

# Zeitdiskrete Zustandsschätzung und Regelung auf Basis impliziter Integrationsverfahren für den magnetischen Schweberversuch

M. Mogler<sup>†</sup>, L. Zhang<sup>‡</sup>, P. Kotyczka<sup>‡</sup>

<sup>†</sup>Université Grenoble Alpes, Laboratoire de Conception et d'Intégration des Systèmes,  
50 rue Barthélémy de Laffémas, 26902 Valence, France,  
E-Mail: maximilian.mogler@lcis.grenoble-inp.fr

<sup>‡</sup>Technische Universität München, TUM School of Engineering and Design, Munich  
Institute of Robotics and Machine Intelligence (MIRMI), Lehrstuhl für Regelungstechnik,  
Boltzmannstraße 15, 85748 Garching, E-Mail: {le.zhang,kotyczka}@tum.de

Dass die direkte (quasi-kontinuierliche) Implementierung zeitkontinuierlich entworfener Regelgesetze in Abtastregelkreisen nur unter der Bedingung ausreichend hoher Abtastraten gut funktioniert, ist allgemein bekannt. Lässt sich aufgrund zu hoher Abtastzeit der Abtastmechanismus nicht mehr vernachlässigen, hilft die Verwendung eines Systemmodells aus einem Integrationsverfahren höherer Ordnung. In [1] wird gezeigt, wie ein zeitkontinuierliches Regelgesetz weiterverwendet werden kann, und zwar durch die Ergänzung der Regelungsstruktur um eine Einschnitt-Prädiktion der Zieldynamik mit der impliziten Mittelpunktsregel. Bei Anwendung auf mechanische Systeme erhält man gleichzeitig eine sehr praxistaugliche Schätzung der Geschwindigkeiten [2].

Der magnetische Schweberversuch ist ein bewährtes Beispiel für Fragen rund um die regelungsorientierte Modellbildung und die experimentelle Validierung von Regelungsentwürfen. Der digitale Abtastregelkreis kann mit beliebigen Abtastzeiten geschlossen werden, und aufgrund der Instabilität der einzustellenden Ruhelagen und Modellunsicherheiten (etwa durch das unstabilmisierte Netzteil) lässt sich gut die Robustheit der untersuchten Regelungskonzepte bewerten.

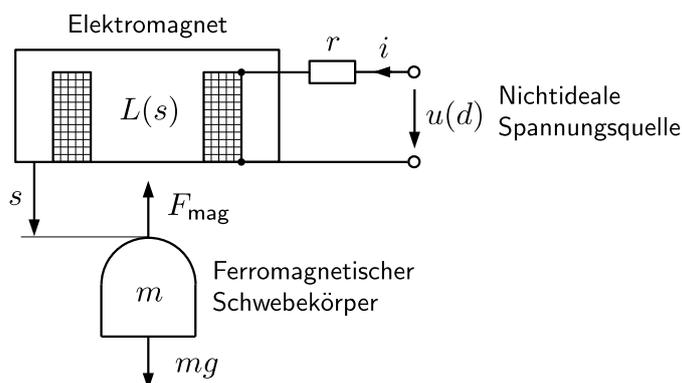


Abbildung 1: Schema und Foto des Versuchsaufbaus. Der Abstand wird durch einen Laser-Distanzsensoren gemessen und der Schwebekörper vertikal geführt, um Pendeln zu vermeiden. Im Experiment dient das Tastverhältnis  $d$  einer H-Brücke als Stellgröße.

Im Vortrag wird zunächst gezeigt, wie die zeitdiskrete Implementierung einer Zustandsrückführung über die implizite Mittelpunktsregel (als Modell mit Genauigkeit zweiter Ordnung) um die Zustandsschätzung durch einen nichtlinearen Luenberger-Beobachter erweitert werden kann. Um auch die tatsächlich wirkende Klemmenspannung als Eingangsgröße mitzuschätzen, wird der Ansatz eines Newton-Beobachters nach [3] auf das implizite Streckenmodell übertragen. Das resultierende überbestimmte Gleichungssystem

lässt sich entsprechend für diskrete Streckenmodelle höherer Ordnung, etwa aus Gauss-Legendre-Kollokation, aufstellen [4]. Die numerische Lösung entspricht dabei einem Minimierungsproblem, wie von den Beobachtern mit gleitendem Horizont bekannt [5].

Eine neue Parametrierung der vom Abstand des Schwebekörpers abhängigen Induktivität  $L(s)$  der Anordnung bildet die magnetische Kraft deutlich besser über einen weiteren Arbeitsbereich ab als in früheren Arbeiten [6, 7]. Gleichzeitig läuft der Entwurf eines IDA-PBC-Reglers mit konstanten Entwurfsmatrizen ins Leere. Hier hilft ein Blick auf die Gleichungsstruktur, und Backstepping liefert eine sehr einfache Lösung, die wiederum als IDA-PBC interpretiert werden kann, mit nun abstandsabhängiger Strukturmatrix des geregelten Systems [8].

In Experimenten zeigt sich (a) die hervorragende Güte des neu identifizierten Induktivitätsmodells, die eine präzise Folgeregelung zwischen 4 mm und 20 mm Abstand des Schwebekörpers erlaubt, und (b) dass mit dem Einsatz der zeitdiskreten Beobachter höherer Ordnung Abtastraten im Bereich von 30 Hz, also der Bildwiederholrate typischer Kameras, erreicht werden können.

## Literatur

- [1] Kotyczka, P.; Thoma, T. (2021): Symplectic discrete-time energy-based control for nonlinear mechanical systems. In: *Automatica* 133, S. 109842. DOI: 10.1016/j.automatica.2021.109842.
- [2] Thoma, T.; Wu, X.; Dietrich, A.; Kotyczka, P. (2021): Symplectic discrete-time control of flexible-joint robots: Experiments with two links. In: *IFAC-PapersOnLine* 54 (19), S. 1–7. DOI: 10.1016/j.ifacol.2021.11.046.
- [3] Moraal, P. E.; Grizzle, J. W. (1995): Observer design for nonlinear systems with discrete-time measurements. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 40 (3), S. 395–404. DOI: 10.1109/9.376051.
- [4] Mogler, M. (2022): Zeitdiskreter Beobachterentwurf für nichtlineare Systeme. Masterarbeit, TUM.
- [5] Allan, D. A.; Rawlings, J. B. (2018): Moving horizon estimation. In: *Handbook of model predictive control*, S. 99-124, Springer.
- [6] Zhang, L. (2024): Model Predictive Control and Moving Horizon Estimation for the Magnetic Levitation System. Masterarbeit, TUM.
- [7] Kotyczka, P.; Lohmann, B. (2010): Parametrierung von IDA-PBC über Zuweisung lokal linearer Dynamik. In: *at - Automatisierungstechnik* 58 (1), S. 38–48. DOI: 10.1524/auto.2010.0813.
- [8] Zhang, L.; Kotyczka, P. (2025): Sampled-Data Control using Hermite-Obreschkoff Methods with an IDA-PBC Example. In: *13th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems (NOLCOS)*, Reykjavik. DOI: 10.48550/arXiv.2501.11495.