

### III Kalman-Filter

Im allgemeinen Sprachgebrauch benutzt man das Wort „schätzen“ immer dann, wenn man eine Aussage nur mit einer gewissen Unsicherheit treffen kann, deren man sich bewußt ist. Bei wissenschaftlichen Aussagen in diesem Sinne besteht das Problem des Schätzens seit man Beobachtungen und Messungen auswertet, systematisiert und eventuell für Vorhersagen künftiger Versuchsergebnisse benutzt. Erste nachweisbare Quellen hierzu hat man schon in Aufzeichnungen der Babylonier gefunden [31], systematische Auswertungen bei Galilei. Über zahlreiche Zwischenstationen, auf die hier nicht eingegangen werden kann, gelangt man schließlich zu Gauß, dessen grundlegende und umfangreiche Arbeiten über die allgemeine Fehlertheorie, insbesondere über Vorhersagen mit minimaler Fehlervarianz, u.a. den Astronomen zur Vorhersage des Mondes Ceres verholten haben – ein oft zitiertes Beispiel für die Leistungsfähigkeit dieser Verfahren.

Von hier aus führt eine direkte Verbindung zu den Arbeiten Wieners über Optimalfilter zur Minimierung von Störgeräuscheinflüssen in der Nachrichten- und Regelungstechnik [32], wobei allerdings der heute übliche Terminus „Schätzung von Zustandsgrößen“ noch weitgehend im Hintergrund blieb; begrifflich steht bei Wiener das Filterproblem im Mittelpunkt. Die zugehörigen Lösungsverfahren sind beschränkt auf stationäre Prozesse, deren Leistungsdichtespektren in Produktform angesetzt werden können. Der realisierbare Anteil, der sogenannte „kanonische Faktor“, führt nach einigen zusätzlichen Operationen zu dem optimalen realisierbaren Filterfrequenzgang (s. Kap. 16). Erste zivile Anwendungen von Wieners Theorie finden sich bei Modulationssystemen der Nachrichtentechnik und bei der optimalen Auslegung von Phasenregelkreisen [33]. Der Wienersche Ansatz erfuhr in der Folgezeit mehrfach Verallgemeinerungen, die aber nicht zu einem entscheidenden Durchbruch für breitere Anwendungsbereiche führten.

Den herausragenden Schritt beging R.E. Kalman [34] durch den gezielten Übergang zu einem „dynamischen Modell“ für ein Signal oder Grundsystem sowie zu instationären stochastischen Prozessen, indem er das Systemeingangsrauschen und das Meßrauschen durch instationäre weiße Geräusche modellierte, die durch ihre Kovarianzeigenschaften gekennzeichnet waren. Kalman gibt nicht – wie Wiener – den optimalen Filterfrequenzgang als Zielsetzung vor, sondern einen allgemeinen, ursprünglich diskreten Filteralgorithmus an, der durch Algebraisierung des Gesamtproblems zahlreichen Fragen möglicher Anwendungen unmittelbar angemessen ist. In der Folgezeit hat Kalman

zusammen mit Bucy [35] die analoge Version publiziert, die an klassische kontinuierliche Filterverfahren und Strukturen anknüpft, die den Charakter der „modellgestützten“ Filterung noch deutlicher erkennen lassen. Mit der Beschreibung der Modelle durch Zustandsgleichungen wurde auch der Gesichtspunkt der Bildung optimaler Schätzwerte für verrauschte Zustandsgrößen deutlich hervorgehoben. Die Kalmanschen Arbeiten fanden eine vorläufige Abrundung in den sechziger Jahren durch seine Publikationen über die Stabilität der Filter und die Zusammenhänge mit der stochastischen Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit [36] des Signalmodells bzw. des Grundsystems.

Das Kalman-Filter wird in dem allgemeineren Rahmen des *Beobachterentwurfs* gesehen: Ein modellgestütztes Konzept, bei dem das Modell eines gegebenen Grundsystems in einer Regelschleife liegt, korrigiert mit einer Gewichtung, die über ein dynamisches Kriterium zum deterministischen Luenberger-Beobachter und über ein statistisches Kriterium zum Kalman-Beobachter führt. Insbesondere bei dem vergleichsweise aufwendigen Entwurf von Beobachtern reduzierter Ordnung ist diese gemeinsame Ansatzbasis von Vorteil.

Modellgestützte Verfahren sind auch in anderen Zusammenhängen bekannt geworden, so bei adaptiven Regelungen mit parallel betriebenen Modellen der Strecken, bei der Schätzung von Streckenparametern und mit unmittelbarer Strukturgleichheit bei der Zustandsregelung.

Die modellgestützten Meßverfahren spielen eine zunehmende Rolle bei der Entwicklung von Sensortechniken für die Prozeßleittechnik [70], weil sie über die Modellierung eine Art „a priori – Wissen“ über den verfahrenstechnischen Prozeß einbringen und optimal gefilterte Schätzwerte für nicht meßbare (aber beobachtbare) Systemzustände zur Verwendung in Prozeßregelungskonzepten liefern. In die gleiche Anwendungskategorie fällt der Einsatz von Kalman-Beobachtern zur Vorausschätzung kritischer Reaktorzustände in Sicherheits- und Überwachungssystemen. In diesem Zusammenhang sind auch die Einsatzbereiche von Kalman-Beobachtern zur Fehlererkennung und -Korrektur bei diskreten Regelungssystemen zu nennen, die sowohl in der Verfahrenstechnik als auch in der Luft- und Raumfahrt zu finden sind [71].

Besonders hohe Anforderungen werden bei der Modellierung von Flugkörpern gestellt, weil sowohl die Komplexität (im klassischen Sinn) der Systeme als auch die Sicherheitsanforderungen sehr hoch sind [50]. Dabei werden sowohl nichtlineare als auch lineare Zustandsmodelle angesetzt, und Kalman-Beobachter werden zur optimalen Schätzung der Flugeschwindigkeit, des Anstellwinkels und des Schiebewinkels eines Flugzeugs verwendet [72]. Ebenfalls in den Anwendungsbereich der Flugtechnik gehören mit Kalman-Beobachtern arbeitende Lenksysteme [73]. Hier erfolgt die Signalverarbeitung im Flugkörperlenksystem mit Kalman-Filtern zur Erfassung, Diskrimination und Verfolgung von Zielen unter komplexen und stark gestörten Umgebungsbedingungen. Ferner werden digital arbeitende Kalman-Filter im geschlossenen Regelkreis der Endanflugphase mit hoher Dynamik eingesetzt; vergleichbare Situationen liegen bei der Einweisung von Flugzeugen bei schlechten Sichtverhältnissen durch Fluglotsen im Tower vor.

Die Alternativbezeichnung Kalman-„Filter“ weist auf zahlreiche Einsatzmöglichkeiten in der Nachrichtentechnik hin; sie werden zum Teil exemplarisch im Rahmen von Beispielen zu einigen der folgenden Kapitel vorgestellt. In diesem Zusammenhang ist ein ebenfalls in der Praxis bewährter Vorläufer des „Kalman-Tracking Filters“ in Gestalt eines optimalen Frequenznachlaufsystems zum Empfang stark gestörter Signale von Navigationsatelliten (Wienersches Optimalfilter) zu erwähnen [74].

Der mit Abstand größte Teil technischer Realisierungen von Kalman-Beobachtern erfolgt in Digitaltechnik, ein Umstand, dem insbesondere die einschlägigen Bücher von Brammer/Siffing [45], Schrick [47] und Krebs [75] (für nichtlineare Filterung) sowie die zunehmende Anzahl von Fachaufsätzen Rechnung tragen.

In dem vorliegenden Buch mit überwiegend einführendem und theoretischem Charakter wird besonderes Gewicht auf die Entwicklung und den Entwurf *kontinuierlich* arbeitender Kalman-Filter gelegt, auf die aus didaktischen und entwicklungsgeschichtlichen Gründen nicht verzichtet werden kann, da sie unabdingbares *Hintergrundwissen* für weitere technische Anwendungen darstellt. Dem (gelegentlich recht unbefangenen) Umgang mit den heutigen digitalen und damit programmorientierten Realisierungsmöglichkeiten soll gezielt das physikalisch-technische Grundverständnis der kontinuierlichen modellgestützten Filterung vorangestellt werden.

Dem *diskret* arbeitenden Kalman-Filter sind die beiden letzten Kap. 25 und 26 mit 11 Abschnitten gewidmet, in denen u.a. der Entwurf des Filters voller sowie reduzierter Ordnung in der  $z$ -Ebene ausführlich behandelt werden. Hier werden neuere Arbeiten von Hippe und Wurmthaler [52, 57, 63] zum Frequenzbereichsentwurf zeitdiskret arbeitender Kalman-Beobachter reduzierter Ordnung erstmals in Lehrbuchstoff umgesetzt.