

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Abschlussbericht

des Lehrstuhls für Antriebstechnik, Universität des Saarlandes

Projektprogramm

Wissens- und Technologietransfer durch Patente und Normen (WIPANO)

Projekt

Evaluation und Erschließung der Anwendungspotentiale der Integrator-Based Direct Inductance Measurement (IDIM) – Technik für die sensorlose Lageerkennung bei elektromagnetischen Aktuatoren

Förderkennzeichen: 03THWSL001

Projektlaufzeit: 01.04.2020 - 30.04.2022



UNIVERSITÄT
DES
SAARLANDES



Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03THWSL001 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhalt

1. Kurze Darstellung	3
1.1 Aufgabenstellung	3
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	3
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	3
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	4
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	6
2. Eingehende Darstellung	8
2.1 Verwendung der Zuwendung und des gezielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	8
Arbeitspaket 1: „Miniaturisierung der IDIM Schaltkreise“:.....	8
Arbeitspaket 2: „Anwendbarkeit und Nutzen von IDIM – Sensorlose Ankerlageerkennung“:.....	13
Arbeitspaket 3: „Anwendbarkeit und Nutzen von IDIM – Zustands- und Parametererkennung“:	18
Arbeitspaket 4: „Übertragbarkeit von IDIM auf mehrphasige Antriebssysteme“:	21
Arbeitspaket 5: „Dokumentation der Ergebnisse mit Ausblick“:	23
2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	23
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	24
2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplanes	24
2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	25
2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	25

1. Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung

Elektromagnetische Aktoren sind heutzutage als Antriebe in industriellen, mobilen oder heimischen Anwendungen in Form von Ventilen, Relais, Hubmagneten und Linearverstellern weit verbreitet. Durch ihren einfachen und robusten Aufbau mit langen Stellwegen bei gleichzeitig hoher Kraftentwicklung sind sie universell einsetzbar und werden daher in hohen Stückzahlen zu niedrigen Preisen verbaut. In den meisten Anwendungen werden die Aktoren ohne Regelungsschleife einfach bestromt, was aufgrund deren Robustheit zwar simpel ist, jedoch mit Effizienzeinbußen und fehlender Überwachung und damit Sicherheit einhergeht. Im Zuge der Digitalisierung und Industrie 4.0 und den damit einhergehenden Aufgabenstellungen wie Condition Monitoring sowie Predictive Maintenance gewinnt eine Überwachung und Regelung der Aktorposition jedoch zunehmend an Bedeutung. Klassischerweise wird die Positionsinformation durch mechanische Sensoren wie beispielsweise Endlagenschalter, Encoder oder Linear Variable Differential Transformers (LVDTs) gewonnen, durch deren Benutzung jedoch die Systemkosten, der Verkabelungsaufwand als auch die Baugröße zunehmen. Gerade im preissensitiven Segment der Hubmagnete stellt sich somit die Sensorlösung als unerwünscht heraus. Andererseits ist unter dem Aspekt der funktionalen Sicherheit auch in hochpreisigen Produkten die Nachfrage nach einem zweiten Sensorsignal zwecks Redundanz existent. Als etablierte Lösung bieten sich hier Sensorlosverfahren an, die eine Messung per Sensor ersetzen oder redundant unterstützen. Im Zuge des hier beschriebenen Projektes soll ein am LAT entwickeltes und patentiertes Verfahren namens Integrator-Based Direct Inductance Measurement (IDIM) zur sensorlosen Positionsbestimmung an elektromagnetischen Aktoren für eine verbesserte, risikoreduzierte und wirtschaftliche Verwertung weiterentwickelt werden.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Bisherige Forschungsarbeiten am LAT zeigten bereits mit prototypisch diskret aufgebauten IDIM-Schaltungen eine deutlich verbesserte Signalqualität bei gleichzeitig niedrigem Rechenaufwand im Vergleich zu Verfahren des Stands-der-Technik. Mithilfe dieses Förderprojektes wurde nun im Rahmen der nachfolgend aufgelisteten Arbeitspakete die wirtschaftliche Verwertbarkeit der IDIM-Technik vorangetrieben. Die dabei zu vollführenden F&E-Arbeiten sollen Verwertungsinteressierten helfen, die zum Schutzrecht angemeldete Idee hinsichtlich Nutzen, Aufwand sowie Risiko besser abschätzen zu können. Eine gewerbliche Nutzung der in der Patentanmeldung geschilderten Erfindung zeichnet sich bereits über die WELLGO Systems GmbH, sowie das an den LAT angegliederte Steinbeis-Transferzentrum ab. Darüber hinaus hat sich am LAT eine Forschergruppe gebildet, in deren Umfeld auch die Erfinder arbeiten. Der Lehrstuhlinhaber unterstützt dieses Vorhaben und hat über seinen Kooperationspartner WELLGO Systems GmbH die nötige ergänzende Finanzierung akquiriert.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projektvorhaben gliedert sich in vier Teilabschnitte. Zunächst soll im ersten Arbeitspaket (AP) der in der Patentanmeldung beschriebene IDIM-Schaltkreis, der zunächst nur prototypisch in Leiterplattentechnik am LAT vorliegt, als mikroelektronische Schaltung ausgearbeitet, gefertigt und getestet werden. Nur über einen solchen Miniaturisierungsschritt zum

Integrierten Schaltkreis (IC) hin sind Baugröße, Robustheit und – perspektivisch bei hohen Stückzahlen – der Preis wirtschaftlich und marktgerecht zu senken. Im zweiten AP wird an bereits gestartete Forschungsarbeiten am LAT angeknüpft und die Fähigkeit der IDIM-Technik zur Schätzung der Ankerlage von elektromagnetischen Aktoren validiert. Dies geschieht zunächst nur an diskreten Prototypen, um Verzögerungen bei AP 1 vorzubeugen. Anschließend werden in AP 3 weitergehende Potentiale der IDIM-Technik ausgelotet. Da diese die Induktivität des Aktors auswertet, scheint es vor dem wissenschaftlichen Hintergrund möglich, diese Induktivitätsinformation zur Zustands- und Parametererkennung einzusetzen. Dies zeigt insbesondere vor dem Hintergrund von „Industrie 4.0“ ein zukunftsweisendes Aufgabenfeld zu sein, um weitergehende Messdatenerfassung, Zustandsüberwachung und vorrausschauende Wartung zu ermöglichen. Zuletzt wird in AP 4 erörtert, inwiefern sich die IDIM-Technik auch auf mehrphasige elektromagnetische Systeme ausweiten lässt. Dies scheint vor dem Hintergrund weitreichender Applikationsfelder, wie beispielsweise rotatorische Elektromotoren, große Potentiale zu ermöglichen, und das Feld der Verwertungsinteressenten zu vergrößern. Im Konkreten soll die Übertragbarkeit der Technologie auf Synchronmaschinen untersucht werden.

Diese vier AP stellen mit ihren jeweiligen Teilvorhaben Miniaturisierung, Evaluation, Zustands-erkennung und Anwendbarkeit auf mehrphasige Systeme gleichermaßen wissenschaftliche als auch technische Arbeitsziele dar. Die Bearbeitung erfolgte im Umfeld der Forschungsarbeiten der Forschungsgruppe, aus der die Patentanmeldung der IDIM-Technik hervorgegangen ist.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Geschichtlich stand zunächst die Entwicklung von Sensorlosverfahren für rotatorische Maschinen im Vordergrund. Als Meilenstein sei hier die Arbeit von Schrödl am INFORM (INDirect Flux Detection by Online Reactance Measurement)-Verfahren zu nennen [1]. Kurz darauf folgten auch Arbeiten an Sensorlosverfahren für lineare elektromagnetische Aktoren.

Neben Verfahren basierend auf Zustandsbeobachtern [2], [3], die sich insbesondere für den hochdynamischen Betrieb eignen, basiert die Großzahl der Arbeiten auf einer parameterbasierten Schätzung. Diese sind im Gegensatz zu den Zustandsbeobachtern auch im Stillstand oder bei kleinen Geschwindigkeiten einsetzbar. Dies ist durch die Online-Ermittlung von positionsabhängigen Größen wie der Induktivität oder der Wirbelströme möglich. Da zur Online-Ermittlung stets eine Anregung des Aktors erfolgen muss, existieren injektionsbasierte Verfahren, die der Ansteuerspannung ein hochfrequentes Signal überlagern [2], [4]. Eine solche Anregung führt jedoch zu einer akustischen Geräuschbildung, zu Leistungsverlusten und zu Welligkeiten in der erzeugten Kraft, welche in Vibrationen resultieren. Ein anderer Ansatz besteht in der Ausnutzung von Stromrippeln, die durch die Ansteuerung mit pulswertenmodulierten (PWM) Schaltelektroniken entstehen. Durch diese Ansteuerung entsteht eine inhärente Anregung, die meist hochfrequent genug ist, um keine Geräusch- oder Vibrationsbildung hervorzurufen. Dieser Ansatz hat sich bewährt, denn eine Vielzahl an Arbeiten [5]–[10] nimmt eine Messung des Stromrippels vor. Im Detail wird die Stromableitung bestimmt, aus derer die Induktivität errechnet werden kann. Durch Ableitungen höherer Ordnung können auch der Spannungsabfall über dem Widerstand oder eine rückinduzierte Spannung durch Ankerbewegung kompensiert werden. Die Arbeiten [7]–[9] benutzen in diesem Fall sogar eine analoge Vorverstärkung, um den Stromrippe vorab zu verstärken. Ein großer Nachteil der ableitungsbasierten Methoden liegt in der geringen Robustheit und dem geringem Signal-Rausch-Verhältnis der geschätzten Position. Üblicherweise sind Strommessungen, insbesondere bei Aktoren niedriger Leistung, stark verrauscht, sodass im Falle der

numerischen Differentiation, und ggf. Differentiation höherer Ordnung, das Rauschen verstärkt wird.

Ein deutlich besseres Signal-Rausch-Verhältnis weisen Methoden auf, die eine Überabtastung des Stroms (Oversampling) vornehmen [11]–[14]. Dabei wird der Strom mithilfe eines Analog-Digital-Wandlers (ADC) deutlichst über der PWM-Frequenz abgetastet, sodass mehrere hundert Messwerte des Stromes innerhalb einer PWM Periode vorliegen. Mithilfe von Regressionsmethoden kann dann aus dem Datensatz auf Widerstand und Induktivität geschlossen werden. Die Arbeiten [11]–[13] benutzen die Strommessungen zur Berechnung eines numerischen Integrals, um daraus modellbasiert die Induktivität und damit die Position zu schätzen. Im Kontrast dazu wendet [14] die Datensätze in einem Least-Mean-Squares (LMS) Algorithmus an, bei dem jede PWM Periode berechnet wird. Somit kann die Induktivität und damit die Position mit hoher Genauigkeit und hohem Signal-Rausch-Verhältnis hochdynamisch ermittelt werden. Neben diesem signifikant erhöhten Signal-Rausch-Verhältnis haben jedoch die Oversampling-Methoden den Nachteil eines immens erhöhten Sampling- und Rechenaufwands. So wertet die Arbeit [14] 10.000 Samples pro PWM-Periode aus und muss innerhalb dieser Zeitspanne zahlreiche Berechnungen wie beispielsweise Matrizenoperationen ausführen. Dies ist im Rahmen der Arbeit nur unter Nutzung eines FPGAs (Field Programmable Gate Array) in Kombination mit einem digitalen Signalprozessor (DSP) möglich. Aufgrund dieses enormen Ressourcenaufwands sind diese Techniken trotz der benannten Vorteile bei dem im Projekt anvisierten elektromagnetischen Aktoren unerwünscht, da diese Aktoren meist dem preissensitiven Segment zuzuordnen sind, wo wenig Rechenleistung zur Verfügung steht.

Eine Sonderklasse an Sensorlosverfahren stellen Ansätze dar, die die Induktivitätsschätzung in einer dedizierten Elektronik vornehmen. Damit kann Rechenleistung „ausgelagert“ werden bei bestehender Möglichkeit, das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern. So verwendet die Arbeit [9] einen Hystereseverstärker zur Schätzung, der erfolgreich in der Arbeit validiert wird. Jedoch wird statt einer üblichen PWM-betriebenen schaltenden Leistungselektronik eine analoge Leistungsstufe benutzt, was heutzutage aus Energieeffizienzbetrachtung nicht wünschenswert ist. Die Arbeit [15] benutzt dagegen eine analoge Vorverarbeitung bestehend aus Hochpassfilter, Gleichrichter und Tiefpassfilter, um die Induktivitätsinformation aus dem Stromrippel zu gewinnen. Jedoch wird hier durch die Verwendung von Hoch- und Tiefpassfiltern die Bandbreite derart eingeschränkt, dass ein hochdynamischer Betrieb nicht möglich erscheint. Nichtsdestotrotz zeigen beide Arbeiten, dass durch Verwendung einer analogen Vorverarbeitung ein nachgeschalteter Mikroprozessor entlastet und dennoch ein ausreichend hohes Signal-Rausch-Verhältnis sichergestellt werden kann. Dies motivierte letztlich die Entwicklung der IDIM-Technik, die in diesem Projektvorhaben hinsichtlich erhöhter Verwertungschancen optimiert wird. Die Entwicklung der IDIM-Technik mündete in einer Patentanmeldung [16].

Literatur:

- [1] M. Schrödl, *Sensorless control of A. C. machines*, Bd. 117. Düsseldorf: VDI-Verl., 1992. [Online]. Verfügbar unter: http://primoproxy.slub-dresden.de/cgi-bin/permalink.pl?libero_mab21108051
- [2] P. B. Eyabi, „Modeling and sensorless control of solenoidal acutators“, The Ohio State University, Columbo, USA, 2003.
- [3] T. Braun, J. Reuter, und J. Rudolph, „Observer Design for Self-Sensing of Solenoid Actuators With Application to Soft Landing“, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Bd. 27, S. 1720–1727, 2018, doi: 10.1109/TCST.2018.2821656.
- [4] T. Braun, J. Reuter, und J. Rudolph, „Sensorlose Positionsregelung eines hydraulischen Proportional-Wegeventils mittels Signalinjektion“, *at - Automatisierungstechnik*, Bd. 65, Nr. 4, Jan. 2017, doi: 10.1515/auto-2017-0003.

- [5] E. Ganev, „Sensorless position measurement method for solenoid-based actuation devices using inductance variation“, US Patent US20070030619A1, 2007
- [6] D. Pawelczak und H.-R. Trankler, „Sensorless position control of electromagnetic linear actuator“, in *Proceedings of the 21st IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IEEE Cat. No.04CH37510)*, Como, Italy, 2004, Bd. 2, S. 372–376. doi: 10.1109/IMTC.2004.1351066.
- [7] M. F. Rahman, N. C. Cheung, und K. W. Lim, „A sensorless position estimator for a nonlinear solenoid actuator“, in *Proceedings of IECON '95 - 21st Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, Orlando, FL, USA, 1995, Bd. 2, S. 1208–1213. doi: 10.1109/IECON.1995.483969.
- [8] M. F. Rahman, N. C. Cheung, und Khiang Wee Lim, „Position estimation in solenoid actuators“, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Bd. 32, Nr. 3, S. 552–559, Mai 1996, doi: 10.1109/28.502166.
- [9] D. R. Pawelczak, „Nutzung inhärenter Messeffekte von Aktoren und Methoden zur sensorlosen Positionsmessung im Betrieb“, Bundeswehr University Munich, Munich, Germany, 2006. Zugegriffen: 18. März 2019. [Online]. Verfügbar unter: http://www.degruyter.com/view/j/auto.2006.54.issue-1_2006/auto.2006.54.1.48_1/auto.2006.54.1.48_1.xml
- [10] L. Li, T. Shinshi, und A. Shimokohbe, „State Feedback Control for Active Magnetic Bearings Based on Current Change Rate Alone“, *IEEE Transactions on Magnetics*, Bd. 40, Nr. 6, S. 3512–3517, Nov. 2004, doi: 10.1109/TMAG.2004.836295.
- [11] Ivor. Dulk und Tamas. Kovacshazy, „Modelling of a linear proportional electromagnetic actuator and possibilities of sensorless plunger position estimation“, in *2011 12th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, Velke Karlovice, Czech Republic, Mai 2011, S. 89–93. doi: 10.1109/CarpathianCC.2011.5945822.
- [12] I. Dulk und T. Kovacshazy, „Sensorless position estimation in solenoid actuators with load compensation“, in *2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, Graz, Austria, Mai 2012, S. 268–273. doi: 10.1109/I2MTC.2012.6229339.
- [13] S. Ahmed, Van-Duc Doan, und T. Koseki, „Electromagnetic levitation control with sensorless large air gap detection for translational motion application using measured current-ripple slope“, in *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florence, Italy, Okt. 2016, S. 4275–4280. doi: 10.1109/IECON.2016.7793418.
- [14] T. Glück, *Soft landing and self-sensing strategies for electromagnetic actuators*. Aachen: Shaker, 2013.
- [15] M. D. Noh und E. H. Maslen, „Self-sensing magnetic bearings using parameter estimation“, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Bd. 46, Nr. 1, S. 45–50, Feb. 1997, doi: 10.1109/19.552155.
- [16] E. Grasso, N. König, M. Nienhaus, und D. Merl, „Verfahren und vorrichtung zur bestimmung einer induktivitätsangabe eines elektromagnetischen aktuator“, EP3544173A1, 25. September 2019 Zugegriffen: 15. Dezember 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://patents.google.com/patent/EP3544173A1/en?q=EP3544173A1>

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die wirtschaftliche und wissenschaftliche Verwertung innerhalb dieses Projektes soll mittels einer mikroelektronischen Realisierung eines bereits vorhandenen Schaltkreises erreicht werden. Die Überführung von diskret aufgebauten Schaltungen hin zu mikroelektronischen Schaltungen in Silizium-Technologie ist keinesfalls trivial und erfordert umfassende Design-, Simulations- und Fertigungsressourcen, die am LAT nicht vorhanden sind. Speziell für solche Entwicklungsaufgaben existieren Dienstleister, die auf Anfrage bestehende Schaltkreise

BMW-Projekt „WIPANO“: Förderkennzeichen: 03THWSL001

Abschlussbericht des Lehrstuhls für Antriebstechnik, Universität des Saarlandes

überführen können. Mit dem Fraunhofer Institut für mikroelektronische Schaltungen und Systeme (IMS) in Duisburg hat der LAT bereits in einem Vorprojekt zusammengearbeitet, sodass eine gemeinsame Wissens- und Kommunikationsbasis entstanden ist. Dies erschien somit vor dem Hintergrund des durchzuführenden Projekts ein geeigneter Partner zu sein, da das IMS sowohl Design- als auch extern über X-Fab Fertigungsaufgaben übernehmen kann.

Adresse des Dienstleisters:

Fraunhofer Institut für mikroelektronische Schaltungen und Systeme (IMS)
Finkenstraße 61
47057 Duisburg

2. Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Arbeitspaket 1: „Miniaturisierung der IDIM Schaltkreise“:

AP 1: Miniaturisierung der IDIM (Integrator-Based Direct Inductance Measurement) Schaltkreise	3,70 MM
1.1 Schaltungsüberprüfung der diskret realisierten IDIM	0,60 MM
1.2 Präzisierung des Angebotes für die externe IC-Herstellung bei IMS	0,60 MM
1.3 Beauftragung und Auftragsbegleitung	0,50 MM
1.4 Durchführung von Qualifizierungstests zur Bestimmung der Eigenschaften der integrierten IDIM	1,00 MM
1.5 Durchführung von Anwendungstests zur Anknüpfung an die Arbeiten in AP 2, AP 3 und AP4	1,00 MM

Arbeitspakete 1.1 - 1.5:

- Auf Basis der vorangegangenen Arbeiten wurde in AP 1.1 die IDIM-Schaltung in diskreter Bauweise ausgearbeitet und eine entsprechende Dokumentation in Form von Schaltplänen, Layouts und Spezifikationen erstellt und überprüft. Bei dieser Aufarbeitung wurde der diskrete Schaltkreis hinsichtlich Signal-Rausch-Verhältnis, Flexibilität durch Programmierbarkeit sowie Robustheit optimiert. Diese Arbeiten waren im Juni 2021 abgeschlossen.
- Anschließend wurde im Zuge von AP 1.2 mit dem Fraunhofer Institut für mikroelektronische Schaltungen (IMS) in Duisburg ein passender Dienstleister zur Entwicklung und Fertigung eines miniaturisierten IDIM-Schaltkreises gefunden. Der Dienstleister ist aus vorangegangenen Projekten bekannt, in denen sich ein Erfahrungsschatz zwischen ihm und dem Lehrstuhl für Antriebstechnik (LAT) gebildet hat. Basierend aus den Resultaten von AP 1.1 wurden in gemeinsamer Absprache Spezifikationen erarbeitet und seitens des LAT in einem Lastenheft festgehalten. Als Grundlage hierfür diente das in Abbildung 1 gezeigte Blockschaltbild der miniaturisierten Schaltung. Das vom IMS erstellte Angebot in Höhe von 30T€ beinhaltet die Schaltplanentwicklung, das mikroelektronische Layouting, die mikroelektronische Fertigung und die Endprüfung des integrierten Schaltkreises (ICs).
- Basierend auf dem festgehaltenen Lastenheft wurde am IMS mit dem Schaltungsentwurf begonnen. Entwicklungsbegleitend fanden seitens des LATs wöchentliche Diskussions- und Abstimmungsrunden statt, um die Einhaltung der definierten Spezifikationen innerhalb von AP 1.3 zu überprüfen. Dabei wurden unterstützend vom IMS Simulationsergebnisse zur Verifizierung und Validierung bereitgestellt. Ende Februar 2021 waren die Entwicklungsarbeiten so weit abgeschlossen, dass die Fertigung beauftragt wurde. Diese fand beim Dienstleister X-Fab statt und erfuhr aufgrund der anhaltenden Corona-Pandemie und den damit verbundenen Lieferengpässen in der Halbleiterbranche eine halbjährige Verzögerung. Im Oktober 2021 verfügte das IMS dann über gefertigte Chips als Die, die dann dort gehäust, gebondet und einem elektrischen Test unterzogen wurden. Abbildung 2 zeigt einen solchen IC in dem verwendeten Keramik-Testgehäuse. Die fertigen ICs wurden im November 2021 an den LAT gesandt.

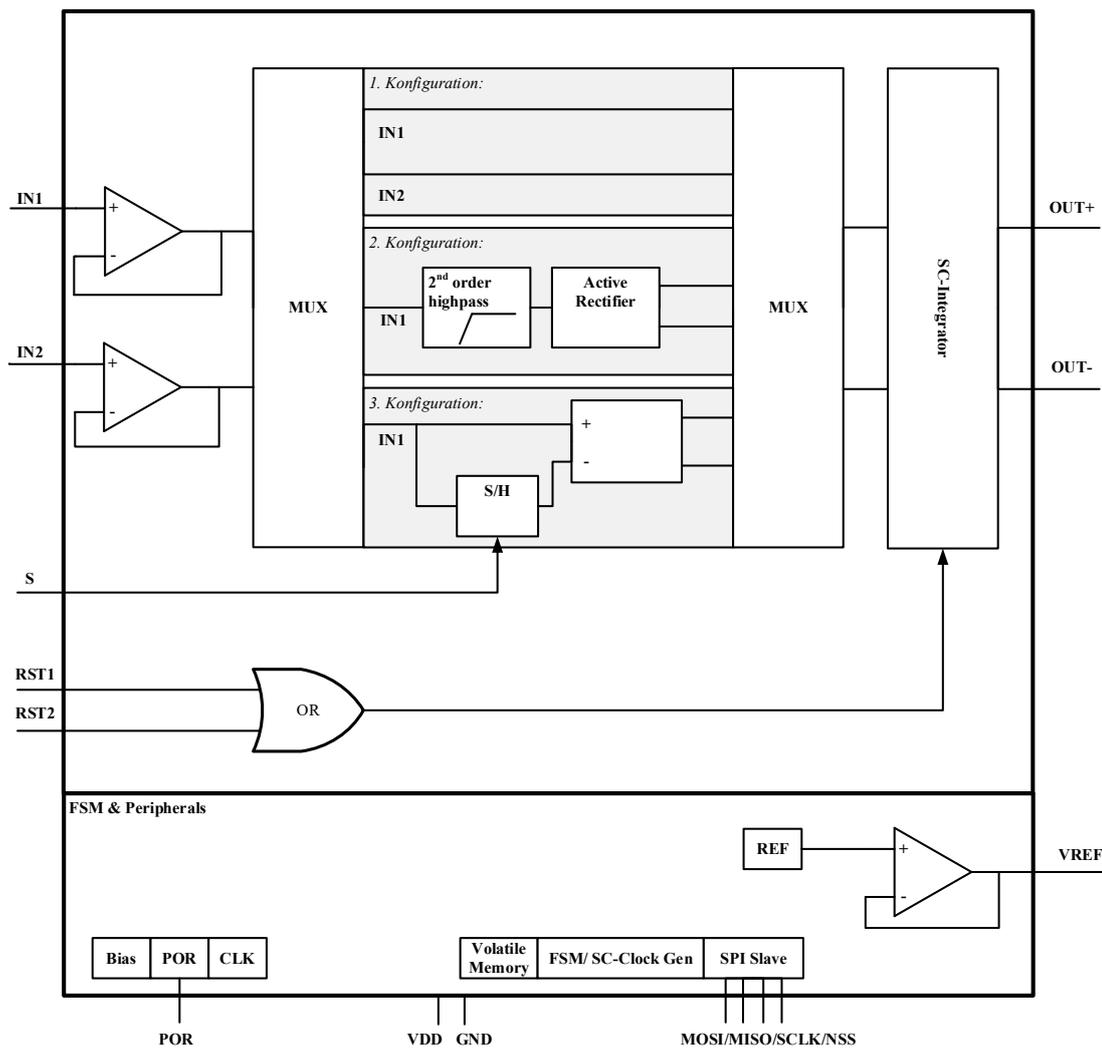


Abbildung 1: Blockschaltbild des miniaturisierten IDIM-Schaltkreises.

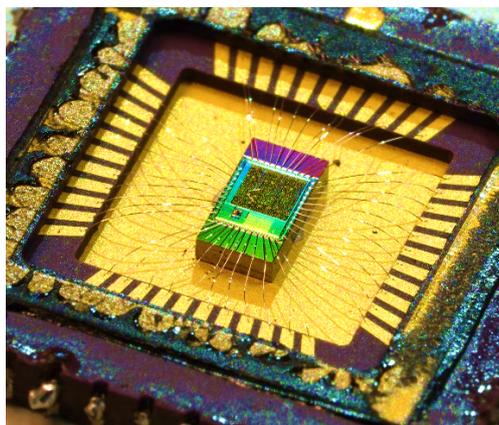


Abbildung 2: Mikroelektronische IDIM-Schaltung im Keramik-Testgehäuse.

- Mit dem Erhalt der ICs konnte nun in enger Abstimmung mit dem IMS innerhalb AP 1.4 die Schaltung in Betrieb genommen werden. Anschließend folgten umfangreiche Funktions- und Qualifizierungstests, deren Resultate in einem vorläufigen Datenblatt mündeten.

Während den Tests wurden Eingangssignale verschiedener Bandbreite mittels Funktionsgenerator auf die Schaltung gegeben und die resultierenden Ausgangssignale der Schaltung per Oszilloskop gemessen und analysiert. Es konnten alle grundlegenden Funktionen des Chips experimentell verifiziert werden. Versuche mit verschiedenen Frequenz und Spannungspegeln dienten zur Verifizierung und Validierung aller im Lastenheft festgehaltenen Spezifikationen. Es stellte sich dabei heraus, dass alle wichtigen Spezifikationen hinsichtlich Bandbreite, Verstärkung und Verzögerungszeiten eingehalten worden sind. Als kritischer Parameter wurde vorab die Droop-Rate der Sample-und-Hold-Stufe identifiziert, deren Wert sogar die Spezifikation übertrifft. Als störende Größe fiel eine Offsetspannung von 2mV in den Differenzverstärkern auf. Bei einer hohen Anzahl von Integrationsschritten führt diese zu einem Integratordrift und zu einer vorzeitigen Sättigung des Integrators. Durch eine niedrigere Taktung des ICs und damit weniger Integrationsschritten können diese Auswirkungen vermindert werden, was sich aber negativ auf die Verstärkung auswirkt. Es sind dennoch aussagekräftige Messungen mit dem IC möglich, obwohl dieser Punkt ein Verbesserungspotenzial für zukünftige Revisionen des Chips darstellt. Mit Beendigung der Qualifizierungstests war somit auch AP1.4 erfolgreich abgeschlossen.

- In AP 1.5 wurde eine Testplatine entworfen und gefertigt, die eine Inbetriebnahme des ICs über einen Sockel in vorhandene Messelektroniken erlaubt. Abbildung 3 zeigt diese Elektronik mitsamt eingesetztem IC. Mit diesem Sockel war die Programmierung und Parametrisierung des ICs möglich, sodass die für die Sensorlostechnik nötigen Anpassungen und Abstimmungen vorgenommen werden konnten.

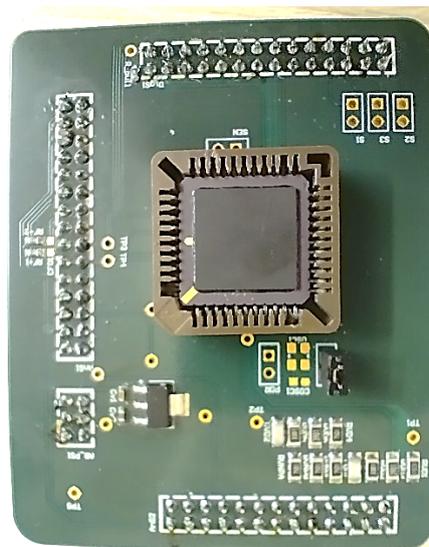


Abbildung 3: Testplatine mit Sockel für den mikroelektronisch realisierten IDIM-Schaltkreis.

Mithilfe des in Betrieb genommenen ICs konnten somit erste Anwendungstests unternommen werden. Im Fokus stand dabei die Ermittlung der Induktivität des Aktuators, die wie oben geschildert zur Positionsschätzung benötigt wird. Hierbei hat die Güte der Induktivitätsermittlung direkten Einfluss auf die Güte der Positionsschätzung, weswegen im Folgenden die Induktivität als zentrale Größe untersucht wird. Im Konkreten wurde die Induktivitätsermittlung mittels des ICs mit den in AP 2.2 erstellten diskreten Schaltungen verglichen. Neben dem ermittelten Rohwert stellt dabei das Signal-Rausch-Verhältnis eine wichtige Größe dar, denn dieses bestimmt maßgeblich die Güte des Signals. Bei zu schlechtem Signal-Rausch-Verhältnis ist auch die zu schätzende Position stark verrauscht, was sich nachteilig auf die nachfolgenden Signalverarbeitungsschritte und Regelalgorithmen auswirkt. Abbildungen 4 und 5 zeigen den Vergleich der Induktivitätsermittlung per

diskreter IDIM-Schaltung mit der per IC vorgenommenen Ermittlung, die in den Abbildungen als Sensorless IC IDIM (SLIC-IDIM) gekennzeichnet sind. Als Testobjekt dient dabei ein Standard-Hubmagnet des Typs GTC-A-40 der Firma Magnet-Schulz-Memmingen. Dabei werden zwei Betriebspunkte des Aktuators betrachtet: Abbildung 4 zeigt den unbestromten Zustand, in dem der Stößel eingefahren ist. In diesem Zustand weist die Induktivität einen hohen Wert auf. In Abbildung 5 wird die Induktivität des mit Nennstrom bestromten Aktor gezeigt, bei dem der Stößel eingezogen ist. Hier weist die Induktivität aufgrund von Sättigungseffekten einen besonders kleinen Wert auf. In beiden Betriebszuständen zeigt sich eine konstante Abweichung zwischen der Ermittlung per diskreter Elektronik und per IC. Diese Abweichung liegt in den Fertigungstoleranzen zwischen Elektronik und IC begründet. Da aufgrund engerer Tolerierung die Gains in allen ICs im Toleranzrahmen von 0.1% liegen sollten, wird dieser Umstand nicht weiter berücksichtigt. Zudem kann solch ein Verstärkungsfehler durch eine Kalibrierroutine kompensiert werden. Umso wichtiger erscheint die Angabe der Rauschleistung, die im Falle der Verwendung des ICs abnimmt. So wird im unbestromten Betriebsfall eine signifikante Reduzierung der Rauschleistung um 23 dB erreicht und im bestromten Fall eine Reduzierung um 1 dB. Das bedeutet, dass die Induktivitätsermittlung per realisiertem IC eine Steigerung des Signal-Rausch-Verhältnis bewirkt und somit die Signalgüte der ermittelten Induktivität bzw. der nachgeschalteten Positionsermittlung deutlich steigt. Somit ist eine wesentliche Anforderung dieses WIPANO-Projekts, nämlich die Steigerung der Signalgüte bei gleichzeitiger Reduktion des Bauraumes, erfüllt und damit AP 1.5 erfolgreich abgeschlossen.

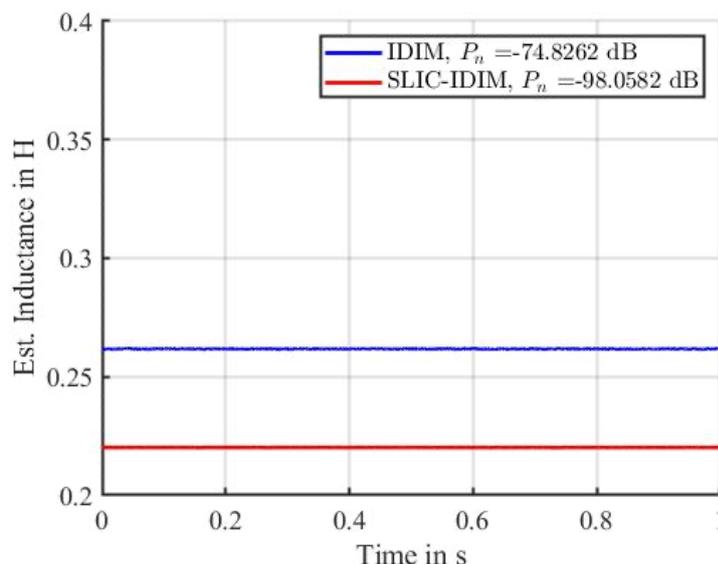


Abbildung 4: Vergleich der ermittelten Induktivität des Aktors im unbestromten Fall mit diskreter IDIM-Elektronik (IDIM) und realisiertem IC (SLIC-IDIM).

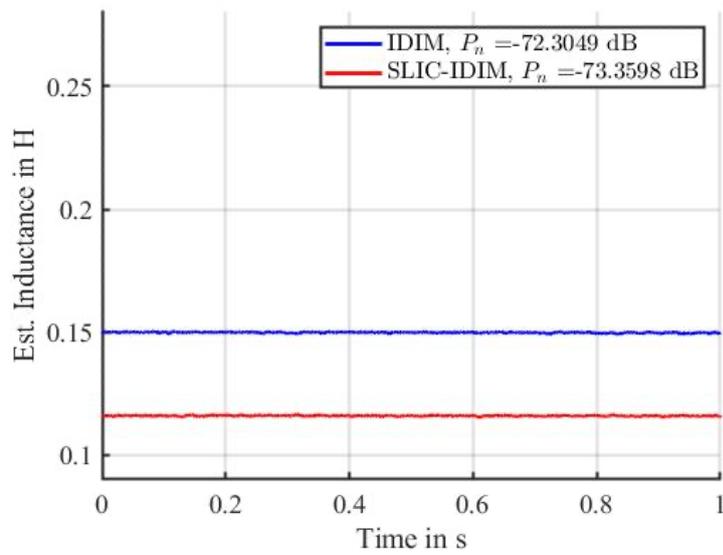


Abbildung 5: Vergleich der ermittelten Induktivität des Aktors im bestromten Fall mit diskreter IDIM-Elektronik (IDIM) und realisiertem IC (SLIC-IDIM).

Arbeitspaket 2: „Anwendbarkeit und Nutzen von IDIM – Sensorlose Ankerlageerkennung“:

AP 2: Anwendbarkeit und Nutzen von IDIM – Sensorlose Ankerlageerkennung	4,40 MM
2.1 Ausloten der IDIM-Potenziale für die sensorlose Ankerlageerkennung mittels Tests an unterschiedlichen Elektromagneten	1,10 MM
2.2 Erstellung ergänzender diskreter IDIM-Schaltungen zur Durchführung von Tests	1,10 MM
2.3 Vergleichende Messungen an unterschiedlichen Elektromagneten sowie FEM-Simulationen zur Design-Optimierung	1,10 MM
2.4 Einsatz und Anpassung vorhandener Prüfstandstechnik zur Unterstützung der Untersuchungen	1,10 MM

- Für Arbeitspaket 2.1 wurden zunächst elektromagnetische Linearaktoren von verschiedenen Herstellern erworben. Als Beispiel sind hier der GTC-A-40 der Firma Magnet-Schulz-Memmingen und der ITS-LZ 1949 von Red Magnetics zu nennen. In Synergie zu AP 2.3 wurde der dort entworfene und gefertigte Doppelhubmagnet ebenfalls in die Liste der Testobjekte aufgenommen. Alle erworbenen bzw. gefertigten Aktoren wurden auf ihre Eignung zur IDIM-Technik hin positiv überprüft, sodass an Ihnen vollständig die Potentiale der IDIM-Technik ausprobiert werden können. In Parallele zu AP 2.4 wurden dafür auch passende mechanische Ankoppelungsmöglichkeiten zur Verbindung an den am LAT vorhandenen Prüfstand entworfen und gefertigt.

Eine aus Vorarbeiten entstandene wissenschaftliche Veröffentlichung zeigt die Potentiale der IDIM-Technologie im Vergleich zu denen in der Literatur bevorzugten Oversampling-Verfahren [17]. Dabei wurde der Schaltaktor GTC-A-40 untersucht. Abbildung 6 zeigt die Rauschleistung der Oversampling-Methoden mit verschiedener Sampling-Anzahl im direkten Vergleich zur IDIM-Technik. Es zeigt sich, dass die IDIM-Technik im Vergleich mit den Oversampling-Methoden den Rechen- und Messaufwand deutlich reduzieren kann, bei dennoch kleiner Rauschleistung. Damit wurde ein grundlegender Vorteil der IDIM-Technik experimentell validiert, was einen positiven Ausblick auf die Verwertung der IDIM-Technik wirft. In Synergie mit der IC-Implementierung in AP 1.5 zeigt sich somit eine deutlich bessere Realisierbarkeit bei dennoch kleinem Bauraum mit größerer Signalgüte. Somit wurde AP 2.1 Ende des ersten Quartals 2021 erfolgreich abgeschlossen.

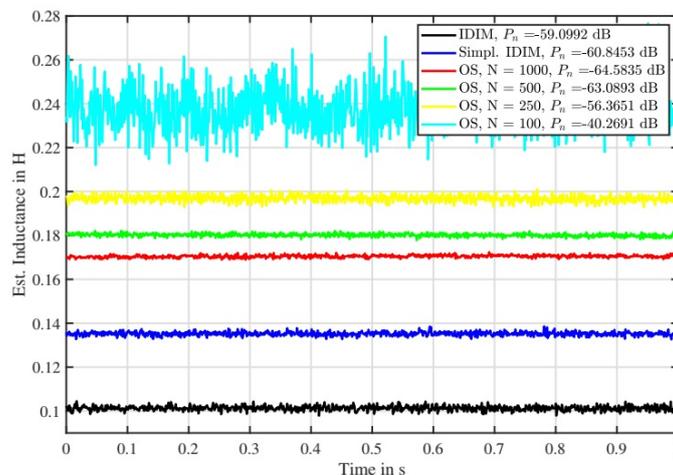


Abbildung 6: Vergleich der ermittelten Induktivität des Aktors im bestromten Fall, mit der IDIM-Technik und Oversamplingmethoden mit unterschiedlicher Anzahl an Samples [17].

- In AP 2.2 wurden diskrete IDIM-Schaltungen entworfen, die zu den nötigen Untersuchungen in AP 2-4 benötigt werden. Als Grundlage dienten bereits am LAT vorhandene Schaltungen, die in Abstimmung mit AP 1.1 verbessert worden sind. Zur Implementierung der IDIM-Technik wurde eine Rapid-Prototyping-Lösung bevorzugt, was in der Verwendung eines Field-Programmable-Analog-Array (FPAA) resultierte. Hierbei können frei konfigurierbare Analogschaltungen durch Programmierung erstellt werden. Abbildung 7 zeigt den realisierten Schaltkreis. Ende 2020 war dieses AP somit erfolgreich abgeschlossen.

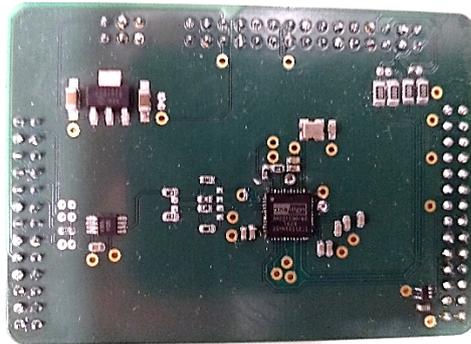


Abbildung 7: Diskrete IDIM-Schaltung auf Basis eines FPAA, am LAT entworfen und bestückt.

- Basierend auf den positiven Erkenntnissen der Rauschleistung aus AP 2.1, wurden an den erwähnten Aktuatoren die sensorlose Positionsermittlung implementiert, um genaue Aussagen bzgl. der Leistungsfähigkeit der IDIM-Technik zu treffen. Abbildung 7 zeigt die geschätzte Position an dem GTC-A-40 verglichen mit einem hochauflösenden Encoder und verschiedenen Oversamplingtechniken. Dort konnte durch Verwendung einer speziellen Ausführungsvariante der IDIM-Technik (simplified IDIM) der maximale Schätzfehler auf 1.28 mm reduziert werden im Vergleich zu 1.34 mm für eine Oversamplingmethode mit 100 Samples pro PWM Periode [17]. Hierbei ist anzumerken, dass Abbildung 8 keinerlei Filterung vornimmt und bessere Ergebnisse mit Nachfilterung erreicht werden können.

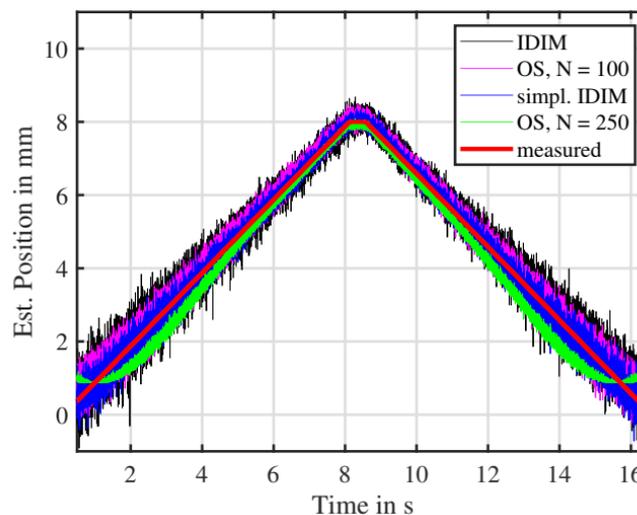


Abbildung 8: Performanz der Positionsschätzung am GTC-A-40 bei Verwendung der IDIM-Technik und verschiedener Oversampling-Methoden [17].

Abbildung 9 zeigt die Güte der Positionsschätzung am ITS-LZ 1949. Dort konnte bei dem Aktor eine sensorlose Positionsschätzung mit einem relativen Fehler kleiner als 2.7% über den kompletten Positionsbereich von 10 mm durchgeführt werden. Als Referenz diente ebenfalls ein Encoder mit 100 nm Auflösung.

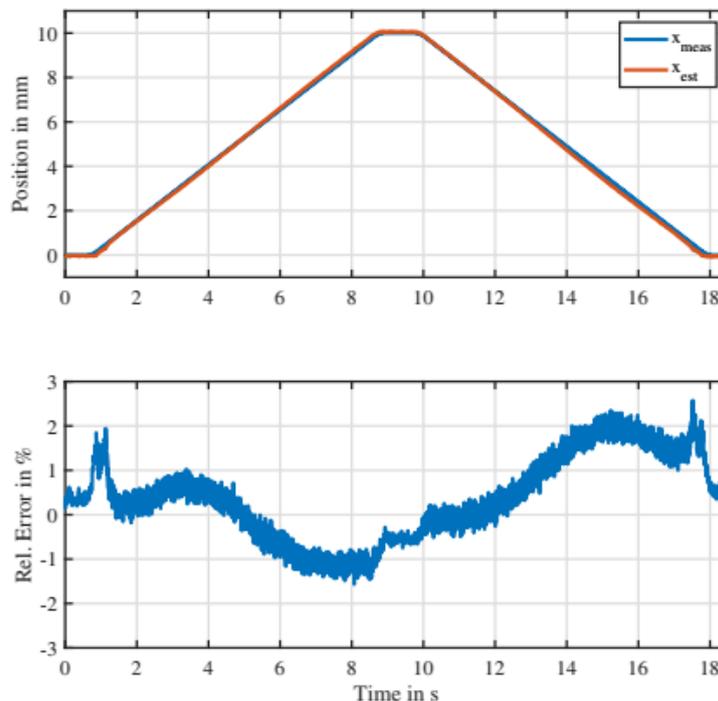


Abbildung 9: Performanz der Positionsschätzung am ITS-LZ 1949 bei Verwendung der IDIM-Technik [18].

Parallel zu den Tests an erworbenen Aktuatoren wurde am LAT ein Konzept für einen Doppelhubmagneten gemäß des Protagonist-Antagonist-Prinzips entwickelt, konstruiert und prototypisch gefertigt. Abbildung 10 zeigt den schematischen Aufbau des Aktuators. Als Verifizierung dienten zunächst FEM-Simulationen, in denen der Aktor maßgeblich auf eine hohe Sensitivität zur sensorlosen Lagerkennung hin ausgelegt wurde. Als zweites Optimierungsziel diente die Kraft, die durch Verwendung verschiedener Geometrien maximiert werden konnte, siehe Abbildung 11.

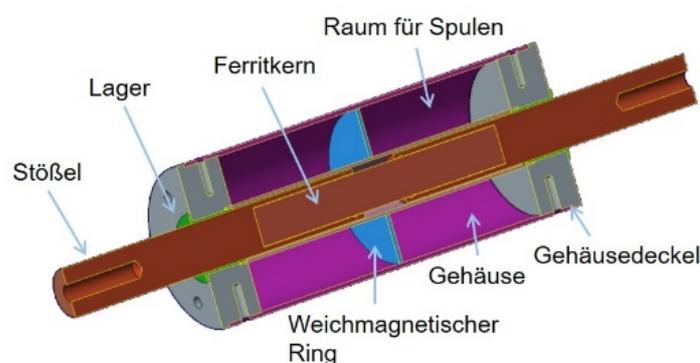


Abbildung 10: Schematischer Aufbau des Doppelsolenoid-Linearaktors.

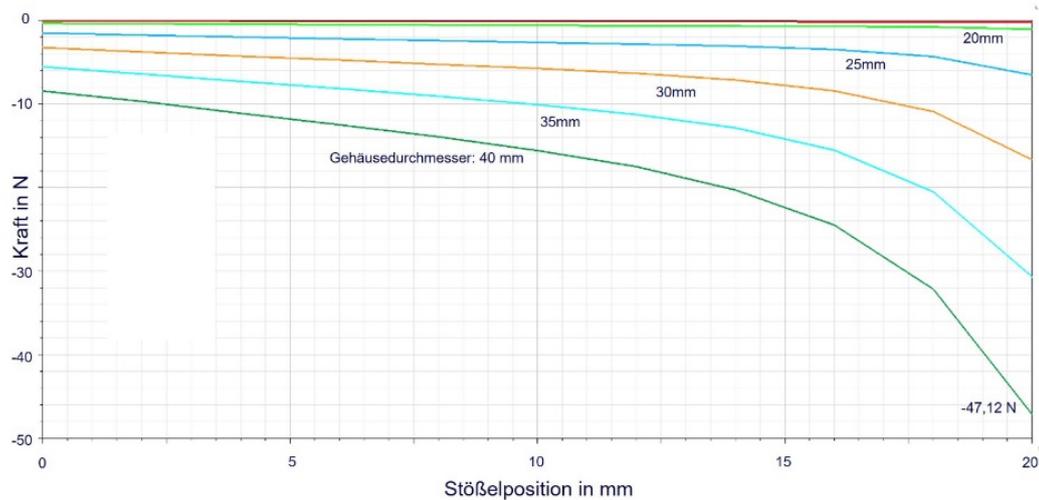


Abbildung 11: Kraftverlauf des Hubmagneten bei verschiedenen Gehäusedurchmessern, errechnet per FEM-Simulation.

Anhand der in FEM-Simulationen ausgelegten Designparametern wurde der Doppelhubmagnet prototypisch aufgebaut unter Verwendung verschiedener magnetischer Kerne. Ein Ferritkern eignet sich besonders zur Unterdrückung von Eisenverlusten und erlaubt eine hochdynamische Ansteuerungen. Er gerät aber schnell in magnetische Sättigung, was nur eine geringe Kraftausbeute erlaubt. Magnetischer Edelstahl vom Typ 1.4034 dagegen erlaubt hohe Feldstärken und damit erhebliche Kraftentwicklung, jedoch mit zusätzlichen Eisenverlusten. Abbildung 12 zeigt den Induktivitätsverlauf eines Elektromagneten des realisierten Doppelhubmagnets im Falle der Verwendung von Ferritkernen. Die Induktivität zeigt eine signifikante Abhängigkeit von der Position bei kleinen Strömen, was einer sensorlosen Positionsschätzung zugutekommt. Somit konnte die in der FEM-Simulation verfolgte Optimierung auf eine hohe Sensitivität experimentell validiert werden. Jedoch zeigt sich, wie erwartet, eine Sättigung bei höheren Strömen, die zu Zweideutigkeiten über der Position führen. Eine eindeutige Positionsermittlung ist somit nicht möglich. Jedoch kann unter Kenntnisnahme der Induktivität des zweiten Elektromagneten mittels IDIM diese Zweideutigkeit aufgelöst werden.

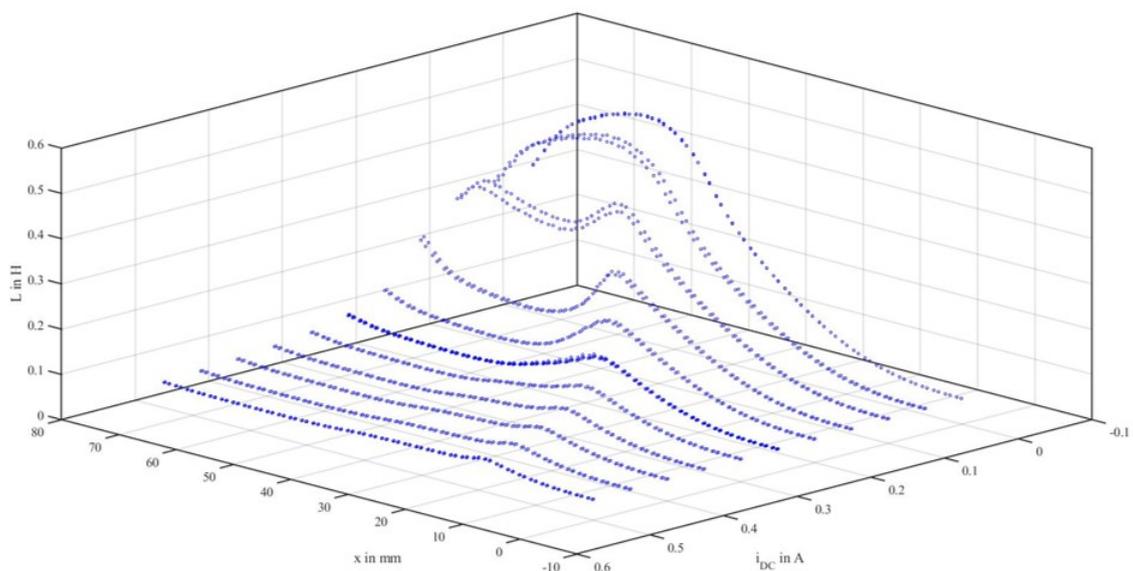


Abbildung 12: Induktivitätsverlauf einer der beiden Elektromagneten des Doppelhubmagnet-Aktors über verschiedenen Positionen und Strömen.

Durch den Einsatz der Technik an verschiedenen Hubmagneten, sowohl erworbenen als auch selbst entworfenen, konnte eine Machbarkeit der sensorlosen Positionsermittlung erfolgreich nachgewiesen werden. Alle Tests waren Ende des ersten Quartals 2022 beendet. Mit den vorliegenden positiven Erkenntnissen gilt somit AP 2.3 als abgeschlossen.

- Ein am LAT bereits vorhandener Prüfstand wurde im AP 2.4 sowohl konstruktiv als auch schaltungs- und softwaretechnisch angepasst und ausgebaut, um die in AP 2.1 erworbenen und gefertigten Aktoren anzubinden. Der realisierte Prüfstand erlaubt die vollständige Charakterisierung von linearen elektromagnetischen Aktoren hinsichtlich ihres Induktivitäts- und Kraftverhaltens. Zur Anbindung benötigte Flansche wurden ebenfalls konstruiert und gefertigt. Die Arbeiten am Prüfstand waren Ende 2020 abgeschlossen und mündeten in dem in Abbildung 13 gezeigten Prüfstand.

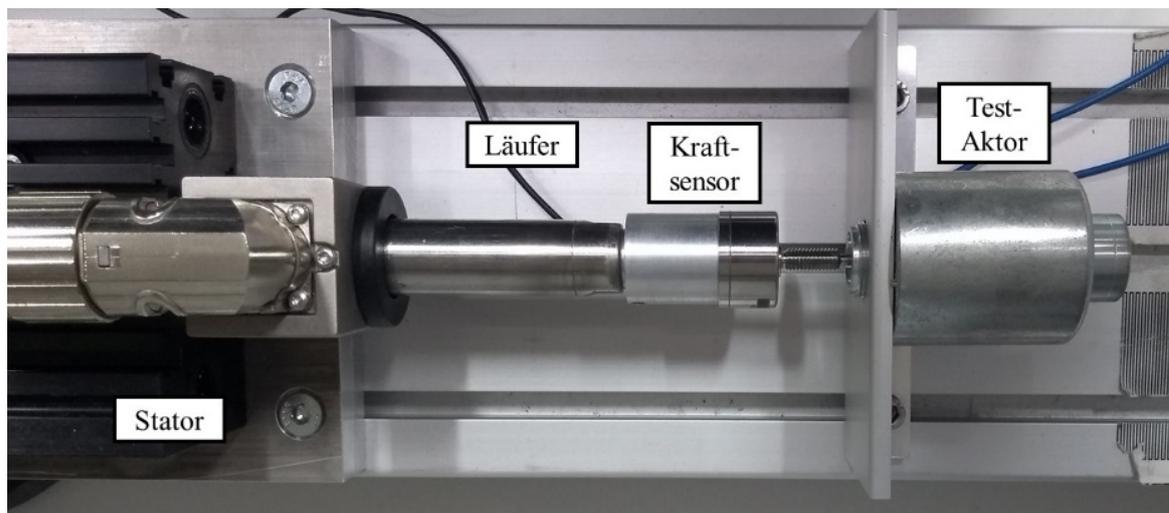


Abbildung 13: Prüfstand zur Charakterisierung von linearen elektromagnetischen Aktuatoren.

Arbeitspaket 3: „Anwendbarkeit und Nutzen von IDIM – Zustands- und Parameter-erkennung“:

AP 3: Anwendbarkeit und Nutzen von IDIM – Zustands- und Parameter-erkennung	1,90 MM
3.1 Ausloten der IDIM-Potenziale für die Zustands- und Parametererkennung	0,60 MM
3.2 Vergleichende Untersuchungen bei Elektromagneten gleichen und unterschiedlichen Typs	0,70 MM
3.3 Auswertung der mittels IDIM erhaltenen Signale im Kontext zu FEM-Simulationen zwecks Zuordnung physikalischer Motoreigenschaften	0,60 MM

- Innerhalb von AP 3.1 wurden zuerst Recherchen und Untersuchungen theoretischer Art durchgeführt. Zunächst wurden die Zusammenhänge zwischen statischer, differentieller und inkrementeller Induktivität untersucht, wobei letztere mittels IDIM ausgewertet werden kann. Solch eine inkrementelle Induktivität bildet sich, wenn ein ferromagnetisches Material mit einem Gleichfeld mit überlagertem Wechselfeld, in diesem Falle hervorgerufen durch Pulsweitenmodulationsansteuerung, angeregt wird. Die inkrementelle Induktivität weist eine schmetterlingsförmige Hysterese auf, die in Abbildung 14 näher gezeigt wird. Dieses hysteretische Verhalten überlagert, je nach Ausprägung im Material, alle Messungen mittels IDIM und beeinflussen damit die Genauigkeit der Positionsschätzung. Im Umkehrschluss kann diese Information aber auch genutzt werden, um zu diagnostizieren, inwiefern das Material magnetisiert bzw. geschädigt ist, wenn sich die Hysteresekurve vom Ideal unterscheidet. Eine Methode zur Modellierung der Hystereseeffekte und deren Kompensation bei der sensorlosen Positionsschätzung wurde in [19] veröffentlicht.

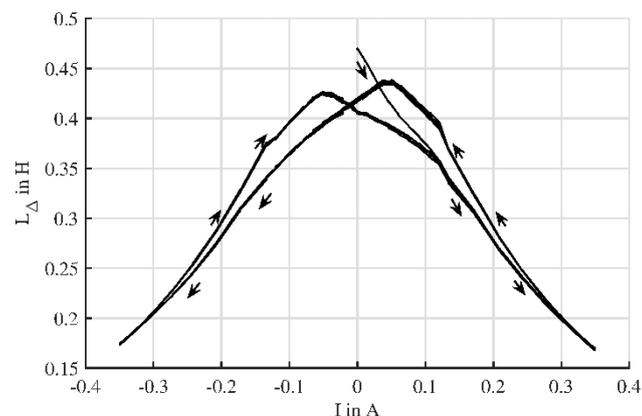


Abbildung 14: Verlauf der inkrementellen Induktivität in einem elektromagnetischen Aktuator [19].

Ferner wurde in der Arbeit [18] eine Methode zur Modellierung der Wirbelstromeffekte vorgestellt und ein Verfahren zum Schätzen der Wirbelstromverluste in Form eines Parallelwiderstands vorgestellt. Damit steht neben der inkrementellen Induktivität eine weitere physikalisch motivierte Größe zur Positionsschätzung und Zustandsbeobachtung zur Verfügung. Damit wurden innerhalb AP 3.1 die physikalischen Größen ausgewählt, die zu einer erweiterten Zustands- und Parametererkennung verwendet werden können, sowie mathematische Modelle zur Beschreibung dieser entwickelt, implementiert und validiert. Damit wurde AP 3.1 zu Jahresende 2021 erfolgreich abgeschlossen.

- Innerhalb von AP 3.2 wurden in enger Abstimmung mit AP 2.1 und AP 2.3 an verschiedenen Elektromagneten Parameter identifiziert. Abbildung 15 zeigt den Verlauf der inkrementellen Induktivität am Hubmagnet GTC-A-40 von Magnet-Schulz-Memmingen über

verschiedene Ströme und Positionen. Dabei ist deutlich das schmetterlingsförmige hysteresische Verhalten erkennbar, das mit abnehmender Ankerposition zunimmt. In der Arbeit [19] konnte dieses Verhalten mit einem Modell mit einer Genauigkeit von 1.6% abgebildet werden.

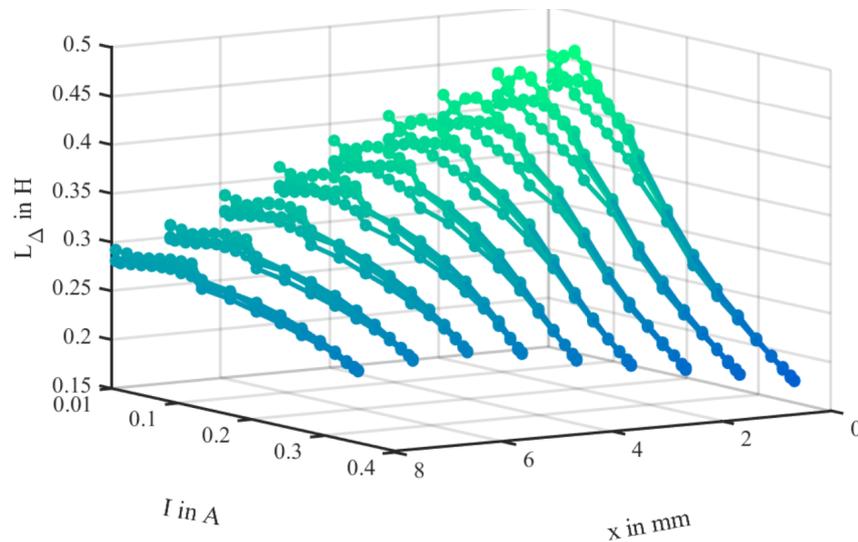


Abbildung 15: Kennfeld der inkrementellen Induktivität über verschiedene Ströme und Positionen [19]. Das hysteresische Verhalten nimmt mit abnehmender Position zu.

Am Hubmagnet ITS-LZ 1949 von Red Magnetics, einem Aktor mit einer starken Ausprägung von Wirbelströmen, konnte erfolgreich ein Algorithmus zur Schätzung des Wirbelstromwiderstandes implementiert und validiert werden. Damit ist die Kenntnis der aktuellen durch Wirbelströme verursachten Verluste möglich. Abbildung 16 zeigt den Verlauf des Wirbelstromwiderstandes über der Position bei verschiedenen festen Strömen. Durch die Kenntnis ist eine sensorlose Positionsschätzung sogar an Aktoren möglich, deren inkrementelle Induktivität keine eindeutige Schätzung der Position zulässt [18]. Durch die durchgeführten Arbeiten ist die Machbarkeit der Parametererkennung über das IDIM-Verfahren gezeigt worden, sodass AP 3.2 erfolgreich im ersten Quartal 2022 abgeschlossen worden ist.

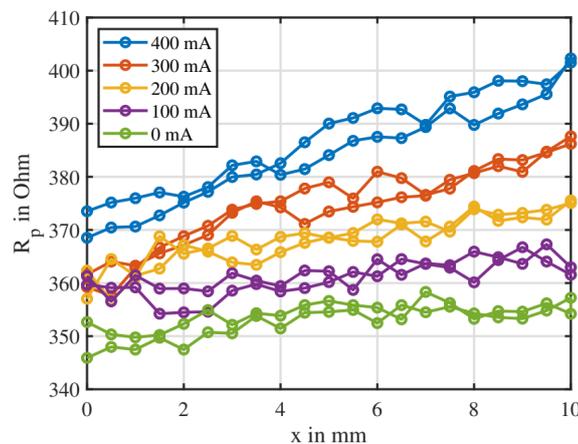


Abbildung 16: Verlauf des Wirbelstromwiderstandes über der Position bei verschiedenen festen Strömen [18].

- In enger Synchronisation mit AP 2.3 wurde AP 3.3 durchgeführt. Dabei wurde der in AP 2.3 erwähnte Doppelhubmagnet hinsichtlich einer großen Sensitivität zur sensorlosen

Positionsschätzung hin optimiert, was im Umkehrschluss auch eine einfache Identifizierung der Parameter zulässt. Aufgrund der großen Parallele zu AP 2.3 sei auf die dortigen Ergebnisse verwiesen, bei denen das gewünschte Induktivitätsverhalten durch Designmaßnahmen in den FEM-Simulationen erreicht und per experimenteller Messungen mit der IDIM-Technik validiert wurde. Die Induktivität zeigt bei kleinen Strömen eine signifikante Sensitivität bezüglich der Position, was eine Positionsschätzung deutlich erleichtert. Erst bei hohen Strömen treten Sättigungseffekte ein, die die Positionsabhängigkeit verringern oder Mehrdeutigkeiten verursachen. Hier kann durch Ausnutzung des zweiten Hubmagnets diese Mehrdeutigkeit aufgelöst werden. Andererseits konnten durch diese Versuche gezeigt werden, dass die physikalischen Eigenschaften des Materials in den Messungen deutlichst wiederzuerkennen sind, was ebenfalls die Überwachung des magnetischen Arbeitspunktes in solchen Aktoren ermöglicht. Weiterhin wurde während der Designphase besonderes Augenmerk auf Reduzierung der Eisenverluste wie Wirbelstromverluste gelegt. Durch entsprechende Messungen besonders im hochfrequenten Bereich konnte nachgewiesen werden, dass die Wirbelstromverluste in Form des Parallelwiderstandes deutlich reduziert werden konnten.

Arbeitspaket 4: „Übertragbarkeit von IDIM auf mehrphasige Antriebssysteme“:

AP 4: Übertragbarkeit von IDIM auf mehrphasige Antriebssysteme	1,20 MM
4.1 Durchführung grundlegender konzeptioneller Analysen zur Abschätzung des Umsetzungspotenziales	0,40 MM
4.2 Auswahl geeigneter PMSM und Durchführung praktischer Tests nach geeigneter Implementierung von IDIM	0,40 MM
4.3 Auswertung und Diskussion der mittels IDIM erhaltenen Signale vor dem Hintergrund erwarteter Ergebnisse	0,40 MM

- Zu Beginn von AP 4.1 wurden zunächst grundlegende Recherchen, Analysen und Modellierungen durchgeführt. Dies sollte die Machbarkeit der Übertragung der IDIM-Technik auf mehrphasige elektromagnetische Maschinen nachweisen. Das Ergebnis der Analyse des Stands-der-Technik zeigte, dass die Problemstellung am Ehesten den verbreiteten Sensorlos-Verfahren „INDirect Flux Detection by Online Reactance Measurement“ (INFORM) und den Verfahren der arbiträren Injektion nahesteht. Jedoch verwenden diese Verfahren meist eine numerische Ableitung des Stroms oder eine Überabtastung (Oversampling) des Stroms, was sich bei Ersterem negativ auf das Signal-Rausch-Verhältnis und bei Letzterem negativ auf den Rechenaufwand auswirkt. Wie bereits aus AP 1.5 und 2.1 ersichtlich, stellt die Erfassung mittels der IDIM-Technik einen guten Kompromiss aus Signal-Rausch-Verhältnis und Rechenaufwand dar. Als Resultat von AP 4.1 stellt sich somit vor dem technischen Hintergrund eine Übertragbarkeit von IDIM auf mehrphasige Antriebssysteme sowohl als möglich als auch als sinnvoll dar.
- In AP 4.2 wurden die in AP 4.1 durchgeführten Analysen und Modellierungen simulativ und experimentell validiert. Zur Zeit der Durchführung von AP 4.2 lag kein miniaturisierter IDIM-Schaltkreis vor, sodass die Machbarkeitsstudien mit den in AP 2.2 realisierten diskreten IDIM-Schaltungen durchgeführt worden sind. Aufgrund der begrenzten Bandbreite des diskreten Aufbaus musste eine Synchronmaschine mit entsprechend großer Zeitkonstante gewählt werden. Hierbei fiel die Auswahl auf die Permanentmagnet-Synchronmaschine TGN2-0054-80-320/T454 von TG Drives, die bereits in einem vorhandenen Prüfplatz am LAT eingebaut ist und über entsprechende Positionssensorik für Referenzmessungen verfügt. Die Implementierung von IDIM ist aufgrund der im Dreieck verschaltenden Windungen schwieriger als im Falle von Einphasen-Hubmagneten. Um dennoch das IDIM-Verfahren anwenden zu können, muss die PWM-Ansteuerung modifiziert werden, sodass definierte Schaltzustände in der Maschine hervorgerufen werden, was in Abbildung 17 detailliert gezeigt wird. Innerhalb dieser Schaltzustände kann dann die jeweilige Phaseninduktivität mittels der IDIM-Technik ausgewertet werden.

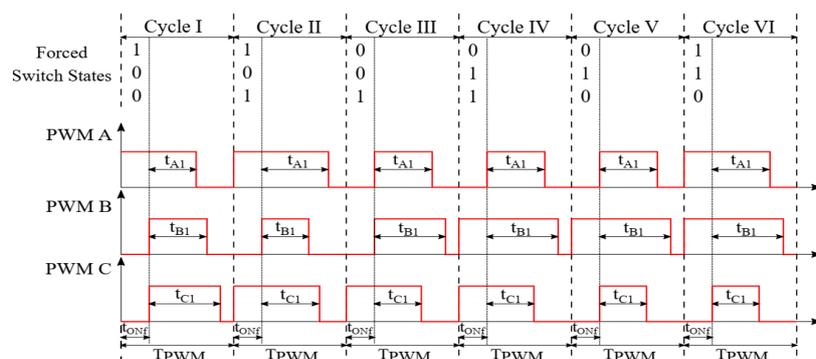


Abbildung 17: Modifizierte PWM-Ansteuerung zur Übertragung der IDIM-Technik auf dreiphasige Maschinen.

Der mittels IDIM verarbeitete Strom ist lediglich der Zwischenkreisstrom, sodass nur ein Stromsensor benötigt wird, was die Anzahl an benötigten Komponenten weiter senkt. Mithilfe der gezeigten Implementierung konnten erste experimentelle Untersuchungen durchgeführt werden. Somit konnte AP 4.2 erfolgreich abgeschlossen werden.

- Nach den erfolgten Messungen werden die Signale in AP 4.3 ausgewertet und diskutiert. Die per IDIM bestimmten Phaseninduktivitäten werden zur Schätzung der elektrischen Rotorlage genutzt. Im Experiment dient ein Hochpräzisionsencoder mit 18 Bit Auflösung als Referenzmessung. Abbildung 18 zeigt die geschätzte Rotorlage im Vergleich zur per Encoder gemessenen Rotorlage. Bei niedrigen Geschwindigkeiten kann die Rotorlage mit hinreichender Genauigkeit geschätzt werden und die Schätzung folgt dem realen Verlauf der Rotorlage.

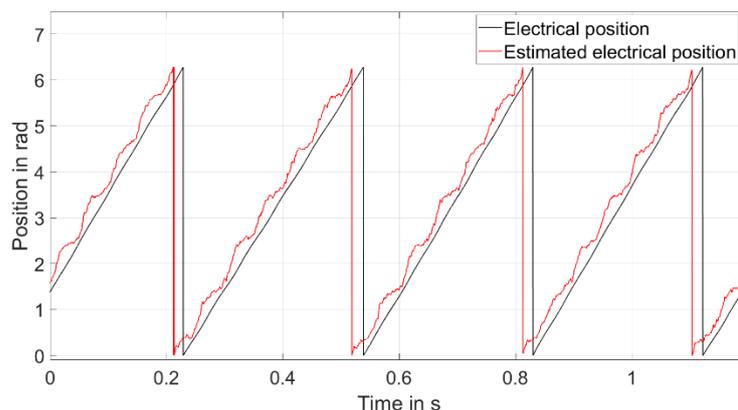


Abbildung 18: Mit der IDIM-Technik geschätzte Rotorlage (rot) im Vergleich zur gemessenen Rotorlage (schwarz).

Mithilfe dieser Ergebnisse kann erfolgreich die Übertragbarkeit von IDIM auf dreiphasige Maschinen demonstriert werden. Die in AP 4 realisierten Arbeiten sind jedoch nur der Startpunkt weitergehender Untersuchungen, denn es bestehen noch Optimierungspotentiale technischer und wissenschaftlicher Natur. Auf Seiten der Technik muss die Schaltung hinsichtlich höherer Bandbreite erweitert werden, was jedoch durch den vorliegenden IC erreicht worden ist, da dieser höhere Taktfrequenzen erlaubt. Außerdem muss die Stromsensorik optimiert werden, sodass dort ebenfalls eine höhere Bandbreite möglich ist. Auf wissenschaftlicher Seite sind eine Verbesserung des PWM-Musters und des Auswertalgorithmus zu nennen, für die in der Literatur aber bereits Ansätze existieren. Im Detail geht es hierbei auch um die Nord-Südpol-Erkennung, die Kompensation von Harmonischen im Signal sowie die Problematik des Einflusses des Statorstroms. Durch die bisherige Auswertung werden Effekte der rückinduzierten Spannung und des Spannungsabfalls über dem Wicklungswiderstand nur teilweise kompensiert, was bei höheren Drehzahlen oder Strömen zu Schätzfehlern führt. Innerhalb AP 4.3 wurde erfolgreich die Machbarkeit gezeigt, sodass nun den bestehenden Limitierungen in folgenden Projekten im Verwertungsprozess entgegengetreten werden kann.

Arbeitspaket 5: „Dokumentation der Ergebnisse mit Ausblick“:

AP 5: Dokumentation der Ergebnisse mit Ausblick	1,40 MM
5.1 Dokumentation der durchgeführten Arbeiten	0,70 MM
5.2 Vergleich und Diskussion der Versuchsergebnisse	0,70 MM

Arbeitspakete 5.1 - 5.2:

- Im April 2022 wurden innerhalb von AP 5.1 sämtliche durchgeführten Arbeiten dokumentiert und in Form dieses Abschlussberichtes niedergeschrieben. Der während der Arbeiten geschriebene Software-Code wurde in ein LAT-internes Verzeichnis mit Versionierung hochgeladen, sodass er allen Mitarbeitern zur Verfügung steht. Die entworfenen Designs, Schaltpläne, Layouts, Konstruktionen und Messdaten werden über einen Datenserver archiviert.
- In AP 4.2 wurden die Versuchsergebnisse aufgearbeitet, visualisiert und diskutiert. Die Ergebnisse sind in den jeweiligen Berichtsabschnitten zu AP 2 - 4 zu finden.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Bei diesem Projekt wurden die Gelder laut Gesamtfinanzierungsplan im Zuwendungsbescheid vom 05.03.2020 komplett ausgeschöpft:

- Bundesmittel abrufbar per Zahlungsanforderungen: 83.787,20€
- Mittel Dritter (WellGO): 35.908,80€

Per Zahlungsanforderung abgerufen wurden bis dato 73.312,64€. Der Differenzbetrag zur bewilligten Fördersumme in Höhe von 10.474,56€ wird mit dem Schlussverwendungsnachweis abgerufen.

Zum Zeitpunkt der Berichtserstellung lag der wirtschaftliche Projektabschluss noch nicht in vor. Dieser Bericht ist angestoßen und wird innerhalb der vom Projektträger vorgegebenen Frist erstellt. Auf diesen wirtschaftlichen Abschluss bzw. den Schlussverwendungsnachweis wird für weitere Details verwiesen.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit lässt sich aus dem Stand der Technik heraus motivieren. Bestehende Sensorlostechniken für elektromagnetische Aktoren weisen entweder ein schlechtes Signal-Rausch-Verhältnis auf oder beanspruchen viele Rechenressourcen. Einen guten Kompromiss zwischen beiden Größen zu finden ist schwierig. Dennoch werden solche Verfahren benötigt, um die Digitalisierung sowie den Trend hin zu Industrie 4.0 mitsamt Condition Monitoring und Predictive Maintenance hin zu erlauben, ohne die Aktorgröße und -kosten maßgeblich zu steigern. Im Rahmen seiner Forschungstätigkeiten hat der LAT neben wissenschaftlichen Veröffentlichungen auf Konferenzen und in Zeitschriften auch eine Patentanmeldung über die Universität des Saarlandes durchgeführt.

Mithilfe der in diesem Projekt durchgeführten Arbeitspakete konnte der zentrale Schaltkreis aus dem Patent optimiert und in eine mikroelektronische Fassung umgesetzt werden, was die Verwertungschancen deutlichst erhöht. Der resultierende IC weist eine hohe Bauraumausnutzung, eine höhere Flexibilität sowie bei perspektivisch erhöhten Stückzahlen einen geringeren Stückpreis auf. Ferner wurden die Fähigkeit der IDIM-Technik zur sensorlosen Ankerlageerkennung experimentell validiert und die Vorteile gegenüber dem Stand der Technik herausgearbeitet. Darauf aufbauend wurde die Tauglichkeit der IDIM-Technik zur Parameter- und Zustandserkennung sowie zur Übertragbarkeit auf mehrphasige Antriebssysteme, wie beispielsweise Drehfeldmaschinen, erörtert und festgestellt. Damit kann die IDIM-Technik zukünftig auch auf andere Aufgabenstellungen angewandt werden, was die Verwertungschancen und Anwendungsfelder deutlichst ausbaut. Mit den in den Arbeitspaketen durchgeführten Schritten konnten Verwertungsinteressierten einige Risiken abgenommen werden, ein erweiterter Nutzen der IDIM-Technik aufgezeigt und perspektivisch die Fertigungskosten deutlichst gesenkt werden. Die weiteren Arbeiten in Richtung Serienüberführung lassen sich nun wirtschaftlich und zeitlich konkretisieren, was das Risiko für die Verwerter kalkulierbarer macht, was Ziel dieses Projektes war.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplanes

Während die Verwertung vor Projektbeginn, wie an Universitäten üblich, nur auf wissenschaftliche und technische Veröffentlichungen beschränkt war, und letztlich zu der Patentanmeldung führte, konnten mithilfe des Projektvorhabens konkrete F&E-Schritte unternommen werden, die jenseits der wissenschaftlichen Verwertbarkeit liegen.

Durch die in den Arbeitspaketen 1 bis 4 geleistete Arbeit konnte für Verwertungsinteressierte der Nutzen der IDIM-Technik verdeutlicht, sowie Risiko und Kosten gesenkt werden. Wie in der Anlage „Wirtschaftliche Erfolgsaussichten“ zum Förderantrag auf der Vorhabensbeschreibung „IV Verwertungsplan“ geschildert, plant der LAT zunächst die Zusammenarbeit mit einem oder mehreren mittelständischen Unternehmen. Hierzu zählt vor allem die Firma WELLGO Systems GmbH, die mit ihrem Eigenanteil auch zum Erfolg dieses Vorhabens beigetragen hat. Hierbei könnte WELLGO Systems den entwickelten IC in seine Endprodukte integrieren. Dieses Model baut auf eine nachhaltige und umfassende Verwertung und lässt sich schrittweise auf größere Firmen als direkte Lizenznehmer oder Unterlizenznehmer ausweiten. Konkrete Ansprechpartner sind hierbei ETO Magnetic aus Stockach sowie die Bürkert Werke GmbH aus Karlsruhe, für die bereits Machbarkeitsstudien durchgeführt worden sind. Die Firmen HYDAC in Gersweiler sowie Magnet Schulz GmbH in Memmingen äußerten ebenfalls Interes-

se an der IDIM-Technologie. Im Zuge des geplanten Verwertungsszenarios findet ein Großteil der Wertschöpfung in Deutschland statt.

Dieser an sich bereits positive Ausblick kann durch hervorrufende Synergieeffekte ebenfalls noch weiter ausgebaut werden. Einerseits konnte in diesem Projekt die in dem Vorgängerprojekt mit der Kennziffer 03THW14H02 erarbeitete miniaturisierte FRIC-Schaltung, welche noch Mängel aufwies, erfolgreich und kostenneutral optimiert werden. Die in AP4 durchgeführten Machbarkeitsuntersuchungen zur Übertragbarkeit von IDIM auf mehrphasige Aktorsysteme verliefen derart erfolgreich, dass ein DFG-Einzelförderantrag mit dem Namen „Ressourcen-Effiziente Sensorlose Regelung von Kleinst-Permanentmagneterregten Synchronmaschinen“ verfasst worden ist und erfolgreich unter der Kennziffer NI 1369/5-1 AOBJ:676068 eingeworben werden konnte. Das Projekt läuft offiziell seit 01.11.2021 und knüpft an die in AP 4 abgeschlossenen Arbeiten an. Ferner wurde auch das dem Vorhaben zugrundeliegende Patent Ende 2021 durch das europäische Patentamt angenommen, sodass einer weiteren Verwertung nichts im Wege steht.

Weitergehend konnten alle interessierten Lehrstuhlmitarbeiter für die WELLGO Systems GmbH als Mitarbeiter gewonnen werden, sodass darüber bereits ein Know-how-Transfer hin zu dem Unternehmen gelungen ist, das seinen Eigenanteil zu diesem Förderprojekt geleistet hat. Mit den ansprechenden Ergebnissen dieses Projektvorhabens beabsichtigt nun die Firma WELLGO Systems GmbH mit der Universität des Saarlandes in konkrete Lizenzverhandlungen zur Lizenzierung der FRIC- und der IDIM-Patente zu treten, mit dem Ziel einer Vermarktung beider Technologien. Die Ernsthaftigkeit dieses Vorhabens wird dadurch bekräftigt, dass die Firma WELLGO Systems sowohl beim WIPANO-FRIC- als auch beim WIPANO-IDIM-Förderprojekt den fehlenden 30%-igen Anteil zur Förderung des BMWi übernommen hat.

2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es konnte kein Fortschritt in Form von einschlägigen Schutzrechtsanmeldungen oder wissenschaftlichen Veröffentlichungen auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen festgestellt werden.

2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Teilergebnisse der hier vorgestellten Arbeitspakete wurden auf wissenschaftlichen Konferenzen und in wissenschaftlichen Zeitschriften veröffentlicht:

- [17] N. König, M. Nienhaus, und E. Grasso, „Analysis of Current Ripples in Electromagnetic Actuators with Application to Inductance Estimation Techniques for Sensorless Monitoring“, *Actuators*, Bd. 9, Nr. 1, S. 17, März 2020, doi: 10.3390/act9010017.
- [18] N. König und M. Nienhaus, „A Solution to Ambiguities in Position Estimation for Solenoid Actuators by Exploiting Eddy Current Variations“, *Sensors*, Bd. 20, Nr. 12, S. 3441, Juni 2020, doi: 10.3390/s20123441.
- [19] N. König, Y. Carbon, M. Nienhaus, und E. Grasso, „A Self-Sensing Method for Electromagnetic Actuators with Hysteresis Compensation“, *Energies*, Bd. 14, Nr. 20, S. 6706, Okt. 2021, doi: 10.3390/en14206706.