

Digitalisierte, flugmobile Inspektion und Netzdatenerfassung mit automatisierten Drohnen – DNeD

Hema Hanifa Rani Mukka*, Detlef Schulz
Professur für Elektrische Energiesysteme
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr
Hamburg
 Hamburg, Deutschland
 *mukkah@hsu-hh.de

Alexander Schulzke*, Joachim Horn
Professur für Regelungstechnik
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr
Hamburg
 Hamburg, Deutschland
 *alexander.schulzke@hsu-hh.de

Kurzfassung – Dieser Beitrag soll das Projekt DNeD vorstellen, welches durch das „dtec.bw“ [1] finanziert wird. Das Ziel dieses Projektes ist es, ein intelligentes, flugfähiges System, welches automatisch einen Sensor zum Messen von elektrischen Zuständen im Mittel- und Hochspannungsbereich an einer Hochleitung anbringen kann, zu erforschen und zu testen. Nach einem einleitenden Überblick über die Projektziele werden im zweiten Kapitel Aufbau und Gesamtpaket eines Sensormoduls beschrieben, welches für eine sichere Befestigung und den Kontakt zur Freileitung sorgt. Des Weiteren wird die Integration eines optischen Sensors für den „drop-off“-Prozess und eine vollständige Simulation aller Hardwarekomponenten aufgezeigt. Im dritten Kapitel werden die Probleme und Ansätze für den Bau eines für den Einsatz in diesem Projekt geeigneten unbemannten Luftfahrzeuges (UAV) veranschaulicht. Die größte Herausforderung dabei ist der Einfluss des elektromagnetischen Feldes der Leiter. Weiterhin werden die Anforderungen an die Hardware und die Entwicklung von benötigten Komponenten beschrieben. Das vierte Kapitel fasst die Anforderungen an die Missionsplanung für das Projekt zusammen. Beginnend mit einer Beschreibung der benötigten Simulationsumgebung behandelt das Kapitel auch erste Ideen zu Sensorfusion, Bahnplanung und Flugsteuerung. Dabei wird für die Flugsteuerung ein erster entsprechender Regelansatz vorgestellt.

Stichworte – DTEC, DNeD, UAV, Netzimpedanz, Drohne, Pockels-Effekt

NOMENKLATUR

D in Ns/m	Dämpfung
DNeD	Digitalisierte, rechtssichere und emissionsarme flugmobile Inspektion und Netzdatenerfassung mit automatisierten Drohnen
dtec.bw	Zentrum für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr
e_z	Einheitsvektor in z-Richtung
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
F	Schubkraft des Kopters
g in m/s ²	Erdbeschleunigung
HiL	Hardware in the Loop

J in kg m ²	Trägheitsmatrix des Multikopters
m in kg	Masse
MPC	Modellprädiktive Regelung (Engl. für Model Predictive Control)
p in m	Position
R_{BI}	Rotationsmatrix für die Überführung von körperfesten Koordinaten des Multikopters in Inertiale
RET	Professur für Regelungstechnik an der Helmut-Schmidt-Universität Hamburg
UAV	Unbemanntes Luftfahrzeug (Engl. für Unmanned Aerial Vehicle)
z_I	Ausrichtung der z-Achse des Multikopters
τ	Stellmoment der Rotationsmatrix R_{BI}
ω_B^{IB}	Winkelgeschwindigkeit der Rotationsmatrix R_{BI}

I. EINLEITUNG

Ziel des Projekts DNeD ist es, zum einen ein autonomes flugfähiges System zu entwickeln, welches befähigt ist, einen Sensor zur Erfassung elektrischer Größen im Mittel- und Hochspannungsnetz auf einer bestromten Freileitung abzusetzen. Dies soll unter den vorherrschenden Randbedingungen wie Wind und Leitungsführung möglich sein. Des Weiteren sollen alle relevanten Daten für einen Operator in aufbereitet in einem Leitstand sichtbar sein. Außerdem soll das Flugsystem eine hohe Ausfallsicherheit aufweisen, um Unfälle zu vermeiden. Dies alles soll erreicht werden, indem vorhandene Flugplattformen adaptiert und mit einer eigens entwickelten Absetzvorrichtung versehen werden. Weiterhin soll eine Reglerarchitektur adaptiert, implementiert und validiert werden, die das System zu einem eigenständigen Absetzen befähigt.

Zum anderen soll dieser Sensor flugtauglich für den Einsatz in starken elektrischen Feldern entwickelt werden. Für Design und Entwicklung des Sensors im Hinblick auf die Nutzung an Freileitungen müssen die generellen Bedingungen zum Beispiel Wetter, analysiert werden. Des Weiteren sollen

umfangreiche Messungen und Netzwerksimulationen durchgeführt werden. Die Einflüsse des Sensors auf das elektrische Feld sollen untersucht und durch sinnvolle Spezifikationen minimiert werden. Die gefundenen Anforderungen bzgl. Bauweise und Wettereinflüsse sollen in einem Anforderungsprofil hinterlegt werden.

Wenn die Ziele des Projekts erfüllt werden können, wird auf der einen Seite das Einsatzspektrum von Drohnen erweitert. Auf der anderen Seite wird ein neuer Bereich von Messsystemen zur Inspektion und Wartung von Energiesystemen eröffnet. Damit kann zukünftig auch die Sicherheit des Wartungspersonals von Netzbetreibern erhöht werden.

II. MESSSONDE

Bei den Messsystemen an Freileitungen, um die es in diesem Projekt gehen wird, sind verschiedene Eigenschaften von besonderer Bedeutung: Neben dem Design, der Konstruktion des Sensorgerätes und der Haltevorrichtungen werden auch Anforderungen an die zu verwendende Sensorik hinsichtlich Platzierung und Messgenauigkeit bzw. Messbereich gestellt. Insbesondere die Konstruktionsfrage muss vertieft werden, da ein an der Freileitung montierter Sensor die Feldbedingungen beeinflussen wird. Diese Auswirkungen müssen untersucht werden, um Gegenmaßnahmen ergreifen zu können oder eine Konstruktion zu wählen, die möglichst geringe Feldveränderungen verursacht. Durch praktische Versuche mit Sensoren zur Feldmessung, zunächst unter Laborbedingungen, können zusätzliche Anforderungen in den Katalog aufgenommen und erste Rückschlüsse auf eine Messmethodik zur Bestimmung der zeit- und frequenzabhängigen Netzimpedanz gezogen werden. Mit Hilfe von Netzsimulationen können die Betriebsbereiche von Spannung und Strom der Freileitungen vor den ersten Messungen ermittelt werden, ggf. bereits bezogen auf die tatsächlichen Betriebsorte. Insbesondere die zeitliche Änderung des Stroms wird unter Feldbedingungen dargestellt [2], [3].

Die meisten optischen Sensoren arbeiten nach dem Prinzip des Pockels-Effekts. Dabei kommt es zu einer Änderung des Brechungsindex eines Mediums durch ein elektrisches Feld.

Der lineare elektro-optische Pockels-Effekt tritt meistens in nicht inversionssymmetrischen photorefraktiven Kristallen auf. Materialien, die den Pockels-Effekt aufweisen, werden als elektrooptische Materialien bezeichnet. Einige Beispiele für Materialien, die den elektrooptischen Effekt aufweisen, sind Lithiumniobat und Lithiumtantalat.

Die meisten Arbeiten, zu optischen Methoden zur Messung von Magnetfeldern befassen sich entweder mit dem Faraday-Effekt oder mit magnetostriktiven Störungen von optischen Fasern. Der Faraday-Effekt beschreibt die Änderung des Polarisationszustandes von Licht durch ein Magnetfeld in bestimmten Medien. Wird durch ein Material, das den Faraday-Effekt zeigt und sich in einem Magnetfeld befindet, linear polarisiertes Licht gesendet, kommt es zu einer Drehung der Polarisationssebene des Lichts (vgl. ABBILDUNG 1) [4].

Im letzten Schritt wird das „Mock-up“ in Zusammenarbeit mit einem Netzbetreiber an eine Freileitung versetzt, um die tatsächlichen Feldbedingungen im Bereich der Freileitung zu ermitteln und in das Anforderungsprofil aufzunehmen.

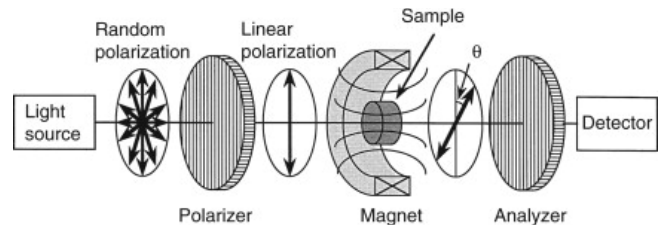


ABBILDUNG 1: DARSTELLUNG DES FARADAY-EFFEKTS [5].

III. FLUGPLATTFORM

Um den Sensor, auf Freileitung abzusetzen, soll ein sog. Multikopter verwendet werden. Die Entscheidung zur Verwendung eines Multikopters basiert zum einen auf der vorhandenen Expertise in der Professur für Regelungstechnik (RET) [6], [7], [8] und zum anderen auf der hohen Eignung solcher Multikopter für diesen Anwendungsfall. Multikopter können auf kleinem Raum starten und landen sowie auf der Stelle schweben und Bewegungen in alle Richtungen stabil ausführen. Sie sind somit bestens geeignet, sich einem bewegten Ziel zu nähern und etwas darauf abzusetzen.

Die besondere Herausforderung für den Multikopter in dem Projektscenario ist die starke Interferenz durch elektromagnetische Felder. Ein robust konstruiertes UAV, welches sich nicht oder nur kaum durch diese Felder beeinflussen lässt, ist eine Voraussetzung für einen sicheren Absetzvorgang. Dies ist vor allen Dingen bei der Positionsgenauigkeit, der Sensorik, der Signalverarbeitung und der Steuerung im autonomen Betrieb zu gewährleisten. Denn nur so sind Hinderniserkennung, Detektion von beweglichen Freileitungen, Kollisionsvermeidung und automatisches Absetzen der Messsonde auf beweglichem Untergrund möglich. Bisher wurde in solchen Fällen immer eine kontaktlose Messung durchgeführt, um diese Problematik zu vermeiden oder zumindest deutlich zu verringern.

Um ein solches UAV zu erhalten, soll ein Kooperationspartner eine Auswahl an Hard- und Softwarekomponenten treffen, welche bevorzugt schon auf dem Markt evaluiert und eingesetzt werden. Des Weiteren muss bei der Auswahl der elektronischen Komponenten sowie der Beschaffenheit der mechanischen Konstruktion, wie z.B. der Schirmung, auf die Einhaltung der EMV Richtlinien geachtet werden. Deshalb müssen die Einflüsse der elektrischen Felder auf den Multikopter, speziell mögliche Störungen der Elektronik oder des Flugverhaltens, in umfangreichen Tests im Labor und im Flug untersucht werden. Erforderliche Änderungen sollen dann vorgenommen werden, um Einschränkungen der Einsatzmöglichkeiten zu vermeiden.

Des Weiteren soll der Kooperationspartner in Zusammenarbeit mit der RET ein Absetzsystem für die Messsonde konzipieren, prototypisch herstellen und validieren. Dieses soll das UAV in seinen Flugeigenschaften möglichst wenig beeinflussen und ein sicheres Absetzen der Messsonde ermöglichen. Außerdem soll es die Sensorik des Multikopters nach Möglichkeit nicht behindern. Im Rahmen der Entwicklung dieses Systems soll ebenfalls geprüft werden, inwieweit eine Wiederaufnahme der Messsonde möglich und wirtschaftlich sinnvoll ist. Sollte eine Wiederaufnahme nicht möglich oder sinnvoll sein, soll ein kommandiertes Lösen von der Freileitung geprüft werden.

Zusätzlich sollen der Kooperationspartner und die RET ein optisches Sensorsystem entwickeln, welches für den Einsatz

von Kameras und Lasersensoren herangezogen werden kann. Das Ziel ist es, ein witterungstolerantes Sensorsystem zu erhalten, das das UAV zum automatischen Anflug und der Positionierung über der Freileitung befähigt.

Abschließend sollen alle vorher beschriebenen Teilaspekte zu einem Gesamtsystem zusammengeführt werden, welches den automatisierten Absetzvorgang unter allen möglichen Umständen erfolgreich durchführen kann.

IV. MISSIONSPLANUNG

A. Simulationsumgebung

Für die Entwicklung der Navigationsstrategie (Bahnplanung) soll eine ausreichende Simulationsumgebung entwickelt werden, welche alle relevanten Komponenten und Randbedingungen statisch und dynamisch abbilden kann. Dies ermöglicht weiterhin auch Tests von Hardware in the Loop (HiL) unter Laborbedingungen. HiL ist eine Technik, mittels derer reale Anwendungen im Labor getestet werden können. Dabei werden für Tests reale und in der Software simulierte Hindernisse und Ereignisse verwendet, wofür präzise Nachbildungen der Stör- und Umwelteinflüsse, wie z. B. des elektrischen Streufelds, benötigt.

B. Sensorfusion

Die Sensorfusion ist das Zusammenführen der Daten von den einzelnen Sensoren zu einem einzigen Überblick der aktuellen Lage. Dies umfasst sowohl den Vergleich von Daten verschiedener Sensoren, die dasselbe Objekt erkennen, zur Verbesserung der gewonnenen Daten als auch das Kombinieren der verschiedenen Informationen, um z. B. aus zwei 180°-Sichten eine 360°-Sicht zu erstellen. Ein anderes Beispiel wäre das Überlagern zweier Kamerabilder mit unterschiedlichen Spektren, um ein Bild mit vollständigem Spektrum zu erzeugen. Das Ziel der Sensorfusion ist es, aus den einzelnen Informationen aller Sensoren ein einheitliches und sicheres Datenfeld zu generieren und zu benennen, welches den Bahnplanungsalgorithmen übergeben werden kann. Die Benennung meint hierbei eine erste Auswertung der Daten, welche unter anderem die aktuelle Position des Zielleiters von den Positionen anderer Leiter unterscheidet. Des Weiteren sollen so Hindernisse erkannt und als Objekte an die nachfolgende Regelung weitergereicht werden. Auf diese Weise sollen zum Schluss Position und Ausrichtung des UAV möglichst präzise bestimmt werden.

C. Bahnplanung

Die Bahnplanung umfasst das maschinelle Erstellen eines optimalen Pfades, welcher die Teilbereiche Startphase, Annäherung an den Leiter, Absetzen der Sonde auf dem Leiter sowie den Rückflug beinhaltet. Dafür müssen Methoden erfolgreich untersucht und implementiert werden, die den Wechsel zwischen den einzelnen Phasen fließend ermöglichen. Des Weiteren sollen für jede Phase Algorithmen entwickelt werden, welche auf Basis von vorher bekannten Umfeldinformationen und/oder Sensordaten einen nach ausgewählten Kriterien optimalen Weg zum Erreichen des aktuellen Ziels erstellen. Dies könnte z. B. der kürzeste Weg vom Startpunkt zum Leiter sein, wobei das UAV allen bekannten Hindernissen ausweicht. Hierbei werden idealerweise die Ergebnisse der Forschung zum störenden Einfluss der elektrischen Felder und anderer potenzieller Störungsquellen berücksichtigt, um eine störungsfreie Annäherung und ein zügiges Absetzen zu ermöglichen.

D. Regler zur Trajektorienverfolgung

Um das UAV entlang eines berechneten Pfades zu steuern, ist es notwendig, es mit einer Trajektorienfolgeregelung auszustatten. Diese muss die Flugsteuerung des Multikopters übernehmen und diesen sicher entlang eines Satzes von Positionen fliegen können. Dafür wird zuerst der in [9] vorgestellte Regler auf einem Multikopter der RET implementiert.

Besagter Regler arbeitet nach dem energiebasierten Modell für ein UAV, welches mit den Formeln (1) – (3) beschrieben wird.

$$m\ddot{p}_I = -D\dot{p}_I + mge_z - Fz_I \quad (1)$$

$$\dot{R}_{BI} = -\ll \omega_B^{IB} \gg R_{BI} \quad (2)$$

$$J\dot{\omega}_B^{IB} = \ll J\omega_B^{IB} \gg \omega_B^{IB} + \tau \quad (3)$$

Aufgrund des Aufbaus dieses Modells bietet sich eine kaskadierte Reglerstruktur (vgl. ABBILDUNG 2) an, welche die Position mit Hilfe der Schubkraft F und der Ausrichtung z_I bestimmt. Die Ausrichtung wiederum wird aus der Lage R_{BI} berechnet und durch den Zusammenhang $z_I = R_{BI}e_z$ beschrieben. Die Lage R_{BI} hängt von dem Moment τ ab. Somit werden die Kontrollvariablen F und τ jeweils im äußeren und inneren Regelkreis bestimmt. Der gesamte Regler ist asymptotisch stabil, außer wenn der Multikopter exakt kopffüher ist. Durch seine kontinuierliche Form auf Basis von energiebasierten Ansätzen hat der Regler auch eine kurze Rechenzeit und damit eine hohe Echtzeitfähigkeit. Diese beiden Aspekte sind für diese Arbeit von zentraler Bedeutung, um die Robustheit des gesamten Systems zu gewährleisten. Das macht den Regler zu einem guten ersten Versuch einer Reglerimplementierung.

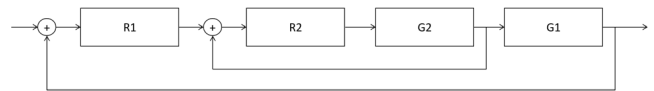


ABBILDUNG 2: SCHEMA EINES KASKADIERTEN REGLERS.

Das Verhalten in ABBILDUNG 3 entspricht dem Verlauf für diesen Regler beim Einregeln der Position $[1;1;1]$ aus dem Ursprung. In ABBILDUNG 4 ist das ideale Verhalten des Lagereglers bei einer Drehung um 45° im Uhrzeigersinn um die z-Achse visualisiert.

E. Validierung

Zur Validierung der in den vorangegangenen Unterkapiteln beschriebenen Komponenten sollen diese erst in der Simulation und anschließend in einer HiL mit der in Kapitel V entwickelten Hardware unter Laborbedingungen getestet werden. Dieses Herangehen soll es erleichtern, evtl. erforderliche Anpassungen vorzunehmen und das Risiko für kostenintensive Hardwarebeschäden zu minimieren. Im Anschluss soll das Gesamtsystem am realen Freileiter getestet werden, welcher dann unter Strom ist und zwischen anderen Leitern und den Masten hängt, welche nicht zu vernachlässigende Hindernisse für den Multikopter darstellen.

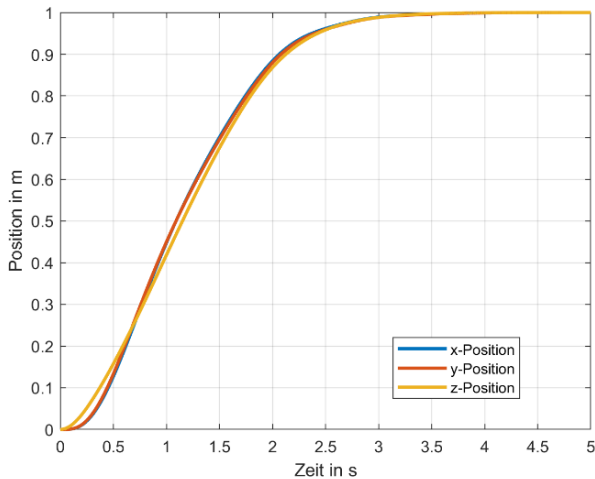


ABBILDUNG 3: REGELVERHALTEN, POSITIONSREGELUNG.

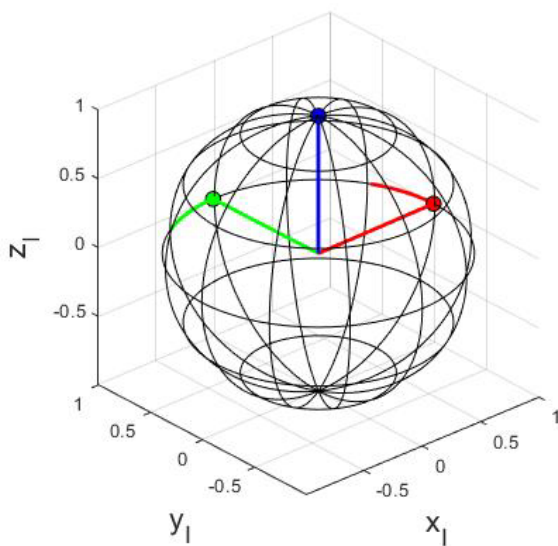


ABBILDUNG 4: BEISPIEL FÜR IDEALES REGELVERHALTEN, LAGEREGLUNG.

V. STAND UND AUSBLICK

Um später den Sensor mittels Multikopter auf einer Freileitung absetzen zu können, müssen Ausmaße und Gewicht des Sensors bekannt sein, welche von seiner Auslegung bestimmt werden. Dafür muss eine große Spanne von Grenzwerten berücksichtigt werden. Es ist geplant, die Arbeitsbereiche für Spannung und Stromstärke für Freileitungen mithilfe von Netzwerksimulationen zu bestimmen bevor erste reale Messungen vorgenommen werden. Das physikalische Verhalten sowie die relevanten Messfunktionen des generischen Sensors sollen bestimmt werden. Als finaler Schritt werden praktische Tests durchgeführt.

In naher Zukunft sollen erste Schritte in Bezug auf die Missionsplanung unternommen werden. Hierbei wird im speziellen der in Kapitel IV.D beschriebene Regler simulativ implementiert. Daraufhin kann dieser in einen HiL-Regelkreislauf integriert werden. In diesen bestehenden vollständigen Regelkreis kann dann der in Kapitel III beschriebene Multikopter integriert werden. Außerdem lässt sich in diesem Regelkreis der Regler einfach austauschen, um

andere Regelansätze, z. B. auf Basis von MPCs, zu testen und zu vergleichen. So können Rechenzeit, Echtzeitfähigkeit, Robustheit, Genauigkeit und andere Aspekte direkt miteinander verglichen werden. Auf diese Weise ist es möglich, verschiedene Regler zur Flugsteuerung gegeneinander abzuwägen, um die für das Projekt optimale Lösung zu finden. Des Weiteren soll in naher Zukunft ein Vertrag mit einem Hersteller für Multikopter abgeschlossen werden.

VI. DANKSAGUNG

Diese Publikation ist im Rahmen des Forschungsvorhabens DNeD – Digitalisierte, flugmobile Inspektion und Netzdatenerfassung mit automatisierten Drohnen entstanden. Für die Förderung des Forschungsvorhabens möchten sich die Autoren an dieser Stelle beim Zentrum für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr (dtec.bw) bedanken.

LITERATUR

- [1] „DNeD - Automatisierte Inspektion von Freileitungen,“ 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://dtec.bw.de/home/forschung/hsu/projekt-dned/projekt-dned>.
- [2] H. Langkowski, M. Jordan, T. Do und D. Schulz, „Spectral Grid Impedance Identification on Different Voltage Levels - Challenges and Realization,“ in *2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 2017.
- [3] H. Wilken, M. Jordan und D. Schulz, „Spectral Grid Impedance Identification on the Low-, Medium- and High-Voltage Level – System Design, Realization and Measurement Results of Grid Impedance Measurement Devices Advances,“ *Science, Technology and Engineering Systems Journal*, Vol. 4, No. 1, S. 8-16, 2019.
- [4] H. Sohlström, *Fibre Optic Magnetic Field Sensors Utilizing Iron Garnet Materials*, Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2011.
- [5] P. Bhattacharya, R. Fornari und H. Kamimura, *Comprehensive semiconductor science and technology*, Amsterdam: Elsevier Science, 2011.
- [6] A. D. Dang und J. Horn, „Formation Control of Leader-Following UAVs to track a moving target in a dynamic environment,“ *Journal of Automation and Control Engineering* Vol. 3, No. 1, S. 1-8, 2015.
- [7] M. Alpen, *Autonome Erkundung und Kartographierung unbekannter Innenräume durch einen Flugroboter*, Hamburg: Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, 2013.
- [8] M. Tappe, D. Dose, M. Alpen und J. Horn, „Autonomous Surface Inspection of Airplanes with Unmanned Aerial Systems,“ in *2021 7th International Conference*, 2021.
- [9] O. Fritsch, *Energiebasierte Lage- und Positionsfolgeregelung für einen Quadcopter*, München: Technische Universität München, 2014.