

# Einsatz eines Beobachters für den Luftspalt einer hybridmagnetischen Schwebeanordnung

Th. Friedrich, K. Kahlen, G. Henneberger

429

**Übersicht** Für ein hybriderregtes Magnetschwebefahrzeug besteht eine Regelung, die mit Hilfe eines Luftspaltsensors ein stabiles Schwebeverhalten ermöglicht. Die in diesem Artikel beschriebenen Untersuchungen haben ergeben, daß mit Hilfe eines Beobachters, der nur noch die einfach messbaren Größen Strom und Spannung als Eingangsgrößen enthält, der Systemzustand der Anordnung gut vorhergesagt werden kann. Für die eingesetzte Zustandsregelung kann anstelle eines Luftspaltsensors dieser Schätzwert verwendet werden.

## Operation of an observer for the airgap of a hybridmagnetic levitated system

**Contents** For a hybrid-excited magnetic levitated vehicle exists a controller, which operates in a stable way with the aid of an airgap sensor. This article points out, that the state of the system can be predicted with the aid of an observer, which uses only the current and the voltage measurable in an easy way. With the state-controller the estimated state vector can be used in that way, that the airgap sensor, which was used before, is not necessary anymore.

### 1

#### Einleitung

Das hier betrachtete Magnettragesystem wurde ursprünglich als Förderfahrzeug konzipiert [5]. Die Vorteile der magnetischen Lagerung liegen dabei vor allem in der Verschleißfreiheit und der Reduzierung der Antriebsenergie. Je nach Systemart des magnetischen Schwebens sind gewisse Vorteile aber auch Nachteile gegeben. Daher ist es entscheidend, die Wahl der Schwebeart abhängig vom späteren Einsatzgebiet zu treffen. Da das geplante Fahrzeug nur für kleine Geschwindigkeiten ausgelegt werden sollte ( $\leq 3$  m/sec), aber auch in einem relativ energiearmen Zustand betrieben werden muß, fiel die Entscheidung auf das elektromagnetische Schweben mit zusätzlicher Verwendung von Permanentmagneten. Grundidee hierbei ist, daß das Eigengewicht des Fahrzeuges und eine vorgegebene Zuladung bei einer bestimmten Luftspaltweite durch die anziehenden Kräfte der Permanentmagneten getragen wird. Je nach Masseänderung wird der Luftspalt entsprechend angepaßt. Da es sich bei diesem Schwebe-Zustand um eine instabile Gleichgewichtslage handelt, muß das System geregelt betrieben werden. Hierzu dienen elektrisch erregte Spulen. Eine aktive seitliche Führung ist nicht notwendig, da das Fahrzeug durch die Reluktanzkraft der Mag-

neten geführt wird. Bei den folgenden Untersuchungen wird nur ein einzelner Tragnagnet betrachtet. Die gegenseitige Beeinflussung der Magnete an einem Fahrzeug bleibt dabei unberücksichtigt. Außerdem wird nur die Bewegung in anziehender bzw. abstoßender Richtung behandelt. Der Einfluß der Bewegung in Fahrtrichtung auf das Schwebeverhalten wurde vorerst nicht betrachtet. Die zu untersuchende Fragestellung ist, inwieweit der benötigte Luftspaltsensor ersetzt werden kann. Der Luftspalt soll mit Hilfe eines Beobachters geschätzt und dann zur Regelung eingesetzt werden. Hauptgrund zur Einsparung der Sensoren ist der Kostenfaktor. Allerdings ergibt sich dann ein erhöhter Aufwand in der Meßdatenerfassung und -verarbeitung. Ferner könnte der Beobachter auch als redundantes System eingesetzt werden, um die Betriebssicherheit des Schwebefahrzeuges zu erhöhen. Der für diese Aufgabenstellung zu entwickelnde Beobachter wird auf Grundlage des Kalman-Filter-Algorithmus' entworfen. Dieser ermöglicht es, auch bei Fehlereinflüssen durch ungenaue Systembeschreibung bzw. Ungenauigkeiten in der Meßwerterfassung, den Systemzustand gut zu schätzen. Der Fehler kann dabei minimiert, aber nicht ganz eliminiert werden.

### 2

#### Beschreibung des Hybridmagneten

Bei dem hier verwendeten Hybridmagneten handelt es sich um eine Kombination aus Permanentmagneten und elektrischen Spulen. Bild 1 zeigt einen Querschnitt durch den Aufbau.

Auf einem geblechten U-Profil, welches zum späteren Fahrzeug gehört, sind dünne Permanentmagnete aufgeklebt. Den magnetischen Rückschluß bildet eine massive Stahlschiene, die den Fahrweg darstellt. Da der gewünschte Arbeitspunkt, bei dem die Permanentmagnete durch ihre anziehenden Kräfte das Gesamtgewicht tragen, eine instabile Gleichgewichtslage ist, werden zur Regelung elektrische Spulen über den Eisenschekeln angebracht.

Der Tragnagnet läßt sich durch eine mechanische und eine elektrische Differentialgleichung beschreiben. Dabei ist es nicht möglich, das Gesamtverhalten exakt darzustellen, sondern es werden gewisse Vereinfachungen und Linearisierungen vorgenommen, die im folgenden ebenfalls beschrieben werden. Die Bewegungsgleichung des Magneten ergibt sich aus  $\Sigma F = m \cdot a$ :

$$m \cdot g - F_M(\theta_L, d) = m \cdot \ddot{d}$$

Dabei stellt  $F_M$  die magnetische Kraft dar, die vom Luftspalt  $d$  und von der Spulendurchflutung  $\theta_L$  abhängt. Diese ist als nichtlineares Kennlinienfeld (Bild 2) gegeben, welches aus Feldberechnungen ermittelt wurde.

Eingegangen: 15. Mai 1996

Th. Friedrich, K. Kahlen, G. Henneberger  
RWTH Aachen, Institut für Elektrische Maschinen, Schinkelstr. 4,  
D-52056 Aachen, Deutschland

Korrespondenz an: Th. Friedrich

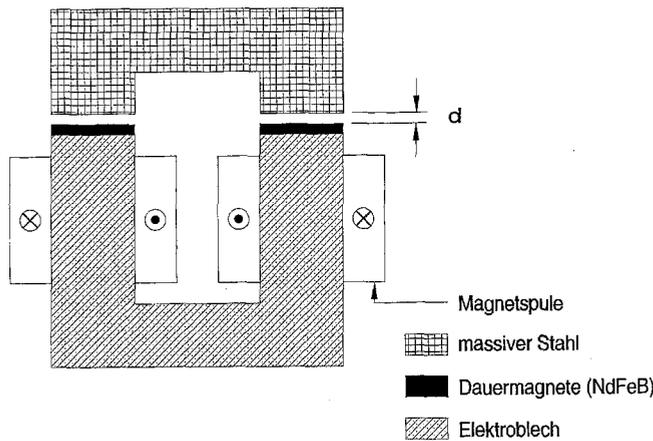


Bild 1. Querschnitt durch den Hybridmagneten

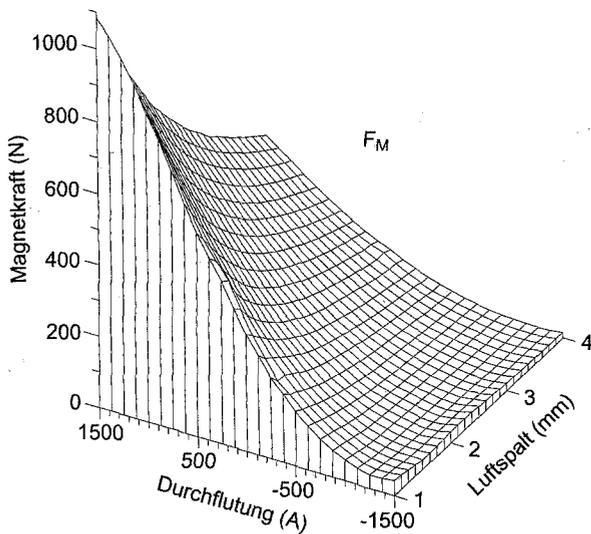


Bild 2. Kraft des Tragemagneten

Eine Linearisierung um einen Arbeitspunkt wurde mit einer Taylorreihenentwicklung vorgenommen:

$$F_M \approx F_M|_{d_0, \theta_0} + (\theta_L - \theta_0) \frac{\partial F_M}{\partial \theta} \Big|_{d_0, \theta_0} + (d - d_0) \frac{\partial F_M}{\partial d} \Big|_{d_0, \theta_0}$$

Nach Einführung von bezogenen Größen

$$f_M := \frac{1}{mm} \frac{F_M - m_0 g}{m_0} \quad f_d := \frac{1}{m_0} \frac{\partial F_M}{\partial d}$$

$$f_\theta := \frac{A}{mm} \frac{1}{m_0} \frac{\partial F_M}{\partial \theta} \quad \text{mit } m_0 := \frac{F_M}{g}$$

kann die Differentialgleichung der Bewegung wie folgt beschrieben werden:

$$\ddot{d} = -f_m = -f_\theta \cdot \theta_L - f_d \cdot d \tag{1}$$

Die elektrische Systembeschreibung des Tragemagneten mit Hilfe einer konstanten Induktivität  $L$  ist nicht möglich. Vielmehr wird (vgl. Bild 3) ganz allgemein der nichtlineare Zusammenhang  $\psi(\theta_L, d)$  verwendet.

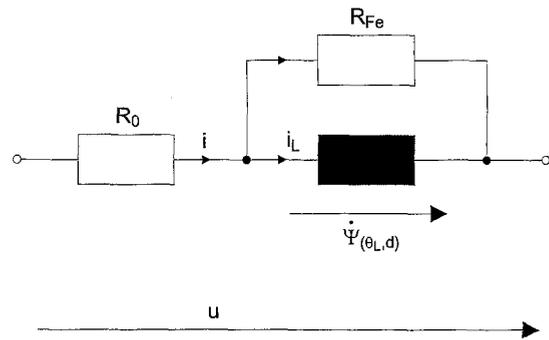


Bild 3. Elektrisches Ersatzschaltbild des Tragemagneten

Es wird angenommen, daß sich der Spulenstrom  $i$  in eine flußbildende Komponente  $i_L$  und eine Komponente  $(i - i_L)$ , welche die Eisenverluste repräsentiert, aufteilt.  $R_0$  stellt den ohmschen Spulenwiderstand dar. Die Wirbelstrom- und andere im Eisen auftretenden Verluste werden durch  $R_{Fe}$  repräsentiert. Im Idealfall wäre  $\dot{\psi} = 0$ , d.h. die Eisenverluste verschwinden. Dieser Punkt, in dem das System keine Bewegung ausführt, entspricht dem instabilen Gleichgewichtspunkt. Da allerdings immer eine Auslenkung aus diesem Punkt aufgrund von Rauscheinflüssen und Regelvorgängen geschieht, ist immer ein Spannungsabfall der zeitlichen Ableitung der Flußverkettung  $\dot{\Psi}$  vorhanden.

Ausgehend von dem Ersatzschaltbild ergeben sich die folgenden Gleichungen:

$$u = R_0 \cdot i + \dot{\Psi}(\theta_L, d)$$

$$i = \frac{\dot{\Psi}}{R_{Fe}} + i_L$$

Nach Umformung und partieller Differentiation von  $\Psi$  ergibt sich folgende Gleichung:

$$u = R_0 \frac{\theta_L}{N} + \bar{r} \cdot \left( \dot{\theta}_L \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} + d \frac{\partial \Psi}{\partial d} \right)$$

$$\text{mit } \bar{r} = \left( 1 + \frac{R_0}{R_{Fe}} \right)$$

Diese Gleichung läßt sich umformen in:

$$\dot{\theta}_L = - \frac{\Psi_d}{\Psi_\theta} \dot{d} - \frac{R_0}{\bar{r} N \Psi_\theta} \theta_L + \frac{u}{\bar{r} \Psi_\theta} \tag{2}$$

Hier werden ebenfalls bezogene Größen für die Spannung ( $u$ ) und für die Ableitung des Flusses nach dem Weg ( $\Psi_d$ ) und nach der Durchflutung ( $\Psi_\theta$ ) verwendet:

$$u := \frac{u}{V} \quad \Psi_d := \frac{\partial \Psi}{\partial d} \quad \Psi_\theta := \frac{\partial \Psi}{\partial \theta}$$

Die partiellen Ableitungen  $\Psi_d$  und  $\Psi_\theta$  liegen als Kennlinien (Bild 4) aus Feldberechnungen vor.

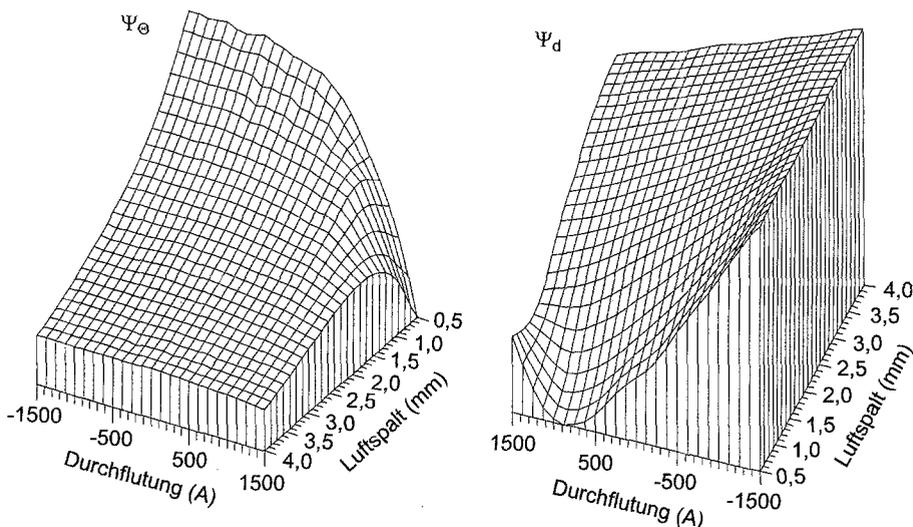


Bild 4. Partielle Ableitungen der Flußverkettung

Mit Hilfe der Stützstellen aus dem Kennlinienfeld und einer Interpolation kann jeder gewünschte Punkt berechnet werden. In der späteren Simulation wird diese Methode angewendet, um die tatsächlichen Systemparameter zu erhalten, und das System damit möglichst gut nachzubilden.

Bei der im folgenden Kapitel beschriebenen Zustandsdarstellung wird ein fester Arbeitspunkt (energiearm,  $\theta_L = 0$ ) vorgegeben, um den die Linearisierung stattfindet. Finden nur kleine Auslenkungen aus diesem Arbeitspunkt statt, so ist der Fehler in der Beschreibung des Zustandes nur gering. Entfernt man sich allerdings weiter aus diesem Punkt (z.B. durch Zuladung einer großen Masse), so kann der Fehler schon beträchtlich größer werden und zur Instabilität des Regelkreises führen.

### 3 Regelung des Magnettragesystems

Das vorhandene Magnettragesystem wird mit einer digitalen Zustandsregelung betrieben. Im folgenden soll eine kurze Systembeschreibung gegeben werden.

Bei der Wahl von Zustandsgrößen orientiert man sich an den gespeicherten Energieformen. Ausgehend von der potentiellen, kinetischen und magnetischen Energie fällt die Wahl des Zustandsvektors auf die Größen  $d$ ,  $\dot{d}$  und  $\theta_L$ .

$$\mathbf{x} = (d : \dot{d} : \theta_L)'$$

Mit Hilfe der Gleichungen aus der mechanischen und elektrischen Beschreibung (Gleichung (1) und (2)) kann eine übersichtliche Matrixschreibweise der Systemdarstellung angegeben werden:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{F} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{G} \cdot \mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{H} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{D} \cdot \mathbf{u} \end{aligned}$$

mit

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} \dot{d} \\ \ddot{d} \\ \dot{\theta}_L \end{pmatrix} \mathbf{F} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -f_d & 0 & -f_\Theta \\ 0 & -\Psi_d / \Psi_\Theta & -R_0 / \bar{r} N \Psi_\Theta \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{\bar{r} \Psi_\Theta} \end{pmatrix}' \quad \mathbf{H} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Der Ausgangsvektor  $\mathbf{H}$  gibt an, daß der Luftspalt und die Durchflutung bzw. der Strom gemessen werden. Die Luftspaltgeschwindigkeit wird durch den Differenzenquotient aus zwei Luftspaltmessungen und der Abtastzeit berechnet. Die Zustandsgrößen werden dann zur Regelung benutzt.

Der Durchgriff  $\mathbf{D}$  spielt in der Praxis keine bedeutende Rolle, d.h. die direkte Einwirkung der Eingangsgröße auf die Ausgangsgröße kann vernachlässigt werden.

Aus den Gleichungen der elektrischen Beschreibung ergibt sich mit

$$y = i = \frac{R_{Fe}}{R_0 + R_{Fe}} \cdot i_L + \frac{1}{R_0 + R_{Fe}} \cdot u$$

und den Werten für  $R_0 = 0.315 \Omega$  und  $R_{Fe} = 5.25 \Omega$  ein Durchgriff  $\mathbf{D}$  von 0.18 (1/ $\Omega$ ). In den Regelalgorithmen der Programme wurde der tatsächliche Durchgriff versuchsweise implementiert. Es wurden allerdings keine bemerkenswerten Beeinflussungen festgestellt. Somit kann  $\mathbf{D} = 0$  gesetzt werden.

Der bisher zur Regelung benötigte Luftspaltsensor wird nun durch einen Beobachter ersetzt, so daß es möglich ist, mit Hilfe der meßbaren Größen Strom und Spannung auf den Systemzustand zurückzuschließen, und mit diesem ermittelten Zustandsvektor  $\mathbf{x}$  die Regelung zu betreiben.

Der Beobachter wurde auf Grundlage des Kalmanfilteralgorithmus' entwickelt. Hierfür wurde eine zeitdiskrete Zustandsdarstellung gewählt, die mittels Transformation aus der zeitkontinuierlichen Form ermittelt wurde. Die Steuer-, Beobacht- und Erreichbarkeit kann für das System in einem festen Arbeitspunkt gezeigt werden. Nichtlinearitäten und Änderungen der Abtastzeitschritte können den Verlust der Steuer-, Beobacht- und Erreichbarkeit des Systems bewirken. Aus diesem Grund wurde zuerst mittels einer Simulation das Verhalten des Regelkreises untersucht.

### 4 Das Kalmanfilter

Beim Einsatz eines Beobachters muß das reale System möglichst gut durch ein Modell dargestellt werden, um anhand von meßbaren Größen auf den Zustand des Systems schließen zu können. Bei einer idealen Modellierung sind bei gleichen Eingangs-

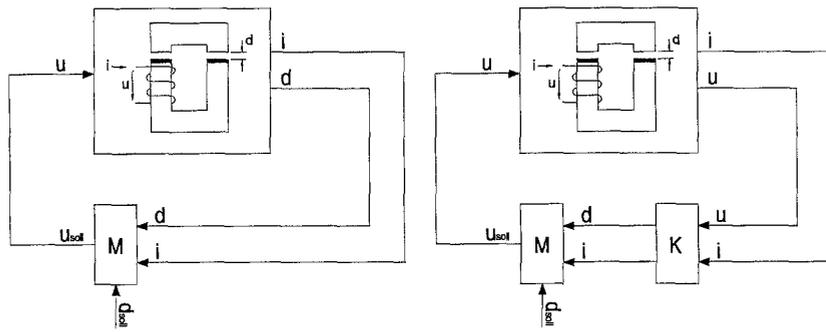


Bild 5. Vergleich bisheriger Regelkreis - neuer Regelkreis

432

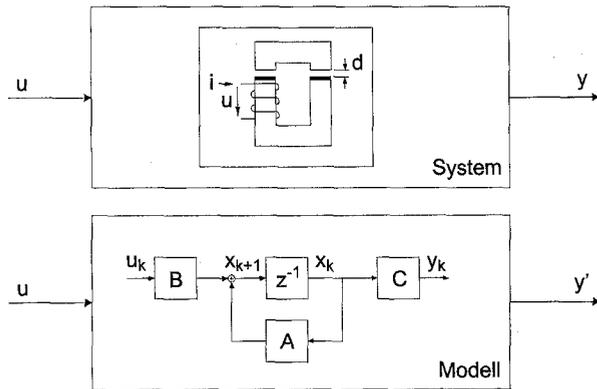


Bild 6. Vergleich reales und modelliertes System

vektoren  $u$  und identischen Anfangszuständen auch die Ausgangsvektoren  $y$  und  $y'$  identisch (Bild 6).

Beim Kalmanfilteralgorithmus sind sowohl Fehler bei der Modellbeschreibung als auch Ungenauigkeiten bei der Ausgangsgrößenmessung erlaubt. Diese Fehlereinflüsse werden auch als System- und Meßrauschen bezeichnet. Ausgehend von einem meßbaren Ausgangsvektor erfolgt eine Rekonstruktion des Zustandsvektors. Dieser kann dann zur Regelung des Gesamtsystems verwendet werden. Ziel ist es, den Zustandsvektor so zu rekonstruieren, daß der quadratische Mittelwert (die Kovarianz) des Rekonstruktionsfehlers minimal wird.

Den Einfluß des Systemrauschens kann man durch Addition eines Vektors  $w$  zum Zustandsvektor verdeutlichen. Das Meßrauschen wird durch die Addition eines Vektors  $v$  zum Ausgangsvektor dargestellt (Bild 7).

Über die statistischen Eigenschaften der Rauschprozesse  $w$  und  $v$  sind für das Kalmanfilter einige a-priori Kenntnisse notwendig:

Die Rauschprozesse werden als gaußförmig, mittelwertfrei

$$E[w_i] = 0 \tag{3}$$

$$E[v_i] = 0$$

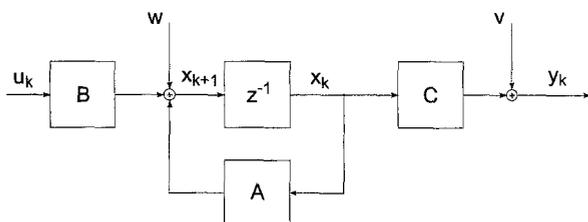


Bild 7. Zustandsdarstellung mit Rauscheinflüssen

und zeitlich unkorreliert angenommen.

$$E[w_i \cdot w_j^T] = \delta_{ij} Q \quad E[v_i \cdot v_j^T] = \delta_{ij} R$$

mit

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{für } i = j \\ 0 & \text{für } i \neq j \end{cases}$$

Für die Kovarianzmatrix  $Q$  des Systemrauschens bei einem  $n$ -dimensionalen Vektor  $w_k$  gilt:

$$Q_k = \begin{bmatrix} E[(w_1 - E[w_1])^2] & \dots & E[(w_1 - E[w_1]) \cdot (w_n - E[w_n])] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ E[(w_n - E[w_n]) \cdot (w_1 - E[w_1])] & \dots & E[(w_n - E[w_n])^2] \end{bmatrix}$$

Mit Gleichung (3) vereinfacht sich die Kovarianzmatrix zu:

$$Q_k = \begin{bmatrix} E[w_1^2] & \dots & E[w_1 \cdot w_n] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ E[w_n \cdot w_1] & \dots & E[w_n^2] \end{bmatrix}$$

Die Berechnung der Kovarianz des Meßrauschens erfolgt analog. Die Dimension des Meßrauschvektors ist gleich der Dimension des Ausgangsvektors. Die Berechnung vereinfacht sich, da der Rauschvektor nur ein einzelnes Element enthält:

$$R_k = E[v_1^2]$$

Zu Beginn der Berechnungsschritte sind Annahmen über den Anfangszustand erforderlich:

$$\hat{x}_0 = E[x_0]$$

Der erste geschätzte Zustand  $\hat{x}_0$  wird meist auf den Mittelwert des Zustandsvektors gesetzt.

Die Anfangskovarianz  $P_0$  des Startwertes  $x_0$  sei bekannt.

$$P_0 = E[(x_0 - E[x_0]) \cdot (x_0 - E[x_0])^T]$$

Der Anfangswert  $x_0$  und die beiden Rauschprozesse sind untereinander unkorreliert.

$$E[w_i \cdot v_j^T] = 0$$

$$E[x_0 \cdot w_i^T] = 0$$

$$E[x_0 \cdot v_i^T] = 0$$

Unter den oben genannten Voraussetzungen lassen sich die Gleichungen des Kalman-Filter Algorithmus' herleiten. Diese werden an dieser Stelle ohne Herleitung angegeben. Der Algorithmus kann dabei in zwei Abschnitte unterteilt werden:

1. Prädiktion/Time-update,  $(k \cdot T)$

Es wird eine Vorhersage für den Zustandsvektor und für die Kovarianzmatrix zum nächsten Abtastschritt bezüglich des aktuellen geschätzten Zustandsvektors  $\hat{x}_k$  und dessen Kovarianz  $P_k$  getroffen. Der vorhergesagte Zustand wird mit  $\bar{x}_{k+1}$  bezeichnet.  $P_{k+1}^*$  gibt an, wie sich die Varianz des Zustandsvektors entwickelt.

2. Filterung/Measurement-update,  $((k+1) \cdot T)$

Es erfolgt eine Bewertung des vorhergesagten Zustandsvektors  $\bar{x}_{k+1}$ . Eine Korrektur wird über die aktuelle Rückkoppelmatrix  $K_{k+1}$  vorgenommen. Dabei wird die Differenz zwischen dem vorhergesagten  $C_k \bar{x}_{k+1}$  und dem gemessenen Ausgangsvektor  $y_{k+1}$  zurückgeführt. Anschließend wird  $k$  um eins erhöht und wieder mit 1. begonnen.

Die Gleichungen für das zeitdiskrete Kalmanfilter lauten:

Prädiktion

$$\bar{x}_{k+1} = A_k \hat{x}_k + B_k u_k \tag{4}$$

$$P_{k+1}^* = A_k P_k A_k^T + Q_k \tag{5}$$

Filterung

$$K_{k+1} = P_{k+1}^* C_k^T [C_k Q_{k+1} C_k^T + R_k]^{-1} \tag{6}$$

$$\hat{x}_{k+1} = \bar{x}_{k+1} + K_{k+1} [y_{k+1} - C_k \bar{x}_{k+1}] \tag{7}$$

$$P_{k+1} = P_{k+1}^* - K_{k+1} C_k P_{k+1}^* \tag{8}$$

Dabei wird vereinfachend davon ausgegangen, daß eine Änderung des Zustandsvektors  $x$  aufgrund einer Eingangsgröße  $u_k$  erst nach einem Zeittakt messbar ist ( $y_{k+1}$ ). Dieses wird im Modell durch ein Verzögerungsglied verdeutlicht. Bild 8 zeigt schematisch die Funktionsweise des Regelkreises mit Beobachter und die Regelung mit dem geschätzten Zustandsvektor.

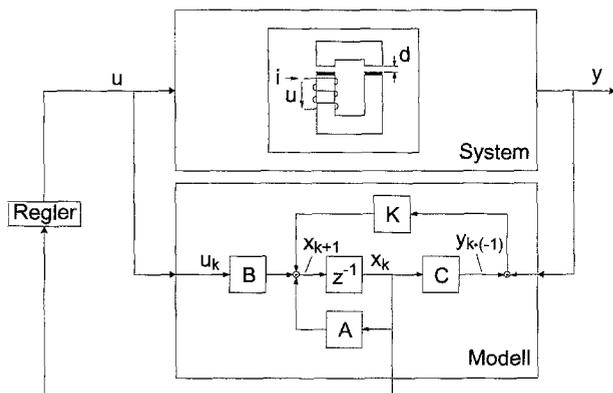


Bild 8. Beobachteralgorithmus im Regelkreis

Zu Beginn wurden einige vereinfachende Annahmen gemacht.

- Die Systemmatrizen werden als zeitlich konstant angenommen.

$$A_k = A \quad B_k = B \quad C_k = C$$

- Linearisierung in einem Arbeitspunkt

- Die Kovarianzen der Rauschprozesse  $w$  und  $v$  werden als konstant angenommen:

$$Q_k = Q \quad R_k = R$$

Unter der Voraussetzung, daß das System beobachtbar und steuerbar ist, kann (bei konstanten Systemmatrizen und konstanten Rauschkovarianzen) die Rückkoppelmatrix  $K$  schon im Vorhinein durch den rekursiven Berechnungsalgorithmus mit Hilfe der Gleichungen (5), (6) und (8) bestimmt werden.  $K$  konvergiert dabei gegen einen konstanten Wert. Hierbei stellt das Kalman-Filter allerdings nicht mehr ein optimales Filter dar.

In der folgenden Simulation und den anschließenden Versuchen wurde ein fester Wert für  $K$  verwendet und nur noch die Gleichungen (4) und (7) zur Bestimmung des Zustandsvektors eingesetzt.

5 Simulation und Versuche

Um die Funktionalität des Beobachteralgorithmus' zu überprüfen, wurde zuerst eine Simulation durchgeführt. Als Arbeitspunkt wurde, wie bei den Voruntersuchungen zum Förderfahrzeug [5], ein Luftspalt von  $d = 2$  mm, eine Durchflutung von  $\theta = 0$  A und eine Masse von 18.1 kg angenommen. In der Simulation wurde der Zustand des realen Systems mittels Stützstellen aus den vorgegebenen Kennlinien (Bilder 2 und 4) und eines Runge-Kutta-Verfahrens in jedem Zeitschritt neu bestimmt. In jedem Zeitschritt wurde nun mit Hilfe des Beobachters der neue Systemzustand ermittelt und zur Regelung verwendet. Bild 9 zeigt das Be- und Entladen des Magneten mit 5 kg.

Der Kalman-Filter-Algorithmus versucht von sich aus, in den Stromnullpunkt zu gelangen. Somit wird immer der gewünschte energiearme Zustand angestrebt. Zwar ist ein Schwingen zu beobachten, aber der Strom stellt sich schnell auf 0 A ein.

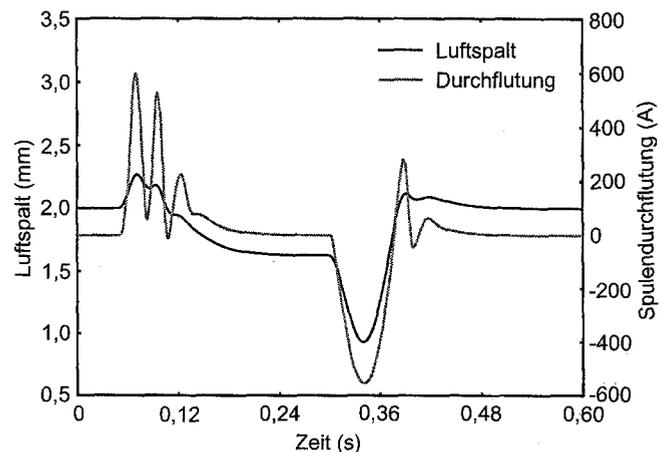


Bild 9. Simulation mit Beobachter ( $\pm 5$  kg)

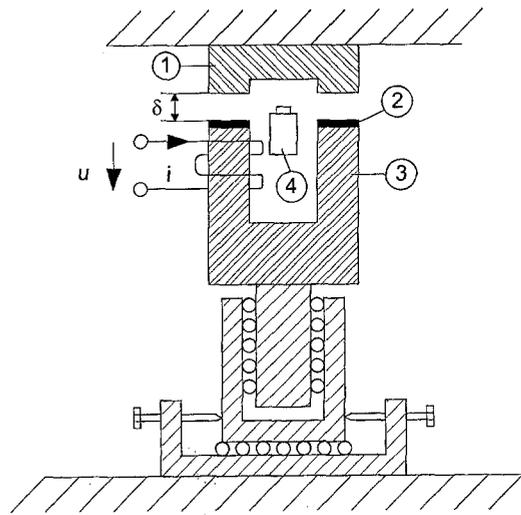


Bild 10. Versuchsaufbau

Ein großes Überspringen beim Entladen ist deutlich sichtbar, welches sich bei den späteren Versuchen als problematisch erweisen sollte, da ein Sicherheitsabstand von 1 mm zur Tragschiene eingehalten werden muß.

Nachdem die Simulation erfolgversprechend verlief, wurde der Beobachteralgorithmus in den Versuchsstand implementiert.

Der Versuchsstand (Bild 10) besteht aus einem Hybridmagneten mit einem geblechten Eisenkern (3) und aufgeklebten Permanentmagneten aus NdFeB (2). Das Rückschlußjoch (1) ist aus massivem Stahl.

Der Hybridmagnet wird in Rollenlagern geführt, so daß nur eine Bewegung in anziehender bzw. abstoßender Richtung möglich ist. Durch Lösen von Arretierungsschrauben ist eine seitliche Auslenkung möglich, um die Seitenführungskräfte zu untersuchen. Eine Bewegung in Richtung der Tragschiene ist nicht möglich. Der Luftspalt wird mit einem Sensor (4) gemessen, der nach dem Prinzip des Wirbelstrommessverfahrens arbeitet.

Die gesamte Spannungsversorgung des Meß- und Regelsystems, aber auch des Umrichters erfolgt im späteren Schwebefahrzeug aus Akkumulatoren, d.h. die gesamte benötigte Energie wird auf dem Fahrzeug mitgeführt.

Die Meßdatenerfassung von Strom, Spannung und des Luftspaltes erfolgt mit Meßwerterefassungskarten (vgl. Bild 11). Die Datenverarbeitung geschieht mittels eines digitalen Signalprozessors TMS320C30. Ein angeschlossener PC dient lediglich zur numerischen und graphischen Auswertung und Überwachung. Das einsatzfertige Fahrzeug kommt nur mit der Signalprozessorkarte aus.

In den Versuchsstand wurde nun der Filter-Algorithmus aus der Simulation unter Anpassung der Systemmasse an die tatsächlichen Gegebenheiten implementiert. Es konnte nun zwischen einer Regelung mit Luftspaltsensor und einer Regelung mit Beobachter umgeschaltet werden.

Bild 12 zeigt ein sehr robustes Verhalten beim Be- und Entladen von 5 kg unter Verwendung des Luftspaltsensors. Es wird allerdings nur auf Stabilität geregelt. Ein Integrator, der die Regelabweichung beheben kann (d.h. den Strom auf 0 Ampere regelt), reagiert nur relativ langsam und wurde nicht verwendet.

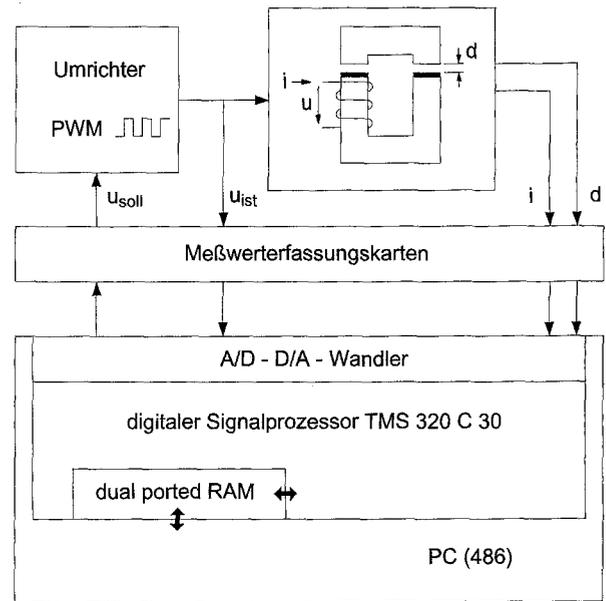


Bild 11. Schematischer Aufbau des Versuchsstandes

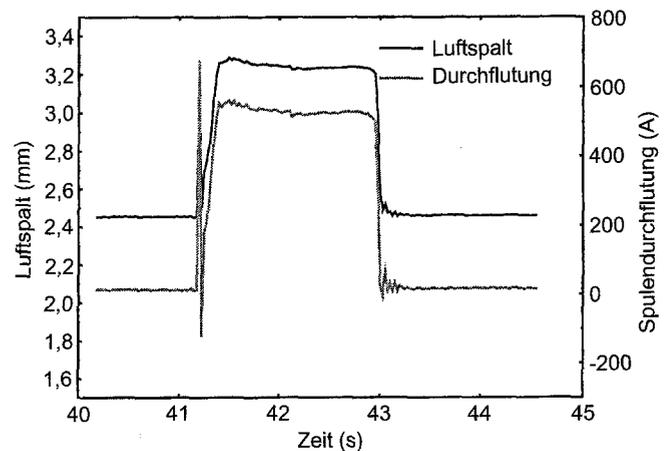


Bild 12. Regelung am Versuchsstand mit Luftspaltsensor ( $\pm 5$  kg)

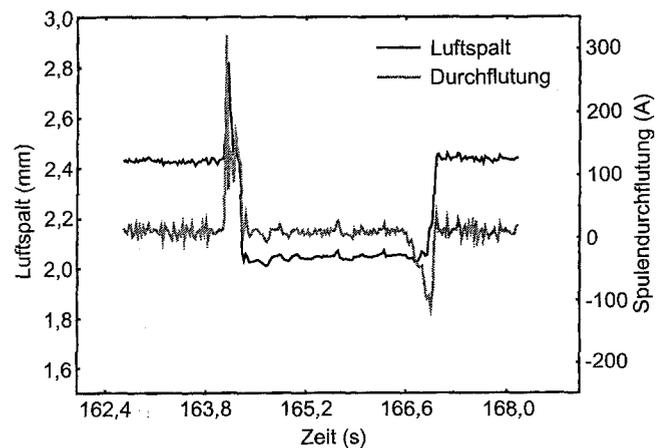


Bild 13. Regelung am Versuchsstand mit Beobachter ( $\pm 5$  kg)

Um die Funktion des Beobachters zu untersuchen, wurde bei den Versuchen jeweils mit dem Luftspaltsenor der Magnet angefahren; erst im Arbeitspunkt erfolgte eine Umschaltung auf den Beobcheralgorithmus. Beim Be- und Entladen wurden jeweils Hantelscheiben von Hand auf- bzw. abgelegt, so daß eine gewisse unterschiedliche Belastung in diesen Extrempunkten immer gegeben war. Die treppenförmige Gewichtsänderung wie in der Simulation ist also nicht möglich. Beim Beladen herrscht kurzfristig eine höhere Belastung; beim Entladen wird der Vorgang eher gedämpft. In Bild 13 ist ein gewisses Grundrauschen erkennbar, welches durch Störeinflüsse bestimmt ist und nicht durch den Filteralgorithmus eliminiert werden kann.

## 6

### Zusammenfassung und Ausblick

Es konnte gezeigt werden, daß der Luftspalt zwischen dem Hybridmagneten und der Tragschiene mit Hilfe eines Beobachters geschätzt werden kann und somit ein bisher zur Regelung benötigter Luftspaltsensor nicht mehr unbedingt notwendig ist. In praktischen Versuchen ließen sich Zuladungen bis zur Hälfte des Eigengewichtes des Magneten realisieren. Allerdings ist die Robustheit und Steifigkeit des Systems ohne Luftspaltsensor noch verbesserungswürdig.

Es wurden einige vereinfachende Annahmen gemacht, die das noch nicht ideale Verhalten des Systems erklären. So bleibt der Einsatz eines erweiterten Kalmanfilters überlegenswert. Bei diesem werden die Systemmatrizen nicht mehr als konstant angesehen, sondern in jedem Schritt neu berechnet. Da der Arbeitspunkt eine instabile Gleichgewichtslage ist, könnten Stabilitätsprobleme des Gesamtsystems auftreten. Außerdem ist das Anfahren des Systems, d.h. das Abheben des Tragemagneten vom unteren Anschlag, derzeit noch nicht möglich. Stattdessen wird der Magnet zunächst mit Hilfe des Luftspaltsensors in den Arbeitspunkt gefahren. Erst dann erfolgt eine Umschaltung von der Regelung mit Luftspaltsensor auf den Beobachter.

### Literatur

1. **Brammer, K.; Siffing, G.:** Kalman-Bucy-Filter, R. Oldenbourg Verlag, München Wien, 1994
2. **Friedrich, Th.; Henneberger, G.; Ress, Chr.:** Sensorless Magnetically Levitated System with Reduced Observer, Paper MAGLEV 1995
3. **Isermann, R.:** Digitale Regelsysteme, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1988
4. **Ludyk, G.:** Theoretische Regelungstechnik, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1995
5. **Rödder, D.:** Berechnung und Auslegung der berührungslosen Lagerung eines Förderfahrzeuges mit Hybridmagneten, Aachen: Shaker 1994