

# Forschungsbericht

2017



# Auswertung und Visualisierung von Industrie 4.0 Daten durch Anwendung von Clusteralgorithmen

Prof. Dr. Dieter Meiller  
Dipl.-Phys. Florian Schöler-Niewiera

## Zusammenfassung

Die Entwicklungen innerhalb des vorgestellten Projektes fokussieren die Ausarbeitung eines innovativen Analyse-Tools, welches für die Visualisierung und Optimierung von Produktionsprozessen und deren Daten eingesetzt werden soll. Für die Auswertung sollen Technologien der Bereiche Visual Analytics, Machine Learning und Clustering zum Einsatz kommen und weiterentwickelt werden. Die interaktive Darstellung wird durch Adaption und Anwendung von Algorithmen aus dem Schwarmverhalten realisiert und mit der automatisierten Auswertung gekoppelt. Durch den Einsatz des Systems soll es ermöglicht werden, die Effizienz, Qualität und Übersicht innerhalb eines Prozesses oder der Produktion zu steigern. Dies ist besonders im Kontext der derzeitigen Entwicklungen im Themenbereich Industrie 4.0 erstrebenswert.

## Abstract

The developments in the introduced project focus on the evaluation of an innovative analysis tool which will be used for the visualization and optimization of product processes and other data. Technology from the areas visual analytics, machine learning and clustering will be used and developed further for the evaluation. The interactive display will be created through the adaptation and use of algorithms out of the swarm behavior and will be coupled with the automatized evaluation. The use of the system will enable the efficiency, quality and oversight within a process or the production to be improved. This is especially desirable in the context of the current development in the area industry 4.0.

## 1 Einleitung

Heutzutage werden Anlagen in modernen digitalen Fabriken bereits überwacht und ferngesteuert. Dabei werden große Datenmengen für das Monitoring und die Steuerung generiert und an die Maschinenschnittstellen übermittelt. Der nächste Schritt ist eine Analyse dieser Daten, um unter anderem zielgerichtete Vorhersagen von Produktionsvariablen zu ermöglichen.

Die im Rahmen dieses Projektes entstehende Lösung soll als eine sich abwechselnde Kombination aus maschineller Auswertung und interaktiver Visualisierung konzipiert und realisiert werden.

Innerhalb des Forschungsberichts werden die ersten Ergebnisse und umgesetzte Ideen sowie geplante Arbeiten auf diesem Gebiet vorgestellt. Die Ergebnisse zielen insbesondere auf Anwender aus dem Bereich der kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMUs) ab, welchen

durch die Arbeiten und Resultate die Vorteile von Industrie 4.0 nutzbar gemacht werden sollen. Das Projekt ist eines von vier Teilprojekten des vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie geförderten Projektes ISAC@OTH-AW.

## 2 Aktuelle Anforderungen im industriellen Umfeld

Der Wunsch und eine bestehende Notwendigkeit nach Optimierungen, Visualisierungen und der Handhabung von großen Datenaufkommen ist bei den Unternehmen ausgeprägter als jemals zuvor. Technologien, die mit der Einführung der Industrie 4.0 nutzbar gemacht werden können, könnten das Potenzial haben, bestehende Probleme zu lösen und Produktionsprozesse intelligenter und einfacher zu gestalten. Dieses soll in dem vorliegenden Projekt angegangen und entsprechend angepasst werden.

Der Kundensupport von Helpdesk Centern ist beispielsweise eines dieser Probleme. Eine innovative Speichermöglichkeit sowie die automatische Analyse von Kundenanfragen könnten eine schnellere und verlässlichere Grundlage bilden, um eine für jede Anfrage eindeutige Lösung aufzuweisen. Hierbei könnte eine Zeitreduzierung bei der Bearbeitung der Kundenanfragen zu einer gesteigerten Effizienz, einer höheren Kundenzufriedenheit und weniger Aufwand für die Mitarbeiter führen.

Ein weiteres unverzichtbares Aufgabenfeld für die Anwendung der Industrie 4.0 Vorteile ist die Weiterentwicklung und Optimierung von Produktionsabläufen und Maschinenparametern, zum Beispiel bei CNC-Fräsen, Bohren, Spritzgussgießen oder 3D-Druck. Die Verbesserung dieser Parameter durch eine intelligente Analyse von Daten würde beispielsweise dabei helfen, schnellere Prozesszeiten oder materialschonendere Werkzeugeinsätze zu erreichen.

Eine weitere mögliche Anwendung ist die Auswertung von Sensordaten aus Produktionsprozessen: Heutzutage ist es möglich, für sämtliche Produktionsschritte eine Datenbank aufzubauen. Diese bietet dann die Möglichkeit, bereits im Vorfeld optimale Parameter für wechselnde und neue Prozesse auszuwählen, ohne diese in aufwendigen Vorversuchen oder durch erfahrene Profis ermitteln zu müssen. Mit dieser Hilfe wären auch Nichtexperten in der Lage, Prozesse zu initialisieren, da sie hierbei aktiv vom System unterstützt werden, indem sie neben den notwendigen auch die nahezu optimalen Parameter aus der Datenbank erhalten würden.

Ein Anwendungsszenario ist zudem auch die langfristige Archivierung von großen Datenvorkommen sowie die anschließende Analyse ausgewählter relevanter Daten in Kombination mit innovativen und informativen Visualisierungsmethoden. Ziel ist die Identifizierung unerkannter Prozesskorrelationen, die Darstellungsverbesserung von Produktionsübersichten oder eine einfachere Erkennung von unbekanntem Fehlerquellen.

Weiterhin kann die Datenauswertung für logistische Probleme von diesen Optimierungen profitieren, um Betriebszeiten zu reduzieren oder eine Verschwendung von Platz und Ressourcen zu vermeiden.

### 3 Aktueller Stand des Teilprojekts

Real aufkommende Produktionsdaten aus Industriemaschinen, wie beispielsweise einer CNC-Fräsmaschine, wurden im ersten Schritt des Projekts gesammelt. Diese Daten umfassen Informationen wie z. B. Zeitstempel, Werkzeugpositionsdaten, Geschwindigkeitsparameter. Alle aufkommenden Informationen werden in einer echtzeitkompatiblen „NoSQL“-Datenbank gespeichert. Im derzeitigen Projektverlauf ist dies eine Datenbank des Typs „MongoDB“. Hierbei handelt es sich um eine Open-

Source, Cross-Plattform und dokumentenorientierte Datenbank. Aufgrund ihrer Schemafreiheit ist es möglich, verschiedenste Arten von Daten in großen Mengen zu sammeln. Zusätzlich werden statische Informationen (Werkzeugparameter, Werkstückparameter etc.) zu diesen dynamischen Maschineninformationen in der Datenbank gespeichert.

Die Hauptaspekte des folgenden Analyseprozesses sind das Clustering und die Klassifizierung von Daten mittels unüberwachtem maschinellen Lernens<sup>[1]</sup>. Insbesondere sollen große Datenpools mit hochdimensionalen Daten und einer Vielzahl unterschiedlicher Datentypen verarbeitet werden. Um eine rechenintensive Dimensions-Reduktion zu vermeiden, werden die Daten in einem ersten Schritt mittels Modellen und Algorithmen aus den Bereichen der Schwarmvisualisierung<sup>[2]</sup> und Partikel-Schwarm-Optimierung<sup>[3],[4],[5]</sup> visualisiert, um eine Selbstorganisation diverser Datenobjekte zu ermöglichen. Dabei werden die Daten-Objekte in einem zweidimensionalen Raum dargestellt, wobei dort die Achsen keine Objekt-Merkmale repräsentieren. Sich ähnelnde Objekte bewegen sich aufeinander zu, wobei die Ähnlichkeit von der Übereinstimmung der jeweiligen Merkmale bestimmt wird<sup>[6]</sup>. Hierfür wurde ein eigenes Framework „DataOcean@ISAC“ (Abbildung 1) für die Visualisierung und Datenanalyse implementiert, welches kontinuierlich weiterentwickelt wird. Dieses stellt Prozessdaten und Parameter als individuelle autonome Partikel in einer web-basierten Umgebung dar. Damit sich diese Datenstrukturen selbst organisieren können, wurden entsprechende Algorithmen implementiert, welche auf Schwarm-Modellen<sup>[7]</sup> und Partikel-Schwarm-Optimierung basieren. Hierdurch finden sich Partikel zu kleinen Gruppen (Clustern) zusammen, die sich auf der Darstellungsfläche durch den „Ocean“ bewegen.

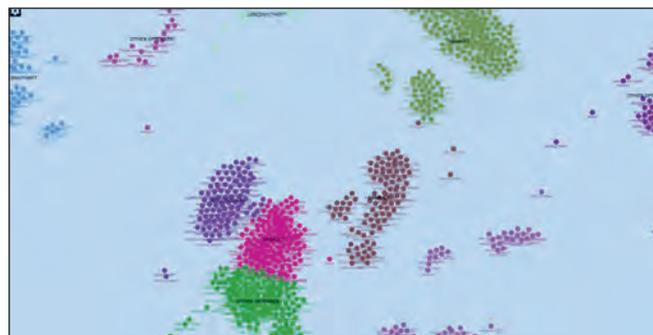


Abbildung 1: Clusterbildung während einer laufenden Instanz bei der Schwarmvisualisierung „DataOcean@ISAC“

Darüber hinaus wird eine Performance-Optimierung der DataOcean@ISAC-Visualisierung angestrebt. Der endgültige Algorithmus ist darauf ausgelegt, mehrere tausend Datenobjekte zu verwalten, abhängig von der verwendeten Hardware. Die Anzahl darstellbarer Partikel muss verbessert werden, um das Visualisierungs-Framework mit großen Datenstrukturen nutzbar zu machen. Die Verwendung einer JavaScript Visualisierungs-Runtime für

das Framework bietet den Vorteil, dass das Programm browserbasiert ausgeführt werden kann und an jede Anzeigengröße anpassungsfähig ist. Einer Verbesserung der Leistungsfähigkeit garantiert zudem die Anwendung der Software, sowohl auf leistungsschwächeren Geräten wie Tablets oder Smartphones als auch auf leistungsstarken PCs, Touch-Tischen oder großen Touch-Wänden.



Abbildung 2: „DataOcean@ISAC“ im Einsatz auf einer 84"-Touch-Wall zur Visualisierung und Manipulation für den Nutzer

#### 4 Ergebnis/Zusammenfassung/Ausblick

Aktuelle Förderausschreibungen und Anfragen aus der Industrie zeigen, dass Bedarf zur Handhabung und Auswertung von großen Datenmengen besteht, um die Effizienz in verschiedenen Bereichen der Produktion zu steigern. Die ersten Ergebnisse dieses Projektes veranschaulichen, dass die Darstellung von Daten in Form von Partikelschwärmen in Kombination mit interaktiven Clusterverfahren eine vielversprechende Möglichkeit ist, aufschlussreiche Daten übersichtlich zu visualisieren und zu analysieren. Dieser Bericht erwähnt nur eine Möglichkeit der Realisierung des Clustervorgangs und der Schwarmbildung. Im Fortlauf des Projektes werden weitere Verfahren getestet und mit der aktuellen Implementierung verglichen: Da der k-Means-Algorithmus nur (hyper-)sphärische Cluster ermöglicht, sollen zukünftig dichtebasierte Algorithmen eingesetzt werden<sup>[8]</sup>. Auch sollen andere Schwarm-Algorithmen getestet werden, wie beispielsweise Ameisen-Algorithmen<sup>[9]</sup>.

---

#### Referenzen:

- [1] Na, Wenbo. (2015). Research on well production prediction based on improved extreme learning machine, in International Journal of Modelling, Identification and Control, S. 238–247
- [2] Meiller, D. (2015). Diving into the Data Ocean, International Federation for Information Processing 2015, Interact 2015, Part IV, LNCS 9299, S. 465–468
- [3] Maltese, J., and Ombuki-Berman, B. (et al.) (2015). Co-operative Vector-Evaluated Particle Swarm Optimization for Multi-Objective Optimization, in Conf.proc. Computational Intelligence 2015, IEEE Symposium Series on IEEE
- [4] Shafeeq, A., & Hareesha, K. S.(2012). Dynamic Clustering of Data with Modified k-Means Algorithm, International Conference on Information and Computer Networks (CICIN 2012), IPCSIT vol. 27, S. 221–225
- [5] Kuo, R. J., and Wang, M. J. (eds.) (2011). An application of particle swarm optimization algorithm to clustering analysis, Soft Computing, 15(3), S. 533–542
- [6] Meiller, D. & Niewiera, F. (2016). Data Visualization and Evaluation for Industry 4.0 using an interactive k-Means Algorithm, in Conf. Proc. WSCG 2016 – 24nd International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision
- [7] Reynolds, C. W. (1987). Flocks, Herds and Schools: A Distributed Behavioural Model, in In ACM SIGGRAPH computer graphics 21 (4), S. 25–34
- [8] Birant, D., & Kut, A. (2007). ST-DBSCAN: An algorithm for clustering spatial–temporal data, Data & Knowledge Engineering, 60(1), S. 208–221
- [9] Coloni, A. et al. (1992). An Investigation of some Properties of an “Ant Algorithm”, in PPSN, S. 509–520

## Fördergeber:

Bayerisches Staatsministerium für  
Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie



## Kontakt:



**Prof. Dr. Dieter Meiller**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Elektrotechnik, Medien  
und Informatik  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

d.meiller@oth-aw.de  
www.isac-oth.de



**Dipl.-Phys. Florian Schöler-Niewiera**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Elektrotechnik, Medien  
und Informatik  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
im Projekt ISAC@OTH-AW,  
Arbeitsgruppe HMI  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

f.schoeler-niewiera@oth-aw.de  
www.isac-oth.de

# Wie genau sind additive Verfahren?

## Ein Qualitätsprüfteil zur Beurteilung der Form- und Lageabweichungen von „3D-Druckern“

### Einleitung

Die Druckqualität verschiedener additiver Verfahren zu vergleichen, fällt aufgrund der unterschiedlich zugrunde liegenden physikalischen Prinzipien und vieler auf dem Markt verfügbarer Geräte schwer. Bevor das volle Potenzial des 3D-Drucks erkannt und umgesetzt werden kann, stellt sich oftmals die Frage nach einem Qualitätsvergleich bei Standardgeometrien. Zu diesem Zwecke wurde im Projekt „Additive Fertigung“ in Zusammenarbeit mit der Siemens AG in Amberg an der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden ein universelles Prüfteil entwickelt, dessen Qualitätsauswertung dem Anwender eine Übersicht zu den Potenzialen eines additiven Fertigungsverfahrens aufzeigt. Die wesentlichen Anforderungen dieses Teiles waren sowohl das Kriterium der Kompaktheit (50,5 mm Kantenlänge und 60 cm<sup>3</sup> Volumen) als auch die Möglichkeit der einfachen Beurteilung von optischen und maßlichen Merkmalen. Des Weiteren sollte das Qualitätsprüfteil eine Ablesung von thermischen Verzug und Schwindung ermöglichen. Neben einer einfachen Zugänglichkeit der zu beurteilenden Geometrien wurden 12 Qualitätsmerkmale designt, um typische druckerspezifische Schwierigkeiten transparent zu machen. Siehe dazu auch Abbildung 1.

### Introduction

Due to different underlying physical principles and many on the market available devices it's difficult to compare the print quality of different additive methods. In order to identify and implement the full potential of 3D printing the user is often confronted with the question of a quality index of standard geometries. For this purpose a universal quality test device was developed as a part of the project „Additive Manufacturing“ in cooperation with Siemens AG at the Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden. The quality evaluation gives the user an overview of the potential of an additive manufacturing process. The essential requirements of this part were both the criterion of compactness (50,5 mm square and 60 cm<sup>3</sup> volume) and the possibility of easy assessment of optical and dimensional characteristics. Furthermore the quality test device should allow evaluate the thermal warpage and shrinkage. In addition to easy accessibility of the assessed geometries 12 quality features have been designed to make typical printer-specific problems transparent. See also Figure 1.

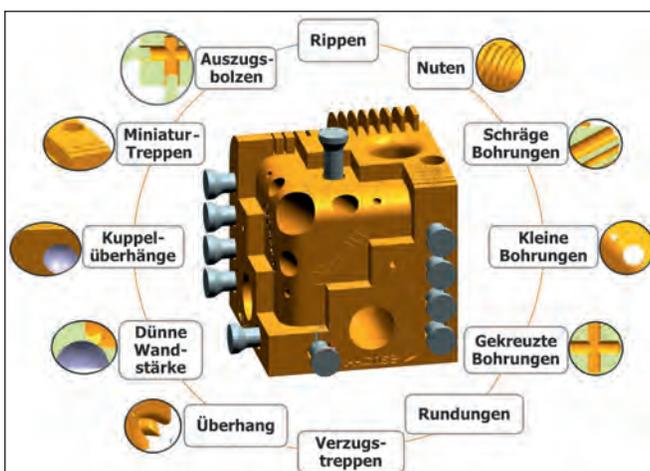


Abbildung 1: Qualitätsprüfteil der OTH Amberg-Weiden mit 12 Merkmalen zur Überprüfung von additiven Verfahren

## Merkmale des Qualitätsprüfteiles

Aus diesem Grund enthält das Qualitätsprüfteil Überhänge und Bohrungen, die in bestimmten additiven Verfahren nur mit Stützstrukturen hergestellt werden können. An der Qualität dieser Merkmale zeigt sich, wie die Überhänge von einer Slicer-Software unterstützt werden, aber auch orientierungs- und materialabhängige Verformungen werden sichtbar. Als Hauptmerkmal enthält das Qualitätsprüfteil Treppenstufen, die pro Raumachse doppelt ausgeführt sind. Die maßlichen Abweichungen der Stufenhöhe und -breite geben Aufschluss über den Verzug des Bauteils. Sind die Abweichungen der doppelt ausgeführten Stufen in einer Richtung identisch, so ist eine „Kalibrierung“ des Bauteils oder des Druckers vor dem Druck möglich. Neben den großen Treppen enthält das Qualitätsprüfteil Miniaturtreppen. Diese geben eine wichtige Auskunft über die Schichtauflösung des jeweiligen generativen Verfahrens und wie die Software diese umsetzt. Die Abstufungen wurden so gewählt, dass diese zwischen den Standard-Schichtauflösungen gängiger 3D-Drucker liegen. Sind eine oder mehrere Miniaturstufen nicht am gedruckten Qualitätsprüfteil zu finden, so wurden diese von der Software nicht erkannt oder liegen außerhalb der möglichen Auflösung der Drucker. Die Nuten und Lamellen an der Oberseite des Qualitätsprüfteils geben eine Übersicht der minimalen Strukturbreiten des additiven Verfahrens. Neben der Schichtauflösung in Z-Richtung geben die Nuten und Lamellen an der Oberseite des Qualitätsprüfteils eine Übersicht der minimal erreichbaren Strukturen in XY-Richtung des additiven Verfahrens. In den Ausprägungen der Lamellen zeigt sich, welche Wandstärken möglich sind, während die Nuten Auskunft über Materialverklebungen in engen Kanälen geben. Im unteren Bereich des Qualitätsprüfteils ist die Oberfläche eines Kuppelüberhangs 6 µm von der Oberfläche einer Bohrung entfernt. Durch diese fast punktförmige Berührung beider Oberflächen ergibt sich je nach additiven Verfahren eine einzelne dünne Schicht des Baumaterials. Dadurch ist die Porosität des Materials optisch prüfbar, was insbesondere bei pulverbasierenden Verfahren einen Zusatznutzen darstellt.

Mittels additiver Fertigungsverfahren können auch bewegliche Baugruppen in einem Herstellungsprozess realisiert werden. Dies ist beispielsweise interessant für Bauteile, die über integrierte Funktion wie Scharniere oder Linearführungen verfügen. Dazu enthält das Qualitätsprüfteil Auszugsbolzen, mit deren Hilfe druckerabhängig herausgefunden werden kann, welche Spaltmaße noch zu einer beweglichen Baugruppe führen können. Wenn sich die Bolzen über eine Auszugsvorrichtung noch bewegen lassen, dann ist das gegebene Spaltmaß ein Richtwert für die Gestaltung von beweglichen Teilen. In Summe enthält das Qualitätsprüfteil 12 verschiedene Merkmale, die optisch und taktil erfasst werden können.

## Messtechnik

Für die Vergleichbarkeit der additiven Verfahren wird eine messtechnische Auswertung der Qualitätsprüfteile notwendig. Diese geschieht im Messraum der OTH Amberg-Weiden. Ein Multisensorkoordinatenmessgerät der Firma Werth Messtechnik stellt durch optische und taktile Messungen die Qualität der Bauteile fest. Über einen schwenkbaren Tastkopf werden die Merkmale auf Form- und Lageabweichungen in den 6 Ebenen des Qualitätsprüfteils geprüft. Siehe Abbildung 2. Eine besondere Herausforderung spielt dabei die Zugänglichkeit aller Geometrien in einer Aufspannung. Diese muss sowohl den Antastkräften widerstehen als auch eine Wiederholgenauigkeit für eine Serienmessung bieten. Geometrische Merkmale, die in Z-Richtung zugänglich oder die für eine taktile Antastung zu filigran sind, werden von einem optischen Messsystem erfasst.

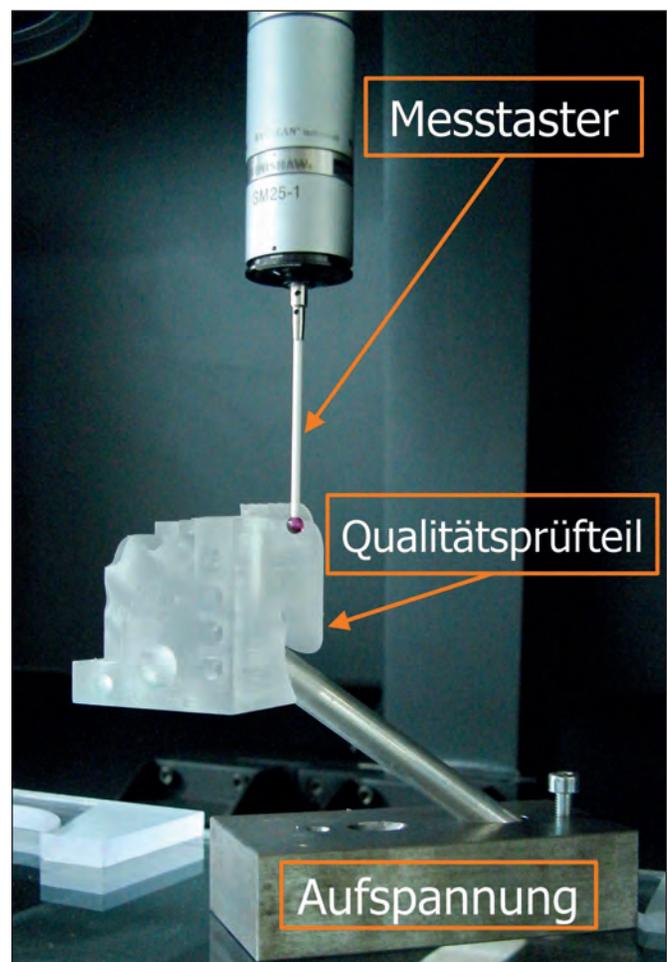


Abbildung 2: Die Merkmale des Qualitätsprüfteils werden auf dem Koordinatenmessgerät taktil und optisch erfasst

Neben der Überprüfung des Qualitätsprüfteils mit dem Koordinatenmessgerät findet noch eine flächige Messung des Bauteils mit einem Laserliniensensor statt. Dieser hat gegenüber dem Koordinatenmessgerät den Vorteil, viele Messpunkte innerhalb einer kurzen Zeit aufzunehmen. Dabei wird ein Laserliniensensor der Fa. Perceptron verwendet, der auf einem Infinite Gelenkarm der Fa. Romer sitzt. Mit einer maximalen Scan Rate von

458.400 Punkten/s können schnell von außen optisch zugängliche Punkte aufgenommen werden. Anschließend findet ein Soll-Ist-Vergleich mit dem CAD-Modell in Polyworks statt. Dadurch ergibt sich ein flächiger Eindruck über die Abweichungen des Qualitätsprüfteiles und Materialeinfallstellen werden sichtbar. Siehe dazu auch Abbildung 3.

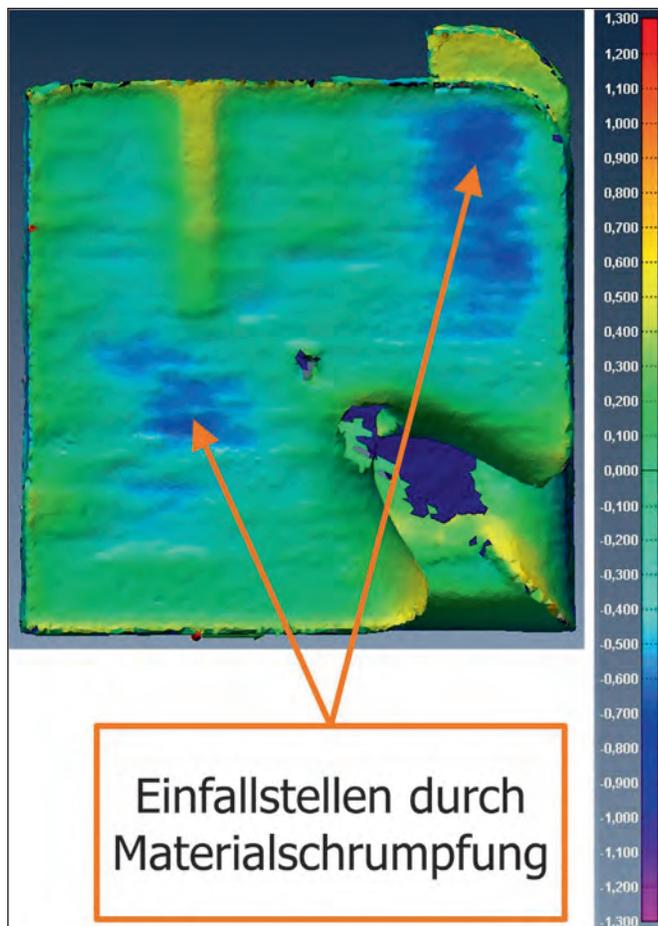


Abbildung 3: Der Soll-Ist Vergleich mit einem Laserscanner bringt eine schnelle Übersicht der flächigen Abweichungen

### Datenbank

Um einen schnellen Überblick der erreichbaren Abweichungen zu bekommen, werden alle Messwerte in eine übersichtliche Form gebracht und in eine Datenbank eingepflegt. Ergänzt mit bestehenden Materialkennwerten, verschafft dies Anwendern und Konstrukteuren eine Entscheidungshilfe bei der Auswahl geeigneter additiven Verfahren für ihr jeweiliges Produkt. Die Datenbank soll aufgebaut und im Spätherbst für interessierte Anwender in Form eines Abonnements freigeschaltet werden.

### Technologietransfer

Im Jahr 2014 wurde an der OTH-AW in Amberg ein regionales Innovationsnetzwerk Additive Manufacturing auf Initiative von Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Blöchl gegründet, das aktuell 12 Mitgliedsfirmen, die in unterschiedlichen Branchen aktiv sind, die Möglichkeit gibt, sich zu Innovationen und Fragen rund um die neue Technologie auszutauschen.

### Fazit

Mithilfe des an der OTH-AW in Amberg entwickelten Qualitätsprüfteils messbaren Abweichungen und Unzulänglichkeiten unterschiedlicher additiver Fertigungsverfahren und am Markt befindlicher Geräte geben einen guten Überblick für interessierte Anwender, um den Stand der Technik einschätzen zu können. Dabei soll das Augenmerk nicht nur auf die erzielten Maßabweichungen gelegt werden, sondern vielmehr auch auf Wiederholgenauigkeit und Prozesssicherheit der Geräte. Regelmäßige Maßabweichungen lassen sich durch entsprechende Skalierungen des 3D-Modells vor dem Druck korrigieren oder aber der 3D-Drucker kann durch einen Eingriff in die Maschinendaten auf Basis der Messergebnisse „kalibriert“ werden. Dazu muss aber das Verhalten der unterschiedlichen generativen Verfahren bekannt sein. Die dokumentierten Ergebnisse werden in der im Aufbau befindlichen Datenbank abgelegt und geben interessierten Anwendern eine Orientierung, welches additive Verfahren und welches Gerät sich für eine konkrete Aufgabenstellung eignen.

---

**Projektpartner:**

Siemens AG, Amberg

**Fördergeber:**



**Kontakt:**



**Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Blöchl**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

w.bloechl@oth-aw.de



**Dipl.-Ing. (FH) Daniel Weiß**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

da.weiss@oth-aw.de

# Test and On-Line Monitoring of Real-Time Ethernet with Mixed Physical Layer for Industry 4.0

## Abstract

In Industry 4.0 nodes are becoming interconnected and part of the growing Industrial Internet of Things. The use of a reduced physical layer and emerging real-time Ethernet standards, enables such nodes to be implemented cost-efficiently. Technologies and standards, which focus on cost-efficient Ethernet technologies for the use in vehicles, are quite promising for industrial applications. The integration of such new technologies and nodes in existing installations will lead to mixed systems consisting of conventional Industrial Ethernet equipment and new technologies. For such a migration scenario we present a test system to validate physical layers and transceivers with respect to timing and synchronizing.

## Zusammenfassung

Ein wesentlicher Bestandteil von Industrie 4.0 ist die Verbindung von Netzwerkknoten des wachsenden Industrial Internet der Dinge. Reduzierte Physical Layer und neu aufkommende Real-Zeit Ethernet Standards ermöglichen eine kosteneffiziente Implementierung solcher Knoten. Technologien und Standards, die sich auf kosteneffizientes Ethernet in Fahrzeugen fokussieren, haben gute Aussicht für einen Nutzen in industriellen Applikationen. Die Integration solcher Technologien und Knoten in existierende Installationen wird zu gemischten Systemen führen. Für solch ein Migrationsszenario präsentieren wir ein Testsystem für die Validierung von PHYs und Transceivern unter Berücksichtigung von Timings und Synchronisation.

## 1 Introduction

In an Industry 4.0 environment where virtually each and every component connects, the need for cost-effective real-time Ethernet interfaces and cabling is becoming greater than ever before. In many cases, the cost of conventional Ethernet interfaces is much higher than the cost of nodes and sensors that are to be integrated into a real-time Industry 4.0 network. A suitable interface is required to allow these nodes to work in homogenous Ethernet networks<sup>[1]</sup> without the need for gateways.

The overall effort for a communication interface can be divided in two categories. The one is the communication software and the other is the transceiver and the cabling<sup>[2][3]</sup>. The emerging standard Time Sensitive Networking (TSN)<sup>[4]</sup>, addresses the first category and comprises a collection of real-time Ethernet for hard and soft real-time communication. Other emerging standards deal with transceiver and the cabling reduced physical layer technology for 100 Mbit/s Ethernet<sup>[5]</sup> and 1Gbit/s Ethernet<sup>[6]</sup>.

Given the forecast, that an exponential rise of the number of Ethernet ports in vehicles<sup>[7]</sup> is to be expected, the integration of TSN into standard Ethernet controllers is almost obvious. Applying such standard Ethernet controllers together with a reduced physical layer is becoming a viable option in automation if the required Quality of Standard for real-time Ethernet communication can be met. Especially in Industry 4.0 networks, where reconfiguration of networks and integration of devices in running systems is becoming more and more important<sup>[8]</sup>.

## 2 Investigated real-time requirements

A highly required mechanism is the synchronization of the device-clocks in the network. Real-time Ethernet standards like TSN<sup>[6]</sup> and PROFINET IRT<sup>[9]</sup> rely on data transfer with a fixed latency and require accurate synchronization of the device clocks. Furthermore, they mandate accurate measurement of packet delay between two ports in the network.

The second issue that is considered here is Ethernet interfaces and the required cabling used to integrate the nodes into networks. In automation industry most Ethernet cabling is based on the 100Base-TX<sup>[10]</sup> physical layer, which requires shielded cables with two twisted pairs. However, there are emerging technologies<sup>[11]</sup> which may be adapted for use in automation industry. The reduced physical layer “100Base-T1”<sup>[5]</sup> uses an unshielded twisted pair cable to link devices, while still providing full duplex and bandwidth as the established 100Base-TX physical layer. The major drawback is the reduced electromagnetic compatibility (EMC) which leads to a maximum cable length of ten meters for a 100Base-T1 link segment<sup>[5]</sup>.

Despite being ten times shorter than the maximum length capacity for established physical layers, the needs of many of the applications are met. A length of 10 meters is sufficient for many nodes. Nodes placed further apart have to be interconnected via 100Base-TX physical layer and for even longer cable runs an optical link is needed. Therefore, networks may include a reduced physical layer as well as standard copper and optical links. Those networks can be seen as step-wise integration of nodes with reduced physical layer as well as a migration scenario.

## 2.1 Synchronization of Devices

Real-time Ethernet systems like PROFINET IRT and TSN use a very similar process to synchronize the clocks in the network devices. The first part of this process is the measurement of the path delay. The path delay is the time a frame needs to be transferred from one port to its neighbor port. In the second step the clocks on the devices are synchronized to a master clock. The path delay measurement and the synchronization have to be repeated in fixed intervals which are shorter or longer depending on the required accuracy. The measurements are repeated at different frequencies ranging from a few times per second to once every second. The synchronization accuracy and the path delay time can be used to classify the actual working state of a real-time Ethernet system<sup>[11][12]</sup>.

## 2.2 Frame Transfer Latency

There are two types of requirements for real-time data transfer systems, a fixed latency and a maximum guaranteed latency. In a system with fixed latency a time slot mechanism has to be used. There are reserved time slots in which only high priority traffic can be transferred and no other data can be transferred. Every device in a communication channel has to know when the reserved time slots start, how long they are and which data has to be transferred in. A fixed frame transfer latency can be guaranteed with this mechanism. Best effort traffic or traffic in other priority classes does not influence this latency.<sup>[13]</sup>

The second mechanism guarantees a maximum transfer latency, frames may be received earlier than the maximum latency but they are not delayed longer than the maximum latency. For this type of transfer different mechanisms can be used, e.g. the prioritization of marked frames to guarantee a maximum delay in a transfer path.

In PROFINET this two mechanisms are used, to separate three traffic classes. The three classes are Isochronous Real-Time data which is transferred with a fixed latency, Real-Time data which is transferred with a maximum guaranteed latency through packet prioritization via Vlan-Tag and best-effort data (like acyclic read/write services) which is transferred without any guaranteed Quality of Service. RT and best-effort data may only be transferred in the free time slots. If these data is transferred within the IRT timeslots, the device will send an alarm and go into error mode.<sup>[14]</sup>

The frame transfer latency is also a sign of the system stability. Especially switches and management components in the network have to guarantee a forwarding of frames in the specified manner. Through reconfiguration of systems and introduction of devices in running systems the requirements of the switches may change during the runtime of the system. The frame transfer latency is a second stability indicator which shall be monitored in a running system to notice before a system becomes faulty because of this.

## 3 Test system with mixed physical layer networks

To measure this indicators in systems with different set-ups and physical layers and to identify the influences of physical layers and transceivers we have developed a test platform and an Ethernet Physical Layer Adapter. With this hardware we can examine physical layers for real-time Ethernet systems in a uniform manner. While the system is running, the influences reconfiguring a network or participant can be recorded, with the provision of the signal indicators for synchronization accuracy and frame transfer latency. The physical layer for the Ethernet interface is coupled to the test platform as an add-on, which is readily interchangeable. The schema in Figure 1 shows the test platform interfaces and connections.

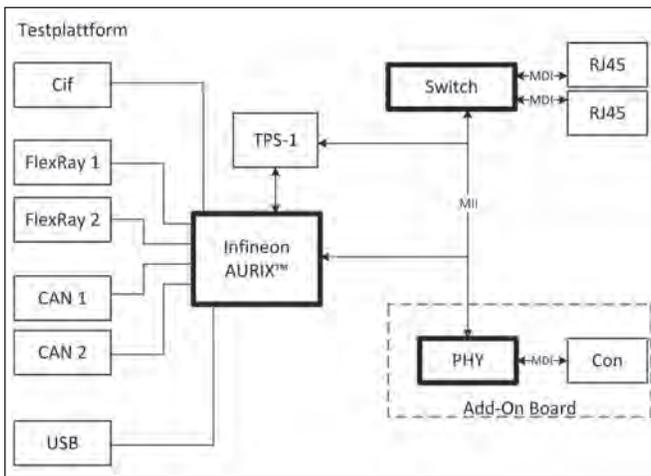


Figure 1: Test platform scheme

The test platform facilitates the use of real-time Ethernet systems, namely PROFINET, Ethernet AVB and Ethernet POWERLINK for data transfer. For PROFINET communication the dedicated communication ASIC is applied to the test platform. The physical layers which can be used are only restricted by the type of Media Independent Interface (MII) they require. The test platform provides a MII for 100Mbit/s Ethernet which has to be adapted by the add-on board to a Media Dependent Interface (MDI) <sup>[15]</sup>. Link quality and Ethernet link stability measurements can be performed through direct connection of the physical layer transceiver to the microcontroller on the test platform. This adapter has to be designed so that it does not influence the communication between the devices. The adapters can also be used for other purposes including to extend the length of an Ethernet link if required.

The adapter consists of two physical layer transceivers (PHY) which are connected directly over the MII. Through this setup the smallest delay within the adapter can be realized. Additionally the MII is accessible by extern

devices to monitor the traffic. An integrated microcontroller configures both PHYs and provides an USB interface to monitor the link quality and the error counters of the PHYs. The schema of the Ethernet-PLA can be seen in Figure 2.

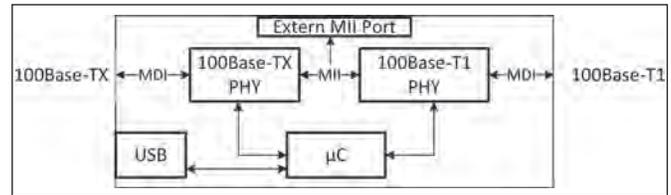


Figure 2: Ethernet Physical Layer Adapter board schema

#### 4 Conclusion and outlook

Effects of different physical layers on timing and synchronization can be shown for a basic Ethernet real time network. Measurement results are provided while the system is running. With first detailed measurements we are able to show that the test system may assess system stability of networks and their limits to be identified. These topics get more and more important when looking for Industry 4.0 and the Internet of Things which leads to many more components connected to the networks and resulting in more complex networks with different physical layers. We assess some crucial features for real-time data transfer. As a first finding, we see that networks with different physical layers can be used for real-time Ethernet data transfer with regard to timing and synchronization.

We plan to extend the test platform to provide also a 1 Gbit/s Ethernet interface to introduce the reduced physical layer for gigabit data transfer. Additionally other real time features and TSN features will be implemented to see the differences in data transfer and network usage.

---

## Referenzen:

- [1] McKinsey Digital; Industry 4.0 – How to navigate digitization of the manufacturing sector; [Online] Available: [https://www.mckinsey.de/sites/mck\\_files/files/mck\\_industry\\_40\\_report.pdf](https://www.mckinsey.de/sites/mck_files/files/mck_industry_40_report.pdf); 2015
- [2] P. Hank, S. Mülle, O Vermesan. Van Den Keybus; Automotive Ethernet: In-vehicle networking and smart mobility; Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE); 2013
- [3] Yoshifumi K.; Highly reliable network technology that is necessary for achieving future E/E architecture aimed at the age of „Automated Driving“; IEEE-SA 2015 Ethernet & IP @ Automotive Technology Day; October 2015
- [4] Time-Sensitive Networking Task Group; [Online] Available: <http://www.ieee802.org/1/pages/tsn.html>
- [5] 802.3bw-2015 – IEEE Standard for Ethernet Amendment 1: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 100 Mb/s Operation over a Single Balanced Twisted Pair Cable (100BASE-T1)
- [6] 1000BASE-T1 PHY P802.3bp Task Force; Draft D3.3 released; [Online] Available: <http://www.ieee802.org/3/bp/>
- [7] Gartner; OPEN Alliance Ethernet Study 2014 Forecast Data; [Online] Available: <http://www.opensig.org/about/market-forecast-gartner/>; 2014
- [8] Vogel-Heuser B., Weber J, Folmer J; Evaluating reconfiguration abilities of automated production systems in Industrie 4.0 with metrics; ETFA 2015
- [9] PROFIBUS & PROFINET International, “Profinet”, Karlsruhe, Germany. Available: <http://www.profibus.com/technology/profinet>
- [10] IEEE 802.3-2012 – IEEE Standard for Ethernet; Clause 24
- [11] Hao Liu, Jingcheng Liu, Tianshu Bi, Jinsong Li, Wei Yang, Daonong Zhang, Performance analysis of time synchronization precision of PTP in smart substations, 2015 IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control, and Communication (ISPCS)
- [12] H. Flatt, S. Schriegel, and J. Jasperneite, Reliable Synchronization Accuracy in IEEE 1588 Networks Using Device Qualification with Standard Test Patterns, 2013 International IEEE Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement Control and Communication (ISPCS)
- [13] D. Thiele, R. Ernst, Formal worst-case timing analysis of Ethernet TSN’s burst-limiting shaper, 2016 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition
- [14] Manfred Popp, Industrielle Kommunikation mit PROFINET, 2014, PROFIBUS Nutzerorganisation e. V.
- [15] S. Fuchs, H.-P. Schmidt, Real Time Ethernet and Synchronizing with Inhomogeneous Physical Layers: CAT5 and Unshielded Twisted Single Pair Cabling; SAE Technical Paper 2015-01-0199, 2015, doi:10.4271/2015-01-0199.

## Projektpartner:

inIT – Institut für industrielle Informationstechnik, Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Langenbruch 6, 32657 Lemgo

## Fördergeber:



**Kontakt:**



**Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Schmidt**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Elektrotechnik, Medien  
und Informatik  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

hp.schmidt@oth-aw.de



**Stefan Fuchs, M. Eng.**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Elektrotechnik, Medien  
und Informatik  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg



**Alexander Gercikow, M. Eng.**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Elektrotechnik, Medien  
und Informatik  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

al.gercikow@oth-aw.de



**Prof. Dr.-Ing. Stefan Witte**

inIT – Institut für industrielle  
Informationstechnik  
Hochschule Ostwestfalen-Lippe  
Langenbruch 6  
32657 Lemgo

stefan.witte@hs-owl.de

## Zusammenfassung

Die zeitlich und örtlich hochaufgelöste Magnetfelddiagnostik für Schaltgeräte der nächsten Generation wird im Rahmen des Forschungsvorhabens RaMagNostic untersucht. Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung finanzierte Vorhaben wird gemeinsam mit der Technischen Universität Ilmenau, dem Fraunhofer-Institut IIS Erlangen und der Siemens AG Amberg sowie dem An-Institut der OTH Amberg-Weiden, aia automations Institut GmbH, durchgeführt. Erste Ergebnisse, die im Rahmen des kooperativen Promotionsvorhabens erzielt wurden, werden vorgestellt. Im Labor Anlagen- und Simulationstechnik wurde ein Versuchsaufbau erstellt und damit wurden erste Messungen durchgeführt. Parallel hierzu wurden Feldberechnungen mittels FEM (Finite Elemente Methode) durchgeführt. Mit diesen Ergebnissen wurde die prinzipielle Machbarkeit nachgewiesen und die Grundlage für die Entwicklung einer Magnetfeld-Kamera gelegt.

## Abstract

Measurements of time and space resolved magnetic fields are used to diagnose the current switching behavior of low voltage switchgear. Such switchgear plays an important role in the energy distribution of the smart factory. The project, which is funded by the Federal Ministry of Education and Research, is carried out in cooperation with the TU (Technical University) Ilmenau, Fraunhofer Institute IIS Erlangen, Siemens AG Amberg and the OTH Amberg-Weiden affiliated institute aia automations institute.

A test stand has been built in the laboratory that enables measurements of magnetic fields at realistic switching conditions. With this setup it is demonstrated that real world switching equipment may be diagnosed with magnetic fields. First results from FEA (finite element analysis) simulation and measurements are given.

---

## 1 Einleitung

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Forschungsprojekts „Rapid Magnetic Diagnostic“ soll eine Magnetfeldkamera zur Lichtbogendiagnostik von Niederspannungsschaltgeräten entwickelt werden. Bei der Diagnose von Schaltgeräten ist der tatsächliche Bewegungsablauf von Schaltstück und Lichtbogen von zentraler Bedeutung. Anders als bei einer optischen Erfassung, welche stark modifizierte Labormuster voraussetzt, wird in diesem Projekt ein magnetischer Ansatz verfolgt werden, wodurch die Diagnose von nicht modifizierten Schaltgeräten erstmals möglich wird<sup>[1]</sup>. Zu diesem Zweck muss sowohl eine hohe zeitliche als auch eine hohe örtliche Auflösung in einer Magnetfeld-Kamera vereint werden, um ausgehend vom gemessenen Magnetfeld auf die transienten Strompfade rückzurechnen<sup>[2]</sup>.

## 2 Anforderungsanalyse mittels Simulation und Versuch

Im ersten Schritt werden die Detailanforderungen an die Magnetfeld-Kamera geklärt, indem zum einen die Feldverteilungen mittels FEM-Berechnungen simuliert werden und zum anderen Versuche für die Sensorik durchgeführt werden. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen werden dazu verwendet, die Modellierung so weit zu führen, dass selbst für die hier vorliegenden komplexen Zusammenhänge eine aussagekräftige Vorhersage der zeitlichen und örtlichen Variation der Magnetfelder möglich wird. Andererseits dienen die experimentellen Ergebnisse der Klärung der Detailanforderungen an die Sensorik.

## 2.1 Versuchsaufbau

Im Labor Anlagentechnik wurde eine Versuchsanlage aufgebaut, mit der Schaltvorgänge von ausgewählten Schaltgeräten realitätsnah durchgeführt werden können. Das Kernstück stellt ein LC-Schwingkreis dar, bei dem eine Kondensator-Entladung mit einigen Tausend Ampere über eine Induktivität synchron zum gesteuerten Auslösen des Schaltgerätes durchgeführt wird. Eine vereinfachte Darstellung des Ersatzschaltbildes ist in der Abbildung 1 dargestellt.

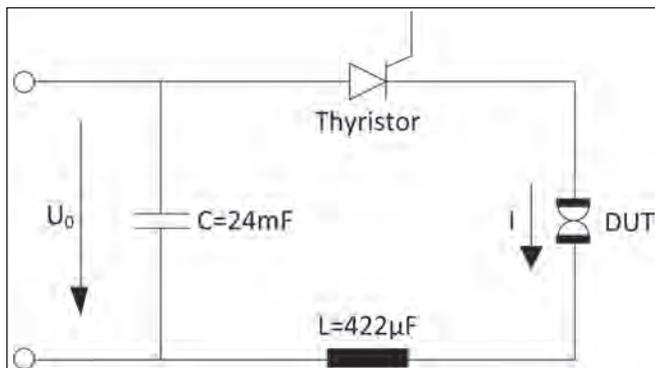


Abbildung 1: Vereinfachtes Ersatzschaltbild des Schwingkreises

Für die technische Realisierung wurde eine Kondensatorbank aufgebaut und die Induktivitäten als Drossel ohne Eisenkern ausgeführt. In Abbildung 2 ist die technische Umsetzung zu sehen.

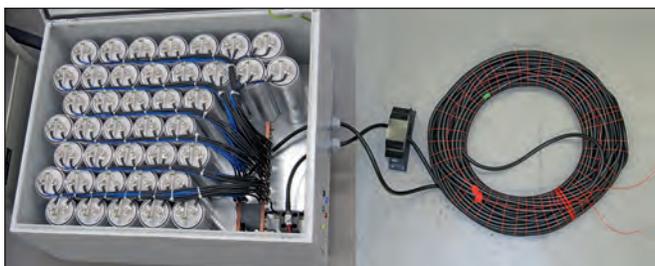


Abbildung 2: Technische Realisierung des LC-Schwingkreises

Mit diesem Aufbau können gezielt Abschaltungen mit realitätsnahen Stromverläufen im Labor nachgebildet werden. In Abbildung 3 ist die Messung eines typischen Strom- und Spannungsverlaufs dargestellt.

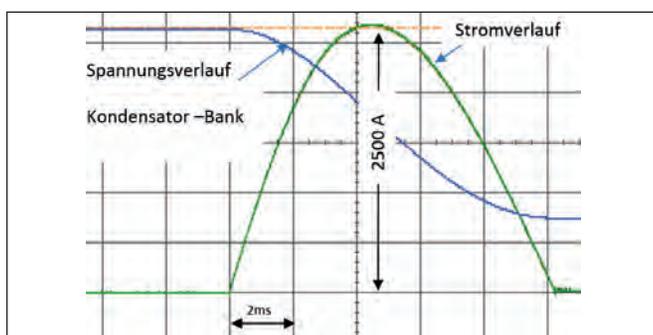


Abbildung 3: Gemessene Verläufe von Strom und Spannung des LC Schwingkreises

## 2.2 FEM(Finite Elemente Methode)-Simulationen

In einem ersten Schritt werden für eine vereinfachte Schaltergeometrie die Magnetfelder aller drei Raumrichtungen berechnet. Verwendet wird dazu eine auf elektromagnetische FEM-Berechnungen spezialisierte Simulationssoftware (Vectorfields/Opera 3D). Ergebnisse dieser Feldberechnungen sind in Abbildung 4 dargestellt, wobei die Geometrie des Leistungsschalters so vereinfacht wurde, dass die wesentlichen Einflussgrößen sichtbar werden. Im Laufe des Projektfortschritts wird die verwendete Geometrie sukzessive der Komplexität des realen Musterschalters angenähert, was z. B. das Einbeziehen weiterer sogenannter Löschbleche und ferromagnetischer Materialien beinhaltet.

Die Ergebnisse dieser Simulationen dienen schließlich in einem zweiten Schritt als Referenzdatensätze zur Erarbeitung von Rekonstruktions-Algorithmen [3][4]. Die Simulationen werden außerdem genutzt, um die Anforderungen an die Kamera-Hardware genauer zu spezifizieren.

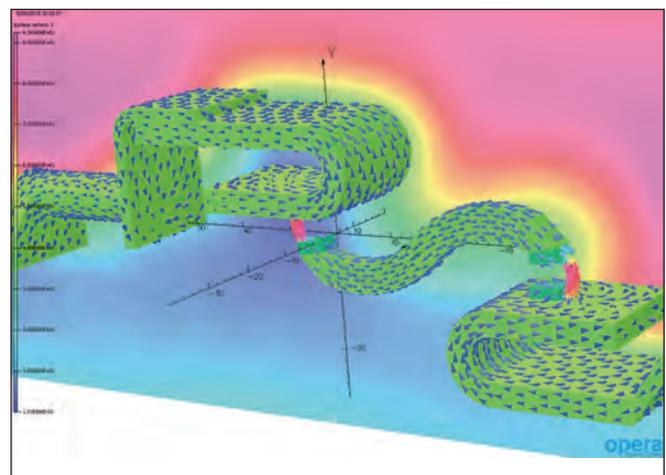


Abbildung 4: „Z“-Komponenten der magnetischen Fluss- und Stromdichteverteilung

## 3 Detektion des Magnetfelds bei einer Abschaltung

Ausgehend von den FEM-Berechnungen, die einen Anhaltswert für die Magnetfeldverteilung liefern, wurden an den Versuchsaufbau diskrete Sensoren platziert. Mit diesen Sensoren wurden die Magnetfeldstärken an einzelnen Punkten gemessen. Mit diesen Messergebnissen werden die Anforderungen an die zeitliche Auflösung des Messsystems weiter detailliert. In Abbildung 5 sind die Messwerte des Spannungsverlaufes über den Schalter sowie die Magnetfeldkomponente für eine typische Abschaltung dargestellt.

Wie aus der Abbildung 5 ersichtlich ist, korrelieren die Verläufe der Spannung am Schalter (violett) und die aufgezeichnete Magnetfeldstärke relativ gut, wenn man berücksichtigt, dass die Amplitude des Magnetfeldes direkt von der Stromstärke abhängig ist.

Da die Spannung am Schalter bei der Abschaltung direkt vom Strompfad abhängt, ist damit ein erster Zusammenhang zwischen dem Strompfad und der Messung des Magnetfeldes gezeigt.

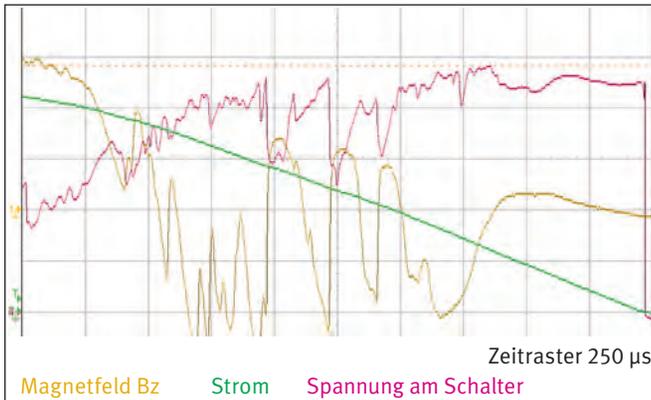


Abbildung 5: Zeitlicher Verlauf der Magnetfeldkomponente, des Stromes und der Spannung über die Schaltstücke bei einer Abschaltung

#### 4 Ergebnis und Ausblick

Mit den vorliegenden Berechnungsergebnissen und Messungen können die Anforderungen an das zu entwickelnde Magnetfeldkameranystem weitestgehend bestimmt werden. Aufgrund der guten Korrelation des zeitlichen Verlaufs der Spannung und des gemessenen Magnetfeldes konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, Informationen über den geometrischen Stromverlauf bei der Abschaltung für ein nicht modifiziertes Schaltgerät zu ermitteln.

Diese ersten Ergebnisse können für die Weiterarbeit verwendet werden, bei der das Magnetfeld an einer Vielzahl von Orten parallel und simultan aufgezeichnet wird, sodass ein örtlich und zeitlich aufgelöster Verlauf gemessen werden kann.

Wie in einer Voruntersuchung gezeigt wurde<sup>[5]</sup>, lässt sich dann zusammen mit a priori Informationen auf die örtliche und zeitliche Stromverteilung zurückrechnen.

#### Referenzen:

- [1] A. Laurent, F. Gary, D. Cajal, G. Velleaud, M. Mercier, A magnetic camera for studying the electric breaking-arc, Blaise Pascal University, Clermont Ferrand, 1993
- [2] C. Brdys, J.-P. Toumazet, A. Laurent, J. L. Ponthenier, Optical and magnetic diagnostics of the electric arc dynamics in low voltage circuit breaker, 2002
- [3] B. Roth, N. G. Sepulveda, J. P. Wikswo, Using a magnetometer to image a two-dimensional current distribution, 1988
- [4] C. Sumi, K. Hayakawa, and N. Koike, Reconstruction of 3-dimensional distribution of tangential current density components from magnetic vector measurement, 2007
- [5] H.-P. Schmidt, S. Kosse, A. Anheuser, Simulation assisted diagnostics of switching arcs, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics Vol 35, Electromagnetic Nondestructive Evaluation XIV, IOS Press, 2011

**Projektpartner:**

Technische Universität Ilmenau, Ilmenau  
Fraunhofer-Institut IIS, Erlangen  
Siemens AG, Amberg  
aia automations institut GmbH, Amberg

**Fördergeber:**



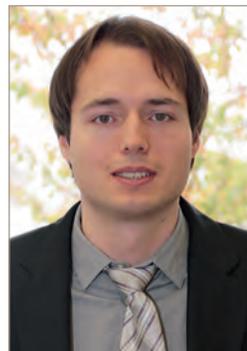
**Kontakt:**



**Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Schmidt**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Elektrotechnik, Medien  
und Informatik  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

[hp.schmidt@oth-aw.de](mailto:hp.schmidt@oth-aw.de)



**Christian Reil, M. Eng.**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Elektrotechnik, Medien  
und Informatik  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

[ch.reil@oth-aw.de](mailto:ch.reil@oth-aw.de)

# Impressum

**Herausgeber:**

Präsidentin  
Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden  
Prof. Dr. Andrea Klug

**Redaktion:**

Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden  
Institut für Angewandte Forschung IAF

**Titelgestaltung:**

Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden  
Prof. Dipl.-Kfm. Ralph E. Hartleben

**Inhalt/Bildmaterial:**

Die Verantwortung für Inhalt und Bildmaterial der Beiträge haben die jeweiligen Autoren der Fachbeiträge.

**Gesamtherstellung:**

Mundschenk Druck + Medien, Mundschenkstraße 5, 06889 Lutherstadt Wittenberg

**Erscheinungstermin:**

Februar 2017

**ISSN-Nummer:**

2365-1997



Ostbayerische Technische Hochschule  
Amberg-Weiden

**Standort Amberg:**

Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg  
Tel.: 09621/482-0  
Fax: 09621/482-4991  
Mail: [amberg@oth-aw.de](mailto:amberg@oth-aw.de)  
[www.oth-aw.de](http://www.oth-aw.de)



Ostbayerische Technische Hochschule  
Amberg-Weiden

**Standort: Weiden**

Hetzenrichter Weg 15  
92637 Weiden  
Tel.: 0961/382-0  
Fax: 0961/382-2991  
Mail: [weiden@oth-aw.de](mailto:weiden@oth-aw.de)  
[www.oth-aw.de](http://www.oth-aw.de)

Die Onlineversion des Forschungsberichtes finden Sie unter:  
[www.oth-aw.de/forschen-und-kooperieren/veroeffentlichungen/forschungsberichte](http://www.oth-aw.de/forschen-und-kooperieren/veroeffentlichungen/forschungsberichte)