

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
1 Geodätische Überwachungsmessungen	1
1.1 Inhalt und Bedeutung	1
1.1.1 Aufgaben geodätischer Überwachungsmessungen	1
1.1.2 Messobjekte und Zielsetzungen	4
1.1.3 Gesetzlicher und normativer Rahmen	8
1.1.4 Abgrenzung des Aufgabenspektrums	11
1.1.5 Erfassung von Deformationsvorgängen	16
1.2 Anforderungen an die Planung und Durchführung	18
1.2.1 Allgemeine Vorüberlegungen	18
1.2.2 Bezugssystem und Referenzrahmen	20
1.2.3 Geodätische Überwachungsnetze.....	22
1.2.4 Geometrische Diskretisierung.....	26
1.2.5 Zeitliche Diskretisierung.....	28
1.2.6 Messtechnische Aspekte	31
1.2.7 Sensornetze	35
1.2.8 Periodische und aperiodische Vorgänge	38
1.2.9 Qualitätsanforderungen an geodätische Überwachungsmessungen.....	42
1.3 Geschichtlicher Abriss	45
1.4 Literaturhinweise	48
2 Systemtheoretische Grundlagen und Modellklassen	55
2.1 Begriff des Systems	55
2.2 Ein-/Ausgangsbeziehungen eines Systems	57
2.3 Grundlegende Systemeigenschaften	60
2.3.1 Kausalität eines Systems	60
2.3.2 Statische und dynamische Systeme.....	61
2.3.3 Lineare Systeme.....	63
2.3.4 Zeitinvariante Systeme.....	64
2.3.5 Stabilität eines Systems.....	65
2.3.6 Invertierbarkeit eines Systems	66
2.4 Grundtypen von Ein-/Ausgangssignalen.....	66
2.5 Methoden der mathematischen Modellbildung.....	71
2.6 Auswertemodelle für Überwachungsmessungen	75
2.6.1 Klassifizierung der Auswertemodelle	76

2.6.2	Struktur- und Verhaltensmodelle	79
2.6.2.1	Model Approach und Operational Approach	79
2.6.2.2	„White box“-, „grey box“- und „black box“-Modelle	81
2.6.2.3	Gegenüberstellung von Verhaltens- und Strukturmodellen	86
2.7	Literaturhinweise	88
3	Grundlagen aus der Mechanik	91
3.1	Charakterisierung von Deformationsvorgängen	91
3.1.1	Begriffe der Starrkörperbewegung und der Verformung	92
3.1.2	Ursachen von Deformationsvorgängen.....	94
3.2	Klassifizierung der Mechanik, Materialgesetze	96
3.3	Grundlagen der Kinematik	99
3.4	Grundlagen der Elastostatik	105
3.4.1	Innere Kräfte und Momente	106
3.4.2	Spannung und Beanspruchung	109
3.4.3	Elastische Formänderung	110
3.4.4	Bestimmung von Biegelinien	113
3.5	Abriss der Methode der finiten Elemente	122
3.6	Setzungserscheinungen aus Sicht der Bodenmechanik.....	128
3.7	Literaturhinweise	131
4	Statistik	133
4.1	Grundbegriffe der Auswertung von Messungen	133
4.1.1	Eindimensionale Messgrößen und -ergebnisse	135
4.1.1.1	Erwartungswert, Wahrer Wert, Mittelwert	135
4.1.1.2	Varianz und Standardabweichung.....	136
4.1.1.3	Ermittlung von Messunsicherheiten.....	138
4.1.1.4	Monte-Carlo-Methode	141
4.1.1.5	Einhaltung von Toleranzen	143
4.1.2	Mehrdimensionale Messergebnisse	144
4.1.3	Kovarianzfortpflanzungsgesetz.....	145
4.1.4	Verteilungsfunktion und Wahrscheinlichkeitsdichte	146
4.2	Wahrscheinlichkeitsverteilungen	148
4.2.1	Normalverteilung	148
4.2.2	χ^2 -Verteilung	149
4.2.3	Student- oder t -Verteilung	150
4.2.4	Fisher- oder F -Verteilung	151
4.2.5	Beziehungen zwischen den Verteilungsfunktionen	151
4.3	Grundzüge der Testtheorie.....	152
4.3.1	Hypothesenbildung und Hypothesentest.....	153
4.3.2	Fehlentscheidungen 1. und 2. Art, Testgüte.....	154

4.3.3	Tests für eindimensionale Zufallsgrößen	157
4.3.3.1	Mittelwert und theoretische Standardabweichung	157
4.3.3.2	Mittelwert und empirische Standardabweichung	158
4.3.3.3	Differenz zweier unkorrelierter Messwerte	158
4.3.3.4	Differenz zweier korrelierter Messwerte	160
4.3.3.5	Differenz zweier Zufallsvektoren	161
4.3.3.6	Test einer empirischen und theoretischen Varianz	161
4.3.3.7	Test zweier empirischen Varianzen	162
4.4	Konfidenzmaße	162
4.4.1	Konfidenzbereiche	163
4.4.1.1	Konfidenzbereich für den Erwartungswert	163
4.4.1.2	Konfidenzbereich für die Varianz	163
4.4.2	Konfidenzschätzung für mehrdimensionale Zufallsgrößen	164
4.4.2.1	Globale Konfidenzmaße	165
4.4.2.2	Optimalitätskriterien	167
4.4.2.3	Lokale Konfidenzmaße	167
4.4.3	Konfidenzmaße für Funktionen eines Zufallsvektors	168
4.4.4	Theoretische Varianz und Standardkonfidenzmaße	168
4.5	Literaturhinweise	169
5	Ausgleichsrechnung	172
5.1	Lineare Schätzmodelle	173
5.1.1	GAUSS-MARKOV-Modell	173
5.1.1.1	Parameterschätzung	174
5.1.1.2	Rangdefekte im funktionalen Modell	177
5.1.1.3	Elimination von Unbekannten	182
5.1.2	Erweiterte Schätzmodelle	184
5.1.2.1	Vermittelnde Ausgleichung mit Bedingungen	184
5.1.2.2	Bedingte Ausgleichung	186
5.1.2.3	Bedingte Ausgleichung mit Unbekannten	187
5.2	Lineare Hypothese und quadratische Formen	188
5.3	Sequenzielle Ausgleichung	189
5.4	Varianz- und Varianzkomponentenschätzung	193
5.4.1	Schätzung der Einheitsvarianz	194
5.4.2	Varianzkomponentenschätzung	195
5.5	Regression	197
5.5.1	Regressionsmodell	197
5.5.2	Güte der Regression	200
5.6	Kollokation	204
5.6.1	Ausgleichung, Filterung und Prädiktion	205
5.6.2	Ermittlung der Schätzgrößen	208

5.7	Alternative Schätzverfahren.....	210
5.7.1	Einflussfunktionen von Schätzverfahren	211
5.7.2	L_p -Schätzer	213
5.7.3	M-Schätzer	214
5.8	Literaturhinweise	216
6	Netzanalyse	219
6.1	Geodätisches Datum	219
6.1.1	Datumsparameter	220
6.1.2	Konventionelles geodätisches Datum	222
6.1.3	Freie Netzausgleichung.....	224
6.1.3.1	Bedingungsgleichungen zur Verfügung über das Datum	224
6.1.3.2	Freie Netzausgleichung mit varianzfreier Rechenbasis	226
6.1.3.3	Freie Netzausgleichung mit Teilspurminimierung.....	228
6.1.3.4	Freie Netzausgleichung mit Gesamtspurminimierung.....	229
6.1.4	Netzausgleichung unter Zwang.....	230
6.1.5	„Schwaches“ Datum	232
6.1.6	Datumstransformationen.....	232
6.1.7	Datumsinvariante Größen	236
6.2	Genauigkeit	236
6.2.1	Globale Genauigkeitsmaße	237
6.2.2	Hauptkomponentenanalyse	238
6.2.3	Zweidimensionale Genauigkeitsmaße	240
6.2.4	Skalare Genauigkeitsmaße.....	244
6.3	Zuverlässigkeit	245
6.3.1	Grundlagen.....	245
6.3.2	Maße für die innere Zuverlässigkeit	246
6.3.3	Maße für die äußere Zuverlässigkeit.....	249
6.3.4	Hebelbeobachtungen	250
6.4	Sensitivität.....	251
6.4.1	Grundlagen der Sensitivitätsanalyse in Überwachungsnetzen.....	252
6.4.2	Testen von Deformationsmodellen	254
6.4.3	Sensitivität und Hauptkomponenten	257
6.5	Literaturhinweise	257
7	Transformationen.....	260
7.1	Ähnlichkeitstransformation.....	261
7.1.1	Räumliche Ähnlichkeitstransformation	261
7.1.2	Räumliche Ähnlichkeitstransformation mit kleinen Drehwinkeln.....	264
7.1.3	HELMERT-Transformation.....	266
7.1.3.1	Gewichtete HELMERT-Transformation	267

7.1.3.2	Netzverschmelzung.....	269
7.1.4	Ähnlichkeitstransformation im GAUSS-HELMERT-Modell	273
7.2	Affintransformation	275
7.2.1	Affine Abbildung	275
7.2.2	Streckenverzerrung	281
7.2.3	Winkelverzerrung.....	282
7.2.4	Flächenverzerrung.....	283
7.2.5	Berechnung der Verzerrungsmatrix	284
7.2.6	Weitere Verformungsparameter.....	289
7.2.7	Auswirkung von Ähnlichkeits- und Datumstransformationen.....	289
7.3	Beurteilung von Transformationsergebnissen.....	291
7.4	Literaturhinweise	294
8	KALMAN-Filterung	297
8.1	Das Problem des Navigators	298
8.2	Beziehungen zwischen KALMAN-Filterung und DIN 1319	300
8.2.1	DIN 1319 – Grundnorm der Auswertung von Messungen	300
8.2.2	Übertragung der Grundgedanken auf das KALMAN-Filter.....	303
8.3	Zustandsschätzung im GAUSS-MARKOV-Modell.....	305
8.3.1	Ausgleichungsansatz und rekursive Filtergleichungen	306
8.3.2	Statistische Innovationsbewertung und Filterredundanzen.....	309
8.4	Möglichkeiten der Systembeschreibung im KALMAN-Filter	314
8.4.1	Formulierung der Systemgleichung	314
8.4.2	Adaptive Erweiterung des Filteransatzes	317
8.4.3	Formfilter	320
8.4.3.1	Motivation und Algorithmus.....	320
8.4.3.2	Beispiel für ein Formfilter.....	321
8.5	Das KALMAN-Filter im Kontext der BAYES-Schätzung	326
8.6	Anwendungsmöglichkeiten bei Überwachungsmessungen	330
8.7	Literaturhinweise	337
9	Zeitreihenanalyse	339
9.1	Darstellungen einer Zeitreihe im Zeitbereich.....	339
9.1.1	Autokovarianzfunktion	341
9.1.2	Kreuzkovarianzfunktion.....	347
9.1.3	Füllen von Datenlücken	349
9.2	Darstellungen einer Zeitreihe im Frequenzbereich	351
9.2.1	Grundlagen und Begriffe	352
9.2.2	Leistungsspektrum	355
9.2.2.1	WIENER-CHINTCHIN-Theorem.....	356
9.2.2.2	Interpretation des Leistungsspektrums.....	357

9.2.2.3	Berechnung und Schwierigkeiten der Interpretation.....	358
9.2.2.4	Fast-FOURIER-Transformation	366
9.2.3	Periodogramm.....	368
9.2.4	Spektrale Analyse langer Perioden	369
9.3	Filterung einer Zeitreihe.....	370
9.3.1	Bedeutung der Filterung.....	372
9.3.2	Grundlegende Beziehungen bei der Filterung von Zeitreihen	373
9.3.2.1	Darstellungen im Zeitbereich.....	373
9.3.2.2	Darstellung im Frequenzbereich	374
9.3.3	Beispiel zur mathematischen Filterung einer Zeitreihe.....	377
9.3.4	Physikalische Filter	380
9.4	Darstellung einer Zeitreihe im Zeitfrequenzbereich	382
9.4.1	Kontinuierliche Wavelet-Transformation	384
9.4.1.1	Einführung der kontinuierlichen Wavelet-Transformation.....	384
9.4.1.2	Lokalisierungseigenschaften	386
9.4.1.3	Approximationseigenschaften.....	388
9.4.1.4	Abbildungseigenschaften	391
9.4.2	Diskrete Wavelet-Transformation.....	393
9.4.2.1	Wavelet-Rahmen.....	393
9.4.2.2	Multiskalenanalyse.....	394
9.4.2.3	Schnelle Wavelet-Transformation	397
9.4.2.4	Schnelle Wavelet-Transformation als Isometrie	398
9.4.2.5	Wavelet-Filter	399
9.4.2.6	Undezimierte Wavelet-Transformation	403
9.5	Literaturhinweise	407
10	Künstliche Neuronale Netze und Fuzzy-Theorie	410
10.1	Künstliche Neuronale Netze	410
10.1.1	Motivation der Betrachtung Künstlicher Neuronaler Netze	411
10.1.2	Netzstruktur.....	413
10.1.2.1	Einfache Netzstrukturen.....	413
10.1.2.2	Komplexe Netzstrukturen	416
10.1.3	Parameterschätzung in KNN.....	418
10.1.3.1	Einführende Aspekte.....	418
10.1.3.2	Methode des steilsten Abstiegs	420
10.1.3.3	Gradientenschätzung in einfachen Netzstrukturen.....	422
10.1.3.4	Gradientenschätzung in komplexen Netzstrukturen	424
10.1.3.5	Wahl der Lernrate	426
10.1.3.6	Abbruchkriterien des iterativen Prozesses	429
10.1.3.7	Weitere Verfahren der Parameterschätzung.....	430
10.1.4	Modellstruktur eines KNN.....	434
10.1.4.1	Sigmoidale Aktivierungsfunktionen	434

10.1.4.2	Anzahl verborgener Schichten und der in ihnen enthaltenen Knoten...	439
10.1.5	Datenvorverarbeitung.....	446
10.2	Fuzzy-Theorie für die Deformationsanalyse.....	448
10.2.1	Einordnung in die Thematik.....	449
10.2.2	Unscharfe Mengen.....	452
10.2.3	Mengenoperationen mit unscharfen Mengen.....	456
10.2.4	Algebraische Operationen mit unscharfen Mengen.....	460
10.2.5	Unscharfe Relationen.....	463
10.2.6	Unscharfe Prozessmodellierung.....	467
10.2.6.1	Linguistische Variablen.....	467
10.2.6.2	Unscharfe Modellbildung.....	468
10.2.6.3	TAKAGI-SUGENO-Regelsystem.....	474
10.2.6.4	Herleitung des Regelsystems.....	475
10.2.6.5	Beispiele zur Modellbildung mit Methoden der Fuzzy-Theorie.....	480
10.3	Literaturhinweise.....	484
11	Kongruenzmodell.....	488
11.1	Basismodell.....	488
11.2	Globaltest.....	492
11.2.1	Ausgleichung der Einzelepochen.....	492
11.2.2	Hypothesenformulierung und Testentscheid.....	493
11.2.2.1	Explizite Hypothesenformulierung.....	494
11.2.2.2	Implizite Hypothesenformulierung.....	498
11.2.2.3	Durchführung des Globaltests.....	499
11.3	Lokalisierung signifikanter Punktverschiebungen.....	500
11.3.1	Prinzipielles Vorgehen.....	500
11.3.2	Klaffungszerlegung und Lokalisierung.....	501
11.3.2.1	Näherungsweise Lokalisierung.....	501
11.3.2.2	Lokalisierung durch Klaffungszerlegung nach GAUSS.....	503
11.3.2.3	Lokalisierung durch Klaffungszerlegung nach CHOLESKY.....	505
11.3.2.4	Klaffungszerlegung auf spektraler Basis.....	507
11.3.2.5	Lokalisierung bei implizit formulierter Nullhypothese.....	507
11.3.3	Identitätsanalyse von Punktgruppen.....	508
11.3.3.1	Zweistufiger Netzaufbau.....	508
11.3.3.2	Rückwärts- und Vorwärtsstrategie.....	509
11.3.4	Kongruenzüberprüfung bei mehreren Messepochen.....	510
11.3.5	Darstellung und Bewertung der Verschiebungsvektoren.....	512
11.3.5.1	Endgültige Ausgleichung und Deformationsellipsen.....	512
11.3.5.2	Stochastische Bewertung der Verschiebungsvektoren.....	513
11.4	Generalisierung und geometrische Interpretation.....	514
11.4.1	Polynomentwicklung.....	515
11.4.2	Blockbewegungen.....	516

11.4.3	Strainanalyse	518
11.5	Literaturhinweise	521
12	Kinematisches Modell	524
12.1	Anwendungsmöglichkeiten und Bedeutung	524
12.2	Einfaches kinematisches Modell.....	526
12.2.1	Kinematische Netzbetrachtung	527
12.2.2	Zeitliches Referenzsystem	528
12.2.3	Erweiterte kinematische Modelle.....	529
12.3	Aufdatierung durch KALMAN-Filtertechniken	534
12.3.1	Prädiktionsgleichung.....	534
12.3.2	Messgleichung	539
12.3.3	Aufdatierung	539
12.4	Aufbereitung von Messreihen.....	541
12.4.1	Approximation durch geschlossene Polynome	541
12.4.1.1	Gewöhnliche Polynomapproximation.....	542
12.4.1.2	Approximation periodischer Vorgänge.....	542
12.4.1.3	Polynomapproximation mit Kollokation.....	543
12.4.2	Approximation durch stückweise Polynome	544
12.4.2.1	Polygone	545
12.4.2.2	Kubische Splines.....	545
12.4.2.3	Rationale und ausgleichende Splines	546
12.5	Kinematische Analyse und Modellierung von Zeitreihen.....	548
12.5.1	Komponentenanalyse einer Zeitreihe.....	548
12.5.2	Konfidenzbänder.....	552
12.5.3	Kinematisches Modell im Zeitfrequenzbereich	557
12.6	Literaturhinweise	561
13	Statisches Modell	564
13.1	Anwendungsmöglichkeiten und Bedeutung	564
13.1.1	Anwendungsvoraussetzungen	564
13.1.2	Beurteilung der Ausgangsseite, Verhaltensmodelle.....	566
13.1.3	Beurteilung des Übertragungsverhaltens, Strukturmodelle	566
13.2	Statische Modellierung mittels KALMAN-Filterung.....	568
13.2.1	Prädiktionsgleichung.....	568
13.2.1.1	Bezug zur Mechanik	568
13.2.1.2	Stütz- und Objektpunkte	570
13.2.1.3	Materialparameter, adaptive Filterung	570
13.2.2	Messgleichung	572
13.2.3	Beispiel	573
13.2.4	Aufdatierung, Modellbeurteilung.....	576

13.2.5	Strain- und Stressanalyse im Post-Processing.....	577
13.3	Statische Modellierung mittels Regression.....	579
13.4	Integrierte Analyse.....	581
13.5	Literaturhinweise.....	586
14	Dynamisches Modell.....	589
14.1	Abgrenzung zum kinematischen und statischen Modell.....	589
14.2	Nichtparametrische Ansätze durch Verhaltensmodelle.....	591
14.3	Parametrische Ansätze durch Strukturmodelle.....	596
14.3.1	Zustandsraummethodik.....	598
14.3.1.1	Quantifizierung dynamischer Strukturmodelle.....	598
14.3.1.2	Lösung von Differenzialgleichungen im Zustandsraum.....	600
14.3.2	Parametrische Identifikation dynamischer Strukturmodelle.....	611
14.4	Literaturhinweise.....	622
15	Hinweise auf Anwendungen.....	625
15.1	Ausgewählte Messobjekte.....	626
15.1.1	Brücken.....	626
15.1.2	Dämme.....	629
15.1.3	Turmartige Bauwerke.....	631
15.1.4	Tunnel.....	632
15.1.5	Maschinenanlagen.....	634
15.1.6	Schleusen.....	635
15.1.7	Sonstige Ingenieurbauwerke.....	636
15.1.8	Rezente Krustenbewegungen.....	637
15.1.9	Bodensenkungen.....	641
15.1.10	Rutschungen.....	642
15.1.11	Gletscher und Schelfeis.....	646
15.2	Zuordnung der Anwendungsbeispiele zu Methoden und Modellen	646
16	Aktuelle Entwicklungen.....	650
16.1	Gegenwärtiger Stand, Herausforderungen.....	650
16.2	Flächenhafte Erfassung von Deformationen.....	653
16.3	Prozessbegleitende Überwachungsaufgaben.....	657
16.4	Große Datenmengen, Wissensschöpfung.....	662
16.5	Literaturhinweise.....	666
	Anhang: Literaturhinweise – Abkürzungen.....	671
	Stichwortverzeichnis.....	673