

# Inhalt

1	Einleitung . . . . .	1
2	Was ist das Kalman-Filter kurzgefaßt? . . . . .	5
2.1	Wichtige Begriffe . . . . .	5
2.2	Definition des Kalman-Filters . . . . .	6
2.3	Was läßt sich mit dem Kalman-Filter erreichen? . . . . .	6
3	Wo sind in der Wasserwirtschaft die Voraussetzungen zur vorteilhaften Anwendung des Kalman-Filters gegeben? . . . . .	9
3.1	Voraussetzungen für die Anwendung des Kalman-Filters . . . . .	9
3.1.1	Modellanforderungen . . . . .	10
3.1.2	Meßanforderungen . . . . .	10
3.1.3	Algorithmusanforderungen . . . . .	11
3.2	Anwendungsmöglichkeiten für das Kalman-Filter in der Wasserwirtschaft . . . . .	11
3.2.1	Abflußvorhersage . . . . .	11
3.2.2	Vorhersage der Gewässergüte . . . . .	12
3.2.3	Steuerung wasserwirtschaftlicher Systeme . . . . .	13
3.2.4	Grundwassersysteme . . . . .	13
3.2.5	Erfassung flächenhafter Prozesse . . . . .	14
3.2.6	Beurteilung von Modellen . . . . .	14
3.3	Zusammenfassung und Folgerungen . . . . .	15
4	Problemformulierung für die Anwendung des Kalman-Filters . . . . .	19
4.1	Modelle in Zustandsformulierung . . . . .	19
4.2	Beispiele für die Zustandsformulierung . . . . .	23
4.2.1	Markovkette (Eigenschaften der Zustandsübertragungsmatrix) . . . . .	23

4.2.2	Speicher-kaskade (Diskretisierung kontinuierlicher Modelle) . . . . .	24
4.3	Modell- und Meßfehler . . . . .	27
4.4	Hinweise zur Beschaffung der notwendigen Vorabinformationen . . . . .	28
4.5	Praktische Vorgehensweise bei der Anwendung des Kalman-Filters . . . . .	29
4.5.1	Vorbereitung . . . . .	29
4.5.2	Berechnung . . . . .	30
5	Wie wird der Kalman-Filter-Algorithmus formuliert? . . . . .	31
6	Demonstrationsbeispiele . . . . .	37
6.1	Kalman-Filter zur optimalen Zustandsschätzung . . . . .	37
6.2	Kalman-Filter für Parameterschätzung . . . . .	40
7	Unterschiede des Kalman-Filters zu vergleichbaren Schätzverfahren . . . . .	45
7.1	Gliederung der Schätzverfahren . . . . .	45
7.2	Vergleich der Schätzverfahren anhand der Besonderheiten des Kalman-Filters . . . . .	47
7.2.1	Zustandsformulierung des Modells . . . . .	47
7.2.2	Modellkonzeption . . . . .	48
7.2.3	Schätzprinzip . . . . .	50
7.2.4	Verarbeitung neuer Daten . . . . .	52
8	Anwendungsbeispiele . . . . .	55
8.1	Kurzzeitvorhersagen des Gebietsniederschlags . . . . .	55
8.1.1	Prozeßmodell und Messungen . . . . .	56
8.1.2	Störgrößen . . . . .	57
8.1.3	Verifikation . . . . .	59
8.2	Berücksichtigung von Modellrechnungs- und Meßfehlern bei der Berechnung von Grundwasserständen . . . . .	61
8.2.1	Finite-Elemente-Modell und Zustandsformulierung . . . . .	61
8.2.2	Das Kalman-Filter . . . . .	63
8.2.3	Das Konzept des synthetischen Beispiels . . . . .	67
8.2.4	Anwendungsbeispiel . . . . .	68

8.3	Hochwasservorhersage im Einzugsgebiet der Sulm . . . . .	71
8.3.1	Beschreibung des Niederschlag-Abfluß-Modelles . . . . .	71
8.3.2	Zustandsformulierung . . . . .	72
8.3.3	Startwerte für das Kalman-Filter . . . . .	76
8.3.4	Ermittlung der Modell- und Meßfehlervarianzen . . . . .	77
8.3.5	Ergebnisse für das Hochwasserereignis vom Mai 1978 . . . . .	79
8.4	Ein Modell zur Gewässergüteüberwachung . . . . .	83
8.4.1	Ein modifiziertes Streeter-Phelps-Modell . . . . .	83
8.4.2	Datenmaterial . . . . .	84
8.4.3	Berechnung der Gewässergüteparameter . . . . .	85
8.4.4	Sensitivitätsuntersuchungen . . . . .	89
9	Literaturverzeichnis . . . . .	91
9.1	Grundlagen des Kalman-Filters . . . . .	92
9.2	Anwendungen des Kalman-Filters in Hydrologie und Wasserwirtschaft . . . . .	98
9.3	Anwendungen des Kalman-Filters in anderen wissenschaftlichen und technischen Disziplinen . . . . .	106
10	Anhang . . . . .	107
10.1	Mathematische Grundlagen des Kalman-Filters – Lineare Algebra . . . . .	107
10.2	Mathematische Grundlagen des Kalman-Filters – Stochastik . . . . .	111
10.2.1	Grundlegende Definitionen . . . . .	111
10.2.2	Erwartung, Varianz und Kovarianz . . . . .	112
10.2.3	Stochastische Prozesse . . . . .	115
10.3	Herleitung des zeitdiskreten Kalman-Filters . . . . .	116
10.4	Auswahl von englischen Fachausdrücken . . . . .	125