbau des neuen Sensorarrays.....	218
6.1.3	Charakterisierung des Sensorarrays	221
6.2	Entwicklung eines Kunststoff-Katzenauge-Reflektors.....	223
6.2.1	Materialeigenschaften von Kunststoffen.....	223
6.2.2	Entwicklung eines Simulators für Katzenauge-Reflektoren ...	225
6.2.3	Mathematische Grundlagen des Simulators	226
6.2.4	Herstellung eines Katzenauge-Reflektors am IMTEK.....	235
6.2.5	Überprüfung der Funktion des IMTEK-Reflektors.....	241
6.2.6	Externe Herstellung eines Katzenauge-Reflektors	242
6.3	Entwicklung eines Receivers für die Zwei-Frequenz-Interferometrie ..	249
6.3.1	Anforderungen an den neuen Receiver	249
6.3.2	Umsetzung des Receivers.....	250
7	Diskussion	255
7.1	Technische Daten des Gesamtsystems	255
7.2	Optische Elemente	257
7.2.1	Einfluss des Laserkopfes	257
7.2.2	Einfluss des Interferometers	258
7.3	Regler.....	262
7.3.1	Eigenschaften des Reglers.....	262
7.3.2	Miniaturisierung des hybriden Reglers	265
7.4	Signalverarbeitung.....	266
7.5	Aktor	267
7.5.1	Aufbau des Aktors	267
7.5.2	Genauigkeit der Winkelmessung.....	269
7.5.3	Thermische Einflüsse	270
7.6	Modulares Systemkonzept.....	271
7.7	Kalibrierung.....	271
7.7.1	Optimale Kalibrierung.....	271
7.7.2	Fehler des Referenzsystems	272
7.7.3	Richtlinien zum Einsatz des Lasertrackers.....	275
7.8	Neuartige Komponenten.....	276

7.8.1	Diskussion des Sensorarrays.....	276
7.8.2	Diskussion des Katzenauge-Reflektors	277
7.8.3	Diskussion des Receivers	279
8	Zusammenfassung und Ausblick	281
9	Anhang	285
9.1	Mathematische Beschreibung der Zwei-Frequenz-Interferometrie	285
9.2	Hilfsfunktionen für das Aufstellen des analytischen Modells	290
9.2.1	Reflexion an einem Spiegel	290
9.2.2	Schnittpunkt einer Geraden mit einer Ebene	291
9.2.3	Rotationsmatrix zur Drehung eines Vektors.....	293
9.2.4	Herleitung der Drehmatrix.....	294
10	Literaturverzeichnis	297