

Forschungsberichte aus dem  
**wbk** Institut für Produktionstechnik  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Fabian Sasse

**Ontologie-basierte Entscheidungsunterstützung  
für die Auswahl von Messsystemen in  
unreifen Produktionsprozessen**

Band 275



Forschungsberichte aus dem  
wbk Institut für Produktionstechnik  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer  
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza  
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Fabian Sasse

**Ontologie-basierte Entscheidungsunterstützung für  
die Auswahl von Messsystemen in unreifen  
Produktionsprozessen**

Band 275



# **Ontologie-basierte Entscheidungsunterstützung für die Auswahl von Messsystemen in unreifen Produktionsprozessen**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
**Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)**

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des  
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

**Dissertation**

von

M.Sc. Fabian Sasse

aus Karlsruhe

Tag der mündlichen Prüfung: 20.12.2023  
Hauptreferentin: Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza  
Korreferent: Prof. Dr. Steffen Staab

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2023

Copyright Shaker Verlag 2024

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9495-4  
ISSN 0724-4967

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren  
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9  
Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Vorwort des Herausgebers**

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, indem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund wird im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von additiven und subtraktiven Fertigungsverfahren, den Produktionsanlagen und der Prozessautomatisierung sowie mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung der Produktionssysteme und -netzwerke. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze



## **Vorwort des Verfassers**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza für die Betreuung meiner wissenschaftlichen Arbeit als Hauptreferentin und das mir entgegengebrachte Vertrauen in den vergangenen Jahren. Weiter danke ich Herrn Prof. Dr. Steffen Staab für sein Interesse an meiner Arbeit und der Übernahme des Korreferats sowie Herrn Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin für den Prüfungsvorsitz.

Allen Kolleginnen und Kollegen des wbk in Karlsruhe, insbesondere im Bereich PRO, danke ich für die fortwährende Unterstützung und den kollegialen Austausch in den vergangenen Jahren. Namentlich seien an dieser Stelle Lukas Weiser, Leonard Schild, Jork Groenewold, Louis Schäfer, Gwen Steier und Katja Höger erwähnt. Unsere gemeinsamen Projekte und der Institutsalltag bleiben mir fest in Erinnerung. Für das Korrekturlesen dieser Arbeit danke ich Lukas Weiser und Jork Groenewold.

Meiner Familie danke ich von Herzen für ihre immerwährende Unterstützung und Rücksichtnahme - ohne euch stünde ich nicht da, wo ich heute stehe. Abschließend gilt mein größter Dank Karoline Haack für die Unterstützung, den Rückhalt und das Verständnis zu jeder Zeit auf dem langen Weg zur Erstellung dieser Arbeit und darüber hinaus.

Karlsruhe, im Dezember 2023

Fabian Sasse





## Kurzfassung

Entscheidungsunterstützungssysteme für die Auswahl von Betriebsmitteln in der Produktionstechnik, z.B. Messsysteme, durch datengetriebene und regelbasierte Ansätze sind Gegenstand aktueller Forschungsaktivitäten. Nicht zuletzt, um verteiltes Expertenwissen nachhaltig zu speichern und für Anwender mit verschiedensten Qualifikationen und aus verschiedensten Branchen zur Verfügung zu stellen, ist ein Entscheidungsunterstützungssystem für die Auswahl von Messsystemen notwendig. Dieses fehlt bislang, da die bestehenden Ansätze nicht für branchen- und technologieübergreifende Anwendungen geeignet sind.

In dieser Arbeit wird eine Ontologie für Messsysteme und Messaufgaben entwickelt, um die Interoperabilität zwischen verschiedenen Domänen und Anwendungen sicherzustellen. Auf Grundlage dieser Ontologie wird ein fallbasiertes Entscheidungsunterstützungssystem entwickelt, das fallbasiertes Schließen für die Auswahl eines Messsystems für eine gegebene Messaufgabe anwendet. Zu diesem Zweck wird eine Wissensbasis in Form eines Wissensgraphen erstellt.

Die Auswahl eines geeigneten Messsystems erfolgt auf der Grundlage ähnlicher, in der Vergangenheit durch Experten validierter, Messaufgaben. Dabei werden auch potenziell geeignete Messsysteme aus anderen Branchen und Anwendungen berücksichtigt, die bislang noch nicht von einem Experten validiert wurden. Diese Messsysteme werden durch Analogieschlüsse aus der Wissensbasis gezogen. Die Analogieschlüsse werden mit Embeddings des Wissensgraphen generiert. Die Analogieschlüsse werden dann von einem Experten hinsichtlich ihrer Richtigkeit bewertet.

Das Entscheidungsunterstützungssystem wird am Beispiel der Batterie- und Brennstoffzellenfertigung exemplarisch umgesetzt. Zunächst wird eine Wissensbasis, bestehend aus Messsystemen und Messaufgaben, aus der Batteriezellfertigung erstellt. Dann werden bislang ungelöste Messaufgaben aus der Brennstoffzellenfertigung als Anfrage an das Entscheidungsunterstützungssystem gestellt. Die vorgeschlagenen Messsysteme werden anschließend unter Laborbedingungen experimentell erprobt.

Diese Arbeit trägt zur Entwicklung Ontologie-basierter Anwendungen in der Produktionstechnik unter Verwendung von Wissensgraphen bei. Das fallbasierte Entscheidungsunterstützungssystem ist eine Anwendung, die mittels der Ontologie umgesetzt werden kann. Die Ontologie bietet darüber hinaus Möglichkeiten zur Entwicklung weiterer, nützlicher Anwendungen.



## **Abstract**

Recommender systems for the selection of different resources in production engineering, e.g., measurement systems, using data-driven and rule-based approaches are topic of current research and development activities. Because of the necessity to consider different domains and experts, a support of the selection process for a suitable measurement system is necessary. A recommender system for the selection of measurement systems is missing so far because the existing approaches are not suitable for cross-industry and cross-technology applications.

In this work, an ontology for measurement systems and measurement tasks is developed to ensure interoperability between different domains and applications. Based on this ontology, a case-based recommender system is developed that applies case-based reasoning for the selection of measurement systems for a given measurement task. A knowledge base is created, which is implemented in the form of a knowledge graph.

The selection of a suitable measurement system is based on similar measurement tasks validated by experts in the past. Potentially suitable measurement systems from other industries and applications, that have not yet been validated by an expert, are also considered. These measurement systems are drawn from the knowledge base by analogy inference. The analogy inferences are generated with knowledge graph embeddings. The analogy inferences are then evaluated by an expert for their correctness.

The recommender system is implemented using the example of battery and fuel cell production. First, a knowledge base consisting of measurement systems and measurement tasks from battery cell production is created. Then, the recommender system is queried for previously unsolved measurement tasks from fuel cell manufacturing. The proposed measurement systems are then experimentally validated under laboratory conditions.

This work contributes to the development of ontology-based applications in product engineering using knowledge graphs. The case-based recommender system is one application that can be implemented using ontology. The ontology also provides opportunities for the development of other useful applications.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Abkürzungen</b>	<b>IV</b>
<b>Formelverzeichnis</b>	<b>VI</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung	4
1.3 Aufbau der Arbeit	4
<b>2 Grundlagen</b>	<b>6</b>
2.1 Begriffe der Fertigungsmesstechnik	6
2.1.1 Messtechnische Begriffsdefinitionen	6
2.1.2 Praxisrelevante Begriffsdefinitionen	8
2.1.3 Fertigungsmesstechnik in unreifen Produktionsprozessen	11
2.2 Entscheidungsunterstützungssysteme	11
2.3 Fallbasiertes Schließen	14
2.3.1 Grundprinzipien	14
2.3.2 Fallrepräsentation	17
2.3.3 Ähnlichkeit	17
2.4 Ontologien	18
2.4.1 Definition und formelle Beschreibung	18
2.4.2 Einordnung der Begriffe Ontologie und Modell	25
2.4.3 Methoden zur Ontologieentwicklung	27
2.5 Wissensgraphen	29
2.5.1 Definition	30
2.5.2 Suche auf Wissensgraphen	32
2.5.3 Analogieschlüsse mit Wissensgraphen	34
2.5.4 Validierung von Wissensgraphen	40
<b>3 Stand der Forschung</b>	<b>42</b>

---

3.1	Anforderungen an ein Entscheidungsunterstützungssystem für die Auswahl von Messsystemen	42
3.2	Ansätze zur Auswahl von Messsystemen	44
3.3	Ontologien in der Produktionstechnik	47
3.4	Fallbasiertes Schließen für Betriebsmittel in der Produktionstechnik	52
3.5	Zusammenfassung und Forschungsdefizit	54
<b>4</b>	<b>Eigener Ansatz</b>	<b>58</b>
4.1	Lösungsansatz	58
4.2	Ontologie für Messsysteme und -aufgaben	60
4.2.1	Domäne und Ziel der Ontologie	61
4.2.2	Wiederverwendung von Ontologien	62
4.2.3	Begriffe der Domäne	64
4.2.4	Klassen und Klassenhierarchie	66
4.2.5	Attribute der Klassen	72
4.2.6	Beschreibung der Attribute	73
4.2.7	Instanzen der Klassen	73
4.3	Wissensgraph für die Auswahl von Messsystemen	77
4.3.1	Erstellung des Wissensgraphen	77
4.3.2	Analogieschlüsse mit dem Wissensgraphen	82
4.3.3	Validierung des Wissensgraphen	87
4.3.4	Bereitstellung des Wissensgraphen	88
<b>5</b>	<b>Ergebnisse der exemplarischen Implementierung</b>	<b>92</b>
5.1	Instanziierung des Wissensgraphen am Beispiel der Batteriezellfertigung	93
5.1.1	Erstellung des Wissensgraphen	93
5.1.2	Analogieschlüsse mit dem Wissensgraphen	101
5.1.3	Validierung des Wissensgraphen	106
5.1.4	Bereitstellung des Wissensgraphen	110
5.2	Validierung am Beispiel der Brennstoffzellenfertigung	114
5.2.1	Pinholes in der MEA-Fertigung	118
5.2.2	Feuchtigkeit der Polymerelektrolytmembran	131

---

<b>6</b>	<b>Diskussion und Ausblick</b>	<b>140</b>
6.1	Evaluation der Anforderungserfüllung	140
6.2	Ausblick	142
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>144</b>
	<b>Liste der eigenen Publikationen</b>	<b>I</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>II</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>XV</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XIX</b>
	<b>Quelltextverzeichnis</b>	<b>XXI</b>



## Abkürzungen

<b>Abkürzung</b>	<b>Beschreibung</b>
BoP	Balance-of-Plant
BPP	Bipolarplatte
CBR	Case-based reasoning, dt.: Fallbasiertes Schließen
CCM	Catalyst Coated Membrane, dt.: Katalysatorbeschichtete Membran
CNN	Convolutional Neural Network
CWA	Closed-World Assumption
EoL	End-of-Line
FAQ	Frequently Asked Questions
GDL	Gasdiffusionslage
HPO	Hyperparameteroptimierung
IR	Infrarot
IRI	Internationalized Resource Identifier
MEA	Membrane-Elektrode-Assembly, dt.: Membran-Elektroden-Einheit
MOF	MetaObject Facility Specification
MR	Median Rank
MRR	Mean Reciprocal Rank
NLP	Natural Language Processing
OMG	Object Management Group
OWA	Open-World Assumption
OWL	Web Ontology Language
OWL DL	OWL Description Logic
p.a.	Per annum, dt.: jährlich
PEM	Polymerelektrolytmembran
PPR	Produkt Prozess Ressource
R2R	Roll-to-Roll, dt.: Rolle-zu-Rolle
RDF	Resource Description Framework
RDFS	Resource Description Framework Schema
REM	Rasterelektronenmikroskop
SHACL	Shapes Constraint Language
ShEx	Shape Expressions
SMC	Simple Matching Coefficient
SPARQL	SPARQL Protocol And RDF Query Language

---

SWRL	Semantic web rule language
THz	Terahertz
TOVE	Toronto Virtual Enterprise
TRL	Technology Readiness Level, dt.: Technologie-Reifegrad
UML	Unified Modeling Language
URI	Uniform Resource Identifier
VM	Virtual Machine
W3C	World Wide Web Consortium

---

## Formelverzeichnis

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
$dist_{euklid}(p, q)$	Euklidischer Abstand zwischen zwei Problembeschreibungen $q \in P$ und $p \in P$ .	-
$e_h$	Embedding von $h$ .	-
$f_r(h, t)$	Scoring-Funktion für den Score zwischen $h$ und $t$ .	-
$(h, r, t)$	Tripel bestehend aus einem Head $h$ , einer Relation $r$ und einem Tail $t$ .	-
$* w$	Faltungsoperator mit Filter $w$ .	-
$c = (p, l)$	Fall (engl. Case) bestehend aus einer Problembeschreibung $p \in P$ und einer Lösungsbeschreibung $l \in L$ .	-
$g$	Nicht-lineare Aktivierungsfunktion.	-
$Hit@N$	Metrik zur Bewertung eines Embeddings.	-
$L$	Menge von Lösungsbeschreibungen.	-
$l = (l_1, \dots, l_n) \in L$	Lösungsbeschreibung mit $n$ Attributen aus einer Menge von Lösungsbeschreibungen $L$ .	-
$limit$	Grenzwert von $score$ , bis zu dem vorhergesagte Tripel berücksichtigt werden.	-
$MR$	Median Rank; Metrik zur Bewertung eines Embeddings.	-
$MRR$	Mean Reciprocal Rank; Metrik zur Bewertung eines Embeddings.	-
$P$	Menge von Problembeschreibungen.	-
$p = (p_1, \dots, p_n) \in P$	Problembeschreibungen mit $n$ Attributen aus einer Menge von Problembeschreibungen $P$ .	-
$prob$	Wahrscheinlichkeit.	%
$q \in Q$	Vorhersage aus einer Menge von Vorhersagen $Q$ .	-
$q = (q_1, \dots, q_n) \in P$	Problembeschreibungen mit $n$ Attributen aus einer Menge von Problembeschreibungen $P$ .	-
$score(h, r, t)$	Der Score zu einem Tripel $(h, r, t)$ .	-
$sim(q, p)$	Ähnlichkeit (engl. Similarity) zwischen zwei Problembeschreibungen $q \in P$ und $p \in P$ .	-

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

### Qualitätssicherung und Fertigungsmesstechnik

Die Qualitätssicherung verfolgt durch den Einsatz von Fertigungsmesstechnik das Ziel, die subjektive Fehlbarkeit des Menschen zu kompensieren, um Fehler zu erkennen oder zu vermeiden (Sommerhoff, 2021). Der Begriff Fertigungsmesstechnik meint dabei alle mit Mess- und Prüfaufgaben verbundenen Tätigkeiten, die im industriellen Entstehungsprozess eines Produktes zu erbringen sind (Keferstein et al., 2018). Die Auswahl eines Messsystems ist eine dieser Tätigkeiten und für jede neue Messaufgabe individuell zu treffen. Beim Einsatz von Fertigungsmesstechnik, ist die Beantwortung der in Tabelle 1-1 genannten Fragen notwendig (Sommerhoff, 2021). Dabei betreffen die ersten zwei Fragen das Messsystem und die letzten drei Fragen die Messaufgabe.

Tabelle 1-1: Fragen beim Einsatz von Fertigungsmesstechnik (Sommerhoff, 2021)

1. Wie (z.B. Messprinzip und -verfahren)?	Eigenschaften des Messsystems
2. Womit (Messgeräte und Hilfseinrichtungen)?	
3. Wer (Beobachter)?	Eigenschaften der Messaufgabe
4. Was (Messobjekt)?	
5. Welche Einflussgrößen (z. B. Umwelteinflüsse)?	

Es bedarf also der Kenntnis der geforderten Eigenschaften des **Messsystems** (Frage 1 und 2) und der gegebenen Eigenschaften der **Messaufgabe** (Frage 3, 4 und 5), um ein geeignetes Messsystem für eine Messaufgabe auszuwählen. Um die geforderten Eigenschaften des Messsystems zu definieren, wird Wissen über den Bereich der Messtechnik benötigt, während die Eigenschaften der Messaufgabe Wissen über den zugrundeliegenden Prozess voraussetzen. (Keferstein et al., 2018; Sommerhoff, 2021) Dieses Wissen wohnt meist Experten inne und ist Teil menschlicher Erfahrung (Tang & Chen, 2015).

### Qualitätssicherung in unreifen Produktionsprozessen

Der Einsatz von Fertigungsmesstechnik gewinnt insbesondere in unreifen Produktionsprozessen an Wichtigkeit (Fleischer et al., 2018; Muelaner et al., 2010). In Anlehnung an Paulk et al. (1993) sind unreife Produktionsprozesse durch mangelhafte Effizienz,

instabile Umgebungsbedingungen und hohe Fehleranfälligkeit, nicht zuletzt aufgrund unzureichender Qualitätssicherungsmaßnahmen, gekennzeichnet. Für die Qualitätssicherung sind insbesondere die folgenden Eigenschaften unreifer Produktionsprozesse entscheidend:

- Das Wissen über Wirkzusammenhänge zwischen Produktqualitáitseigenschaften und Prozessparametern fehlt oder ist nicht vollständig vorhanden.
- Das Wissen über korrekte Sollwerte und Toleranzen von Prozessparametern für eine ausreichende Qualität fehlt oder ist nicht vollständig vorhanden.

Eine Konsequenz aus den o.g. Umständen ist, dass in unreife Produktionsprozesse, trotz fehlendem Wissen über den Prozess, oftmals eine Vielzahl prozessintegrierter Messsysteme integriert wird, um Qualitätsanforderungen zu erfüllen und langfristige Effizienz zu erreichen. Dies reduziert Ausschuss durch eine 100%-Prüfung aller gefertigten Teile und vermeidet Wertschöpfung an fehlerhaften Teilen. (Lanza et al., 2019) Dabei wird das Ziel verfolgt, mit modernen Datenanalyseverfahren aus einer großen Menge von Messdaten Erkenntnisse zu gewinnen, die noch nicht in physikalischen Modellen beschrieben werden können (Fleischer et al., 2018). Diese Entwicklung ist nicht zuletzt auf geringere Anschaffungskosten, günstigere Übertragungsmöglichkeiten und innovative Messprinzipien zurückzuführen (Fleischer et al., 2018; Werthschützky, 2018).

Der Einsatz von Fertigungsmesstechnik in unreifen Produktionsprozessen führt zu einem Konflikt: Es muss häufig die Auswahl eines geeigneten Messsystems getroffen werden (Fleischer et al., 2018; Werthschützky, 2018). Diese Auswahl soll durch Experten auf Grundlage ihrer Erfahrung durchgeführt werden (Tang & Chen, 2015). Zum einen liegt diese Erfahrung in unreifen Produktionsprozessen aber oftmals nicht ausreichend vor (Paulk et al., 1993). Zum anderen ist es grundsätzlich von Nachteil, wenn die zielführende Auswahl lediglich von Experten durchgeführt werden kann. (Aggarwal, 2016)

Es bedarf daher der Zentralisierung des Erfahrungswissens aus verschiedensten Branchen und Anwendungen, um auch in unreifen Produktionsprozessen mit wenig Erfahrung handlungsfähig zu sein. Zudem muss dieses Wissen auch von Laien nutzbar sein, um für die Auswahl nicht auf Experten angewiesen zu sein. (Kincaid & Pollock, 2017)

## Entscheidungsunterstützungssysteme

Informationsfilterungssysteme (engl.: Information filtering system) werden genutzt, um aus großen, unübersichtlichen Daten relevante Informationen zu extrahieren und einem Nutzer zu präsentieren. In aller Regel kommen Entscheidungsunterstützungssystemen (engl. Recommender System) zum Einsatz. (Hanani et al., 2001) Es gibt verschiedene Arten von Entscheidungsunterstützungssystemen, die sich insbesondere in den vom Nutzer benötigten Informationen und der Ähnlichkeitsermittlung zwischen betrachteten Elementen unterscheiden. Da unreife Produktionsprozesse zu Beginn nur eine kleine initiale Wissensbasis bieten und eine Messaufgabe, bestehend aus vielfältigen Eigenschaften, präzise beschreiben soll, eignen sich **fallbasierte Ansätze** als Subtyp von **wissensbasierten Entscheidungsunterstützungssystemen** (s. Kapitel 2.2). Andere Entscheidungsunterstützungssysteme benötigen eine große initiale Wissensbasis oder erlauben keine komplexeren Ähnlichkeitsvergleiche. (Aggarwal, 2016)

Die dabei genutzte Problemlösungsmethodik ist **fallbasiertes Schließen** (engl. Case-Based Reasoning, CBR). Fallbasiertes Schließen ist eine maschinelle Problemlösungsmethodik, die dem menschlichen Problemlösungsprinzip sehr nahe kommt. Tritt ein neuer Fall auf, wird eine Anfrage an eine Fallbasis gestellt. Dabei wird die Ähnlichkeit des neuen Falls mit den Fällen der Fallbasis verglichen, um eine möglichst geeignete Lösung für das Problem zu finden. (Aamodt & Plaza, 1994; Bergmann et al., 2020) Fallbasiertes Schließen eignet sich insbesondere für Anwendungsfälle, bei denen sich das Wissen aus verschiedenen Quellen, z.B. nicht formalisiertem Erfahrungswissen, theoretischem Grundwissen oder Regeln, zusammensetzt (Aamodt & Plaza, 1994; Aha, 1998; Watson & Marir, 1994). Dieses – größtenteils subjektive – Wissen kann in Form von Fällen abgespeichert werden.

Im vorliegenden Anwendungsfall kann eine zentralisierte Wissensbasis nach in der Vergangenheit bereits in anderen Branchen und Anwendungen validierten Messaufgaben durchsucht werden, um ein geeignetes Messsystem für eine neue Messaufgabe in einem unreifen Produktionsprozess zu finden.

## Ontologien und Wissensgraphen

Wissensbasierte Entscheidungsunterstützungssysteme erfordern die Formalisierung von Domänenwissen, um eine Vorhersage mittels einer konkreten Ähnlichkeitsmetrik aus den zugrundeliegenden Elementen treffen zu können. (Aggarwal, 2016) Des Weiteren sind im Anwendungsfall dieser Arbeit mehrere Branchen, Anwendungen und

Nutzern involviert. Aus diesem Grund wird ein Domänenmodell für die zugrundeliegende Wissensbasis benötigt. Dieses Domänenmodell kann von einer **Ontologie** repräsentiert werden. Ontologien bieten zwei entscheidende Vorteile (Ahmad et al., 2018; Cao et al., 2019; Usman et al., 2013):

1. **Interoperabilität:** es wird ein einheitlicher und unmissverständlicher Informationsaustausch zwischen Anwendungen und Akteuren verschiedener Branchen gewährleistet.
2. **Entscheidungsunterstützung:** durch computergestützte Verarbeitung von Informationen können Entscheidungsprozesse automatisiert und verbessert werden.

Die algorithmische, computergestützte Implementierung der Ähnlichkeitsmetriken sollte vielfältige Möglichkeiten bieten, um auch komplexe Ähnlichkeitsvergleiche zwischen Messaufgaben durchführen zu können. Hierfür eignen sich **Wissensgraphen**, da für die Ähnlichkeitsvergleiche Ansätze aus der Graphentheorie herangezogen werden können. (Chen et al., 2020; Hogan et al., 2022) Des Weiteren gibt es vielfältige erprobte Methoden zur Implementierung von Wissensgraphen unter Berücksichtigung einer Ontologie. (Abecker & van Elst, 2009; Bergmann & Schaaf, 2003; Kejriwal, 2019)

Zusammenfassend eignet sich ein Entscheidungsunterstützungssystem, um branchen- und anwendungsübergreifendes Wissen zu zentralisieren und in unreifen Produktionsprozessen auch ohne Experten ein geeignetes Messsystem auswählen zu können. Hierfür ist die Formalisierung von Domänenwissen notwendig. Um gleichzeitig Interoperabilität zwischen Anwendungen und Akteuren zu ermöglichen, bietet sich hierfür die Entwicklung einer Ontologie für die zugrundeliegende Domäne an. Wissensgraphen bieten vielfältige Möglichkeiten zur automatisierten Implementierung komplexer Ähnlichkeitsmetriken, auf denen die Empfehlungen beruhen.

## 1.2 Zielsetzung

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist die Entwicklung eines wissensbasierten Entscheidungsunterstützungssystems zur Vorhersage eines Messsystems für eine vorliegende Messaufgabe in unreifen Produktionsprozessen.

## 1.3 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau dieser Arbeit ist in Abbildung 1-1 dargestellt. In Kapitel 1 wird diese Forschungsarbeit motiviert, die Zielsetzung festgehalten und der Aufbau der Arbeit skizziert. In Kapitel 2 wird auf die für das Verständnis dieser Arbeit notwendigen

Grundlagen eingegangen: zunächst werden wichtige Begriffe der Fertigungsmesstechnik definiert, dann werden Entscheidungsunterstützungssysteme im Allgemeinen sowie die Problemlösungsmethodik fallbasiertes Schließen im Speziellen erläutert. Abschließend werden Ontologien und Wissensgraphen betrachtet. In Kapitel 3 wird der für diese Arbeit relevante Stand der Forschung zu Entscheidungsunterstützungssystemen für die Auswahl von Messsystemen und Ontologien in der Produktionstechnik betrachtet. In Kapitel 4 wird der Lösungsansatz dieser Arbeit beschrieben und der eigene Ansatz, bestehend aus der Entwicklung einer Domänenontologie und der Entwicklung eines fallbasierten Entscheidungsunterstützungssystems, vorgestellt. In Kapitel 5 werden die Ergebnisse einer exemplarischen Implementierung am Beispiel der Batterie- und Brennstoffzellenfertigung gezeigt. In Kapitel 6 erfolgt eine kritische Würdigung und ein Ausblick. In Kapitel 7 wird diese Arbeit zusammengefasst.

Kapitel 1: Einleitung			
Motivation	Zielsetzung	Aufbau der Arbeit	
Kapitel 2: Grundlagen			
Fertigungsmesstechnik	Entscheidungsunterstützungssysteme	Ontologien	Wissensgraphen
Kapitel 3: Stand der Forschung			
Auswahl von Messsystemen	Ontologien in der Produktionstechnik	Fallbasiertes Schließen in der Produktionstechnik	
Kapitel 4: Eigener Ansatz			
Ontologie für Messsysteme und Messaufgaben		Wissensgraph für die Auswahl von Messsystemen	
Kapitel 5: Ergebnisse der exemplarischen Implementierung			
Wissensgraph am Beispiel der Batteriezellenfertigung		Validierung am Beispiel der Brennstoffzellenfertigung	
Kapitel 6: Diskussion und Ausblick			
Kapitel 7: Zusammenfassung			

Abbildung 1-1: Aufbau der Arbeit



## 2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die notwendigen Grundlagen zum Verständnis der vorliegenden Arbeit dargelegt. In Kapitel 2.1 werden für diese Arbeit wichtige Begriffe der Fertigungsmesstechnik definiert. In Kapitel 2.2 werden Entscheidungsunterstützungssysteme im Allgemeinen und in Kapitel 2.3 fallbasiertes Schließen als Problemlösungsmethodik im Speziellen vorgestellt. In Kapitel 2.4 werden Ontologien betrachtet, die als übergeordnetes Modell von Wissensgraphen Anwendung finden. In Kapitel 2.5 werden die Definition und gängige Methoden im Umgang mit Wissensgraphen erläutert.

### 2.1 Begriffe der Fertigungsmesstechnik

Die "Fertigungsmesstechnik steht als Oberbegriff für alle mit Mess- und Prüfaufgaben verbundenen Tätigkeiten, die beim industriellen Entstehungsprozess eines Produktes zu erbringen sind." (Keferstein et al., 2018; Pfeifer & Schmitt, 2010) Der Einsatz von Fertigungsmesstechnik in unreifen Produktionsprozessen bildet die grundlegende Domäne der vorliegenden Arbeit. Daher werden für diese Arbeit wichtige Begriffe der Messtechnik definiert sowie Begriffe, die im Rahmen der praktischen Umsetzung im industriellen Produktentstehungsprozess relevant sind, erläutert.

#### 2.1.1 Messtechnische Begriffsdefinitionen

Die nachfolgenden Definitionen wurden, sofern nicht anders gekennzeichnet, aus DIN 1319-1:1995-01 (1995) und DIN 1319-2:2005-10 (2005) entnommen.

##### **Messprinzip (engl.: Principle of Measurement)**

„Physikalische Grundlage der Messung.“

Beispiel: Die Interferenz des Lichts als Grundlage einer Längenmessung oder der thermoelektrische Effekt als Grundlage einer Temperaturmessung.

##### **Messmethode (engl.: Method of Measurement)**

„Spezielle, vom Messprinzip unabhängige Art des Vorgehens bei der Messung.“

Beispiel: Analoge oder digitale Messmethode oder Vergleichs- und Substitutionsmessmethode.

##### **Messverfahren (engl.: Measurement Procedure)**

„Praktische Anwendung eines Messprinzips und einer Messmethode.“

Beispiel: Masseermittlung mit einer Waage.

**Messmittel (engl.: Measuring equipment)**

„Messgerät, Messeinrichtung, Referenzmaterial, Normal oder Hilfsmittel, das bzw. die zur Ausführung von Messungen notwendig ist.“

**Messobjekt (engl.: Measuring object)**

„Träger der Messgröße.“

Beispiel: Körper, Vorgänge oder Zustände.

**Einflussgröße (engl.: Influence quantity)**

„Größe, die nicht Gegenstand der Messung ist, jedoch die Messgröße oder die Ausgabe beeinflusst.“

Beispiel: Umgebungstemperatur, Feuchte, Luftdruck.

**Messsystem / Messeinrichtung<sup>1</sup> (engl.: Measuring system)**

„Kombination aus Messgeräten und oft anderen Geräten sowie bei Bedarf Reagenzien und Versorgungseinrichtungen, die so angeordnet und angepasst sind, dass sie Information liefern, um Messwerte innerhalb bestimmter Intervalle für Größen bestimmter Arten zu erhalten.“ (Brinkmann, 2012)

**Messgerät (engl.: Measuring instrument)**

„Gerät, das allein oder in Verbindung mit anderen Einrichtungen für die Messung einer Messgröße vorgesehen ist.“

**Messung (engl.: Measurement)**

„Ausführen von geplanten Tätigkeiten zum quantitativen Vergleich der Messgröße mit einer Einheit.“

**Messgröße (engl.: Measurand)**

„Physikalische Größe, der die Messung gilt.“

---

<sup>1</sup> Der Begriff *Messsystem* wird in Brinkmann (2012) verwendet, während der Begriff *Messeinrichtung* in DIN 1319-1:1995-01 (1995) verwendet wird. Die Begriffe werden in beiden Quellen gleich definiert und gleich ins Englische übersetzt.

Anmerkung: Der (Größen-) Wert einer speziellen Messung wird durch das Produkt aus Zahlenwert und Einheit ausgedrückt.

Beispiel: Ein Volumen eines Körpers oder der elektrische Widerstand eines Drahtes.

### **Messunsicherheit (engl.: Uncertainty of Measurement)**

„Kennwert, der aus Messungen gewonnen wird und zusammen mit dem Messergebnis zur Kennzeichnung eines Wertebereichs für den wahren Wert der Messgröße dient.“

### **Vollständiges Messergebnis**

„Messergebnis mit quantitativen Angaben zur Genauigkeit.“

### **Messergebnis (engl.: Result of Measurement)**

„Aus Messungen gewonnener Schätzwert für den wahren Wert einer Messgröße.“

Anmerkung: Das Schätzen des wahren Werts erfolgt meist durch die Anwendung statistischer Schätzmethoden.

### **Messwert (engl.: Measured value)**

„Wert, der zur Messgröße gehört und der Ausgabe eines Messgeräts oder einer Messeinrichtung eindeutig zuzuordnen ist.“

Anmerkung: Der Messwert setzt sich aus dem wahren Wert, einer zufälligen und einer systematischen Messabweichung zusammen.

### **Messbereich (engl.: Specified measuring (working) range)**

„Bereich derjenigen Werte der Messgröße, für den gefordert ist, dass die Messabweichung eines Messgeräts innerhalb festgelegter Grenzen bleibt.“

### **Auflösung (engl.: Resolution)**

„Angabe zur quantitativen Erfassung des Merkmals eines Messgeräts, zwischen nah beieinander liegenden Messwerten eindeutig zu unterscheiden.“

## **2.1.2 Praxisrelevante Begriffsdefinitionen**

Die nachfolgenden Begriffe sind für die praktische Implementierung von Messsystemen im Produktionsumfeld von Relevanz und werden für die zu modellierende Ontologie benötigt.

### **Messobjektschnittstelle**

Wird ein Messsystem für eine Messung an einem Messobjekt eingesetzt, sind für die praktische Umsetzung insbesondere zwei Schnittstellen zu diesem Messobjekt wichtig: erstens kann das Messsystem *berührend* oder *nicht-berührend* mit dem Messobjekt interagieren. Zweitens kann es sich dabei um eine *zerstörende* oder *nicht-zerstörende* Messung handeln. (Keferstein et al., 2018)

### **Freiheitsgrade**

Ein Freiheitsgrad bezeichnet im Sinne der Mechanik eine unabhängige Bewegungsmöglichkeit. Die Anzahl der Freiheitsgrade reicht von 0 bis 6; dabei wird zwischen drei translatorischen und drei rotatorischen Freiheitsgraden unterschieden. Im Kontext der Fertigungsmesstechnik beschreibt der Freiheitsgrad, wie flexibel ein Messsystem um das Messobjekt angeordnet werden kann. So ist z.B. ein Kamerasystem auf einem Stativ maximal flexibel (Freiheitsgrade: 6), während ein taktiles Koordinatenmessgerät i.d.R. weniger flexibel ist (Freiheitsgrad: meist 3). (Keferstein et al., 2018)

### **Technologiereifegrad (TRL)**

Der Technologiereifegrad (engl.: Technology Readiness Level, TRL) ist eine Skala zur Bewertung des Entwicklungsstandes von neuen Technologien. Der TRL wird in Stufen von 1 bis 9 angegeben. Diese lassen sich im Allgemeinen wie folgt einordnen: Grundlagenforschung (1 bis 3), Labor-/Technikumanlagen (4 bis 5) und Pilot- sowie Demonstrationsanlagen (6 bis 9). (Töpler & Lehmann, 2017)

### **Messdauer und Messzeit**

Es wird zwischen einer Messdauer, die die Durchführung einer bestimmten Messung in Anspruch nimmt und einer Messzeit, die ein Messgerät für die Aufnahme eines Messwerts benötigt, unterschieden. Damit ein Messgerät zur Durchführung einer bestimmten Messung geeignet ist, sollte die Messzeit unter der Messdauer liegen, d.h. das Messgerät sollte in der Lage sein, den Messwert in der geforderten Zeit aufzunehmen. (DIN 1319-1:1995-01, 1995; Keferstein et al., 2018)

### **Frequenz**

Eine Messfrequenz (oder: Abtastrate) eines Messgeräts gibt die Anzahl der realisierten Messungen in einem festgelegten Zeitintervall an. Typischerweise wird die Messfrequenz in Messungen pro Sekunde ausgedrückt. (Keferstein et al., 2018)

## Integrationsgrade von Messsystemen

In Abbildung 2-1 sind die Integrationsgrade von Messtechnik nach Lanza et al. (2019) dargestellt. Unter *Off-Shopfloor* wird Messtechnik in Laborumgebungen, z.B. in Labormessräumen, verstanden. *On-Shopfloor* umfasst Messtechnik in der Produktionsumgebung. *Off-Line* umfasst Messtechnik in räumlicher Nähe zur Produktionslinie, wobei *In-Line* tatsächlich Teil der Produktionslinie ist. *Off-Machine* umfasst als separate Produktionsanlage integrierte, In-Line Messtechnik. *On-Machine* ist in eine Produktionsanlage integrierte Messtechnik. Zuletzt wird berücksichtigt, ob On-Machine Messtechnik hauptzeitparallel (*In-Process*) oder asynchron zum Produktionsprozess (*Off-Process*) umgesetzt ist. (Lanza et al., 2019)

Ein höherer Integrationsgrad der Messtechnik ermöglicht einerseits eine schnellere Reaktion auf Abweichungen in der gefertigten Qualität und somit eine Reduzierung von Ausschuss. Andererseits bedingt die Integration von Messtechnik in einzelne Produktionsprozesse, insbesondere bei komplexen Produktionssystemen, eine häufigere Entscheidung über einzusetzende Messtechniken. Diese Entscheidung muss für jeden Anwendungsfall individuell getroffen werden und bedarf Expertenwissens.

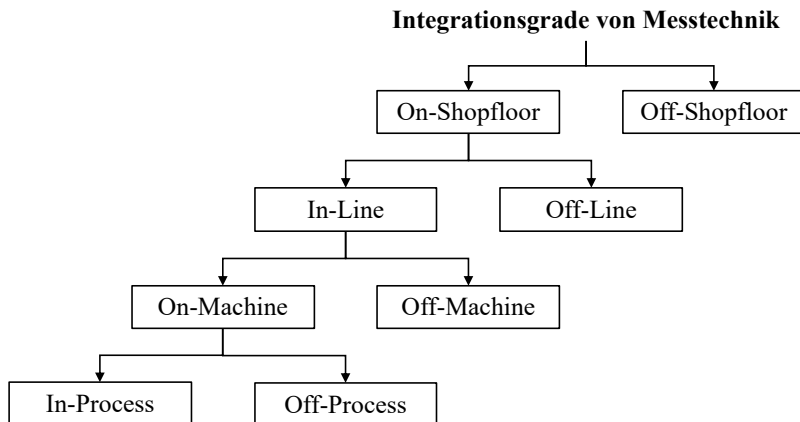


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung der Integrationsgrade von Messsystemen (eigene Darstellung nach Lanza et al., 2019)

### 2.1.3 Fertigungsmesstechnik in unreifen Produktionsprozessen

Nach Lanza et al. (2019) ist ein Qualitätssicherungssystem fester Bestandteil eines Produktionssystems. Jedes Qualitätssicherungssystem sieht ein Messsystem vor, das in das Produktionssystem integriert wird, um eine gefertigte Qualität zu messen. Um hohe Qualitätsanforderungen zu erfüllen und langfristig Kosten zu sparen, soll dieses Messsystem möglichst früh im Produktionsprozess (*In-Line*) integriert werden. Dies reduziert Ausschuss durch eine 100%-Prüfung aller gefertigten Teile und vermeidet Wertschöpfung an fehlerhaften Teilen. Vor allem in unreifen Produktionsprozessen ist der Einsatz von prozessintegrierter Messsysteme aufgrund der hohen Fehleranfälligkeit des Prozesses und unbekannter Wirkzusammenhänge von Vorteil. Infolgedessen wird in unreifen Produktionsprozessen regelmäßig ein Auswahlprozess für ein passendes Messsystem für eine vorliegende Messaufgabe durchgeführt. Wie eingangs erläutert, findet dieser Auswahlprozess häufig trotz unzureichenden Wissens über den zugrundeliegenden Produktionsprozess und dessen Wirkzusammenhänge statt. (Fleischer et al., 2018; Lanza et al., 2019; Peter et al., 2013)

## 2.2 Entscheidungsunterstützungssysteme

Das Ziel von Empfehlungssystemen oder Entscheidungsunterstützungssystemen (engl.: *Recommender System*) ist die Vorhersage eines bestimmten Elements aus einer Vielzahl von Elementen, für das sich ein Nutzer am wahrscheinlichsten interessiert. Die zugrundeliegende Problemstellung kann auf zwei unterschiedliche Arten formuliert werden: entweder soll ein bestimmter Wert, der einer Nutzerbewertung entspricht, vorhergesagt werden; oder es soll die Menge aller Elemente sortiert werden, um die  $k$  besten Elemente<sup>2</sup> für einen Nutzer vorherzusagen. (Aggarwal, 2016) Die empfohlenen Elemente sollten vier Anforderungen erfüllen (Aggarwal, 2016):

- Relevanz: Das empfohlene Element sollte für den Nutzer relevant sein, sodass er dieses überhaupt in seinen Entscheidungsprozess einbezieht.
- Neuheit: Das empfohlene Element sollte der Nutzer in der Vergangenheit nicht bereits kennengelernt haben.
- Serendipität: Neben der Neuheit sollte das empfohlene Element unerwartet / überraschend und nicht offensichtlich für den Nutzer sein.

---

<sup>2</sup>  $k$  kann eine beliebige ganzzahlige Zahl sein. Oftmals sind die ersten drei bis zehn Elemente von Interesse, die am wahrscheinlichsten den Präferenzen des Nutzers entsprechen. (Aggarwal, 2016)

- Vielfalt: Sollten mehrere Elemente vorgeschlagen worden, sollten diese eine Vielfalt bieten; d.h. sie sollten sich in ihren Eigenschaften ausreichend unterscheiden.

Es wird zwischen drei verschiedenen Arten von Entscheidungsunterstützungssystemen unterschieden (s. Tabelle 2-1). Darüber hinaus gibt es hybride Modelle, die in dieser Arbeit jedoch nicht weiter behandelt werden.

Tabelle 2-1: Vergleich der Arten von Entscheidungsunterstützungssystemen (Aggarwal, 2016)

Typ	<b>Kollaboratives Filtern</b> ( <i>engl.: collaborative filtering</i> )	<b>Inhaltsbasiert</b> ( <i>engl.: content-based</i> )	<b>Wissensbasiert</b> ( <i>engl.: Knowledge-based</i> )
Subtypen	Speicherbasiert ( <i>engl.: memory-based</i> )	-	Einschränkungsbasiert ( <i>engl.: constraint-based</i> )
	Modellbasiert ( <i>engl.: model-based</i> )		Fallbasiert ( <i>engl.: case-based</i> )
Inputs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nutzerbewertungen</li> <li>• Gruppenbewertungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nutzerbewertung</li> <li>• Elementattribute</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nutzervorgabe</li> <li>• Elementattribute</li> <li>• Domänenwissen</li> </ul>
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Berücksichtigt Präferenzen der Nutzer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Berücksichtigt Elementattribute</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Berücksichtigt Elementattribute</li> <li>• Reduziert Kaltstartproblematik</li> <li>• Berücksichtigt Domänenwissen</li> </ul>
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kaltstartproblematik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kaltstartproblematik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zu Beginn Formalisierung von Domänenwissen notwendig</li> </ul>

Beim **kollaborativen Filtern** werden die Bewertungen eines Nutzers mit den Bewertungen einer Vergleichsgruppe verglichen. Es wird zunächst die Vergleichsgruppe ermittelt, die die gleichen Präferenzen hat wie der Nutzer. Die Elemente, die vom Nutzer noch nicht bewertet wurden, aber von der Vergleichsgruppe gut bewertet wurden, entsprechen den Elementen, denen ein hohes Interesse des Nutzers unterstellt wird. Die Bewertungen werden z.B. durch ein bis fünf Sterne oder durch eine qualitative Skala

(„gut“, „mittel“, „schlecht“) ausgedrückt. Es wird zwischen speicherbasierten Typen, bei denen Beziehungen aus Nachbarschaften der Elemente und Nutzer abgeleitet werden, und modellbasierten Typen, mit komplexeren Optimierungsansätzen, wie z.B. Regeln oder Entscheidungsbäume, unterschieden. Das kollaborative Filtern berücksichtigt unmittelbar die Präferenzen der Nutzer, allerdings ist bereits zu Beginn eine große Wissensbasis notwendig. Ein Beispiel für einen solchen Ansatz ist der Empfehlungsalgorithmus von Amazon. (Aggarwal, 2016)

Bei **inhaltsbasierten Ansätzen** werden die Bewertungen eines Nutzers den Attributen (Eigenschaften) der Elemente gegenübergestellt, um Vorhersagen zu treffen. Anders als beim kollaborativen Filtern werden neue Vorhersagen nicht auf Grundlage der Bewertungen einer Vergleichsgruppe, sondern auf ähnlichen Eigenschaften zwischen den Elementen der Gesamtmenge getroffen. Dieser Ansatz hat Vorteile, wenn es zu einem Element bislang nur wenige Bewertungen gibt, anhand derer eine Ähnlichkeit bestimmt werden muss. Oftmals werden ähnliche Elemente mittels Schlagwörtern gefunden, die den Elementen zugeordnet sind. Die Vorhersage für neue Nutzer ist aufgrund fehlender Vergleichselemente besonders schwer (Kaltstartproblematik). Inhaltsbasierte Verfahren haben daher das Problem, dass sie oftmals nur offensichtliche Vorhersagen treffen und die Anforderungen Neuheit, Serendipität und Vielfalt nicht erfüllen. Ein Beispiel für einen solchen Ansatz ist der Empfehlungsalgorithmus von Netflix, wenn ein neuer Nutzer zu Beginn verschiedene Genres angibt, die seinen Präferenzen entsprechen. Sobald einige Bewertungen des Nutzers vorliegen, kann dabei auch kollaboratives Filtern angewandt werden. (Aggarwal, 2016)

Bei **wissensbasierten Ansätzen** wird der Kaltstartproblematik begegnet, indem die Ähnlichkeit zwischen Elementen mittels Domänenwissen ermittelt wird. In diesem Domänenwissen sind Regeln und Funktionen enthalten, wie die Ähnlichkeit zwischen Elementen zu ermitteln ist. Darüber hinaus hat ein Nutzer die Möglichkeit, seine Anforderungen explizit zu spezifizieren. Es werden also nicht nur bisherige Bewertungen des Nutzers für die Vorhersage berücksichtigt. Auf diese Weise ist es mit wissensbasierten Ansätzen möglich, auch für neue Nutzer oder neue Elemente wahrscheinliche Vorhersagen zu treffen. Es wird zwischen einschränkungs-basierten Typen, bei denen Einschränkungen, wie z.B. obere und untere Grenzen, getroffen werden, und fallbasierten Typen, bei denen ähnliche Elemente mit komplexeren Ähnlichkeitsmetriken ermittelt werden, unterschieden. Wissensbasierte Ansätze sind bei einer anfänglich kleinen Datenbasis sehr hilfreich, um dennoch wahrscheinliche Vorhersagen zu treffen. Sie



erfordern allerdings auch die Formalisierung von Domänenwissen, um diese Vorhersagen zu treffen. Ein Beispiel für einen solchen Ansatz sind die Suchen auf Portalen für Immobilien oder Autos, bei denen ein Nutzer gewisse Kriterien und Einschränkungen angeben kann. Diese Portale nutzen meist einschränkungs-basierte Ansätze. (Aggarwal, 2016)

## **2.3 Fallbasiertes Schließen**

Der fallbasierte Subtyp der wissensbasierten Ansätze von Entscheidungsunterstützungssystemen ermöglicht trotz anfänglich kleiner Wissensbasen die Erstellung wahrscheinlicher Vorhersagen für einen Nutzer. Dieser Ansatz sieht vor, dass die Fallrepräsentation und Ähnlichkeitsmetriken in Form von Domänenwissen gespeichert werden. In Kapitel 2.3.1 wird daher zunächst das Grundprinzip des fallbasierten Schließens erläutert, in Kapitel 2.3.2 wird dann auf die Fallrepräsentation eingegangen, bevor in Kapitel 2.3.3 die Ähnlichkeit zwischen Fällen behandelt wird.

### **2.3.1 Grundprinzipien**

Fallbasiertes Schließen ist eine maschinelle Problemlösungsmethodik, die sich von induktiven und deduktiven Verfahren<sup>3</sup> unterscheidet. Die Problemlösung erfolgt durch einen sog. Analogieschluss. Dem Vorgehen liegt eine sog. Fallbasis zugrunde, in der Erfahrungswissen gespeichert ist. Erfahrung ist spezifisches Wissen, das bei einer vergangenen Problemlösung gewonnen wurde (Bergmann, 2002). Ein Problem wird gelöst, indem die Lösungen vergleichbarer, in der Vergangenheit behandelte Probleme, herangezogen werden. Für den Vergleich werden Ähnlichkeitsmaße verwendet. Folglich ist weder eine umfangreiche Regelbasis noch eine aufwendige Wissensakquisition, wie z.B. bei induktiven Erkenntnisprozessen, zur Problemlösung notwendig. Es gibt zwei etablierte Referenzmodelle, die dem fallbasierten Schließen zugrunde gelegt werden: den Problemlösungszyklus nach Aamodt & Plaza (1994) und Wissenscontainer nach Richter & Weber (2013). (Bergmann et al., 2020)

---

<sup>3</sup> Bei induktiven Ansätzen wird eine Erkenntnis aus Beobachtungen gezogen. Bei deduktiven Ansätzen wird eine Erkenntnis aus der logischen Schlussfolgerung bekannter Theorien gezogen. (Unter: [https://home.uni-leipzig.de/methodenportal/deduktion\\_induktion/](https://home.uni-leipzig.de/methodenportal/deduktion_induktion/), zuletzt aufgerufen am: 24.09.2023)

### 2.3.1.1 Problemlösungszyklus

In Abbildung 2-2 ist der Problemlösungszyklus nach Aamodt & Plaza (1994) dargestellt. Das Vorgehen besteht aus vier zentralen Schritten<sup>4</sup>. Aus einem Problem wird zunächst ein neuer Fall konstruiert. Im ersten Schritt (Abrufen, engl.: *Retrieve*) werden ähnliche Fälle aus der Fallbasis abgerufen. Dazu wird die Ähnlichkeit des neuen Falls zu den gespeicherten Fällen ermittelt. Im zweiten Schritt (Wiederverwenden, engl. *Reuse*) wird die Lösung des ähnlichsten Falls als Ausgangspunkt für die nachfolgenden Schritte ausgewählt. Im dritten Schritt (Überprüfen, engl. *Revise*) wird überprüft, ob die vorgeschlagene Lösung auf das aktuelle Problem anwendbar ist. In diesem Schritt wird die vorgeschlagene Lösung ggf. angepasst. Im vierten Schritt (Speichern, engl. *Retain*) wird der nun gelernte Fall in der Fallbasis gespeichert. (Aamodt & Plaza, 1994) Dabei gibt es drei verschiedene Vorgehensweisen: 1. Es werden alle gelernten Fälle gespeichert; 2. Es werden nur gelernte Fälle gespeichert, wenn ohne sie eine falsche Klassifizierung erfolgen würde; 3. Speicherung der Fälle wie in 2. und darüber hinaus Löschen von ungeeigneten Fällen (Aha et al., 1991).

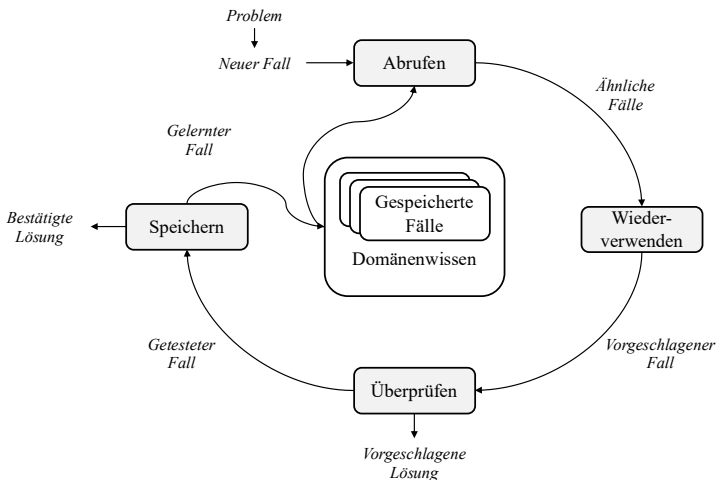


Abbildung 2-2: Problemlösungszyklus für fallbasiertes Schließen (eigene Abbildung nach Aamodt & Plaza, 1994)

<sup>4</sup> Die vier Schritte sind: *Retrieve*, *Reuse*, *Revise* und *Retain* (auch R<sup>4</sup>-Modell genannt) (Aamodt & Plaza, 1994; Bergmann et al., 2020).

### 2.3.1.2 Wissenscontainer

In Abbildung 2-3 sind die Wissenscontainer nach Richter & Weber (2013) dargestellt. Die Container sind nicht im Sinne der Containerisierung aus der Softwareentwicklung zu verstehen. Die Container beschreiben die Elemente, die grundsätzlich für die Umsetzung von fallbasiertem Schließen notwendig sind:

1. Repräsentationssprache und Vokabular
2. Ähnlichkeitsmaß
3. Adaptionwissen
4. Fallbasis

Richter & Weber (2013) unterscheiden zwischen kompiliertem Wissen (Vokabular, Ähnlichkeitsmaß und Adaptionwissen), das zur Laufzeit vorliegt und nicht verändert werden kann, und interpretiertem Wissen (Fallbasis), das sich zur Laufzeit, wie auch im Problemlösungszyklus nach Aamodt & Plaza (1994), verändern kann. Nichtsdestotrotz kann Wissen im Laufe der Zeit zwischen Wissenscontainern wechseln; z.B. können neue Begriffe im Vokabular aufgenommen werden. (Bergmann et al., 2020)

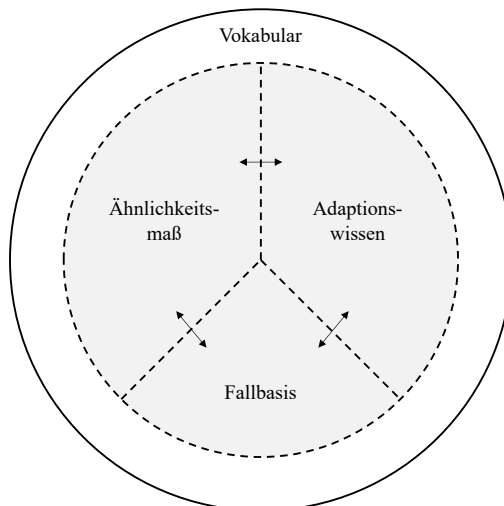


Abbildung 2-3: Wissenscontainer als Prinzip für fallbasiertes Schließen (eigene Abbildung nach Richter & Weber, 2013)

### 2.3.2 Fallrepräsentation

Ein Fall kann als Kombination einer Problem- und einer Lösungsbeschreibung umgesetzt werden. Optional ist ein Qualitätsmaß, das beschreibt, wie gut die gespeicherte Lösung für das Problem geeignet ist. (Bergmann et al., 2020)

Es gibt drei Arten zur Beschreibung der Fallrepräsentation: textuelle Fallrepräsentation, dialogorientierte Fallrepräsentation und strukturelle Fallrepräsentation. Bei der **textuellen** Fallrepräsentation werden Informationen in rein textueller Form beschrieben; eine beispielhafte Umsetzung sind *Frequently Asked Questions* (FAQ). Bei der **dialogorientierten** Fallrepräsentation werden Fallinformationen durch eine Liste von Fragen und zugehörigen Antworten beschrieben. Diese Fallrepräsentation kommt bspw. in Callcentern zum Einsatz, da durch die Fragen gleichzeitig eine Lösungsstrategie vorgegeben wird. Bei der **strukturellen** Fallrepräsentation wird ein Domänenmodell zur Beschreibung der Fallinformationen genutzt. Diese Art der Fallrepräsentation ist aufgrund der vielfältigen Möglichkeiten zur Nutzung von Methoden der Künstlichen Intelligenz am weitesten verbreitet. Die Informationsrepräsentation kann z.B. mit objektorientierten Ansätzen, graphbasierten Ansätzen oder in RDF-Tripeln<sup>5</sup> erfolgen. (Aha, 1998; Bergmann et al., 2020)

### 2.3.3 Ähnlichkeit

Ein Ähnlichkeitsmaß ist zentraler Bestandteil des fallbasierten Schließens, um für ein gegebenes Problem mögliche Lösungen in Form von ähnlichen Fällen aus der Fallbasis abzuleiten. Formal ist ein Ähnlichkeitsmaß *sim* eine Funktion  $sim: P \times P \mapsto [0,1]$ , die für ein Problem  $q \in P$  und einen Fall  $c = (p, l)$  mit einem Problem  $p \in P$  und einer Lösung  $l \in L$  einen Ähnlichkeitswert  $sim(q, p)$  berechnet. Dieser Ähnlichkeitswert liegt im Intervall  $[0,1]$ , wobei ein hoher Wert eine größere Ähnlichkeit widerspiegelt. (Bergmann et al., 2020)

Im Fall von homogenen Fallbasen, d.h. wenn alle Attribute auf dem gleichen Wertebereich abgebildet werden, können Distanzmaße aus der Mathematik eingesetzt werden. Seien  $q = (q_1, \dots, q_n)$  und  $p = (p_1, \dots, p_n)$  zwei Probleme mit  $n$  Attributen. Für rein binäre Attribute kann z.B. der Simple Matching Coefficient (SMC) nach Formel 2-1 eingesetzt werden, um die Anzahl der übereinstimmenden Attribute zu messen. Für reellwertige

---

<sup>5</sup> Für eine Erklärung zu Resource Description Framework (RDF) s. Kapitel 2.4.1

Attribute kann z.B. der euklidische Abstand nach Formel 2-2 eingesetzt werden. (Bergmann et al., 2020)

$$\text{sim}(q, p) = \frac{1}{n} * |\{i | q_i = p_i\}| \quad 2-1$$

$$\text{dist}_{\text{euklid}}(q, p) = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (q_i - p_i)^2} \quad 2-2$$

Im speziellen Fall von strukturellen Fallrepräsentationen, die durch graphbasierte Ansätze abgebildet werden, werden Konzepte aus der Graphentheorie für die Ähnlichkeitsberechnung genutzt. Dabei werden die Knoten und Kanten, die die Probleme  $q$  und  $p$  beschreiben, betrachtet. Details zur konkreten Umsetzung werden in Kapitel 2.5 erläutert.

## 2.4 Ontologien

Bei wissensbasierten Entscheidungsunterstützungssystemen und der strukturellen Fallrepräsentation des fallbasierten Schließens ist ein zugrundeliegendes Domänenmodell notwendig, nach dem die Informationen gespeichert werden. Der vorliegende Anwendungsfall erfordert zudem Interoperabilität zwischen Branchen und Akteuren. Beide Anforderungen können mittels Ontologien umgesetzt werden. In Kapitel 2.4.1 wird daher auf die Definition und die formelle Beschreibung von Ontologien eingegangen. In Kapitel 2.4.2 werden die Begriffe *Ontologie* und *Modell* eingeordnet. In Kapitel 2.4.3 werden gängige Methoden zur Entwicklung von Ontologien skizziert.

### 2.4.1 Definition und formelle Beschreibung

In Computerwissenschaften werden Ontologien verwendet, um die Bestandteile und die Struktur eines Systems zu modellieren. Das grundlegende Ziel, das mit der Nutzung von Ontologien verfolgt wird, ist Daten eine Semantik zu verleihen, damit sie sowohl von Menschen interpretierbar als auch von Maschinen lesbar sind. Für die Modellierung werden einzelne Konzepte beschrieben und meist durch Klassen modelliert, die mit Relationen verbunden sind; bspw. können die Klassen *Autor* und *Buch* mit der Relation *hatGeschrieben* verbunden werden, um eine einfache Ontologie für Buchveröffentlichungen zu modellieren. Konkrete Instanzen der modellierten Klassen sind nicht Bestandteil einer Ontologie. (Guarino et al., 2009)

Es existieren verschiedene Definitionen des Begriffs Ontologie. Eine häufig zitierte Definition stammt von Gruber (1993):

*“An ontology is an explicit specification of a conceptualization.”*

In nachfolgenden Veröffentlichungen wurde auf diese Definition häufig Bezug genommen und um einzelne Aspekte erweitert, wie z.B. in Studer et al. (1998):

*“An ontology is a formal, explicit specification of a shared conceptualization.”*

Eine Konzeptualisierung meint hierbei ein abstraktes Modell eines beliebigen Aspekts der Welt, das als Definition der Eigenschaften und Beziehungen dieses Aspekts verstanden wird. Jeder Wissensbasis liegt dabei irgendeine Konzeptualisierung zugrunde, sodass folglich auch jede Wissensbasis durch eine Ontologie beschrieben werden kann. (Baader et al., 2009)

Neben diesen abstrakten Definitionen existieren auch formellere Definitionen des Begriffs Ontologie. Hierfür sei auf weiterführende Literatur verwiesen; z.B. in Guarino et al. (2009).

Die Nutzung von Ontologien ermöglicht insbesondere die drei nachfolgend genannten Aspekte im Umgang mit beliebigen Wissensbasen (Abecker & van Elst, 2009):

- Grundlage für die Informationserfassung, -integration und -organisation, um durch eine zielgerichtete Strukturierung die spätere Extraktion von Wissen zu vereinfachen.
- Unterstützung bei der Wissenssuche durch Kenntnis der Zusammenhänge in der Wissensbasis.
- Unterstützung der Wissensvisualisierung, insbesondere durch graphbasierte Ansätze, die für Menschen leicht nachvollziehbar sind.

Es wird zwischen drei Arten von Ontologien unterschieden, wobei diese jeweils aufeinander aufbauen können (Beißel, 2020):

- Basisontologien: haben einen breiten Anwendungsbereich und beschreiben allgemeine, generische Konzepte und Relationen, mit denen fast beliebige Aspekte beschrieben werden können.
- Kernontologien: erstrecken sich über mehrere Anwendungsdomänen hinweg, um eine präzise Definition strukturierten Wissens in einem bestimmten Bereich (z.B. Softwarekomponenten oder Multimediametadaten) darzustellen.

- Domänenontologien: sind auf das Wissen einer bestimmten Domäne beschränkt und dienen als externe Quellen von Hintergrundwissen. Sie sind insbesondere wichtig, um die Interoperabilität zwischen verschiedenen Domänen zu ermöglichen.

### Resource Description Framework (RDF)

Die Lesbarkeit von Daten durch Maschinen setzt ein einheitliches Beschreibungsformat voraus. Die Empfehlung des W3C<sup>6</sup> zur Beschreibung von logischen Daten im Web ist das sog. *Resource Description Framework* (RDF). Eine Wissensbasis kann dadurch unter Berücksichtigung einer zuvor definierten Ontologie eindeutig beschrieben werden. Die Wissensbasis besteht dann aus einer Liste von RDF-Aussagen. Dabei gilt zu beachten, dass RDF-Aussagen allein nur eine begrenzte Bedeutung haben, da zur semantischen Interpretation die zugrundeliegende Ontologie notwendig ist. RDF-Aussagen folgen einem einheitlichen Schema in Form von RDF-Tripeln. (Pan, 2009)

Ein RDF-Tripel besteht aus einem Subjekt  $s$  (engl. *subject*) und einem Objekt  $o$  (engl. *object*), die durch ein Prädikat  $p$  (engl. *property*) verbunden sind. Jeder Teil kann durch eine URI<sup>7</sup> oder IRI<sup>8</sup>, sodass darauf referenziert werden kann, oder durch einen leeren Knoten (engl. *blank node*) beschrieben werden. Ein leerer Knoten wird jedoch zur Beschreibung des Prädikats selten genutzt, um die Komplexität gering zu halten. Das Objekt  $o$  kann eine eigenständige Instanz einer Klasse oder ein einfacher Wert (Literal, engl. *literal*), z.B. ein *integer* oder *string*, sein. Literale werden nicht durch eine URI oder IRI referenziert. Ein RDF-Tripel  $(s, p, o)$  ist als Fakt zu verstehen, indem diese als *Subjekt – Prädikat – Objekt* gelesen werden (s. Abbildung 2-4). (Pan, 2009)

---

<sup>6</sup> *World Wide Web Consortium* (W3C): Gremium zur Standardisierung im World Wide Web. (Unter: <https://www.w3.org/>, zuletzt aufgerufen am: 24.09.2023)

<sup>7</sup> Uniform Resource Identifier (URI): Zeichenfolge zur Identifizierung einer Ressource, insbesondere im Internet. (Unter: <https://www.w3.org/wiki/URI>, zuletzt aufgerufen am: 24.09.2023)

<sup>8</sup> Internationalized Resource Identifier (IRI): internationalisierte Form einer URI mit einer Erweiterung der erlaubten Zeichenmenge. (Unter: <https://www.w3.org/wiki/URI>, zuletzt aufgerufen am: 24.09.2023)

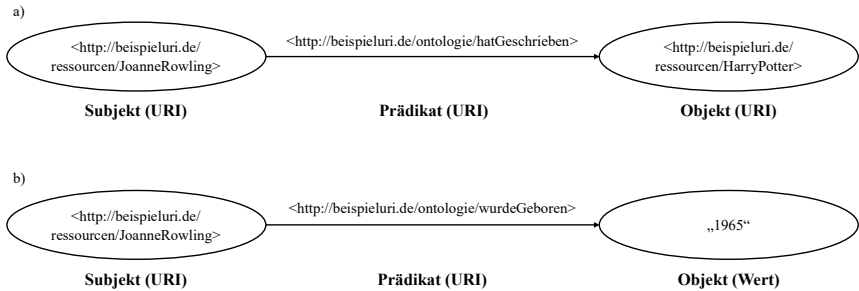


Abbildung 2-4: Graphbasierte Darstellung eines exemplarischen RDF-Tripels mit a) einem Objekt mit URI und b) einem Objekt ohne URI als Literal (eigene Abbildung)

### Resource Description Framework Schema (RDFS)

Eine Weiterentwicklung von RDF ist das sog. RDF-Schema (RDFS). Da RDF nur binäre Beziehungen abbilden kann und die Modellierung einer Wissensbasis schnell sehr aufwendig wird, hält RDFS bereits einige einfache Beziehungen, wie z.B. *subClassOf* oder *subPropertyOf*, vor. Hierarchische Beziehungen zwischen Klassen oder Relationen werden durch eine definierte Axiomatik bereits definiert. Auf diese Weise lassen sich einfache Ontologien effizient abbilden. (Pan, 2009)

In Quelltext 2-1 ist eine exemplarische Ontologie mit RDFS modelliert. Im Kopf (engl. *header*) werden zunächst zugrundeliegende Schemata (sog. Präfixe) eingeführt. Danach werden die Klassen *Autor*, *Buch* und *Kinderbuchautor* beschrieben. Die Klasse *Kinderbuchautor* wurde im Beispiel mit der RDFS-Beziehung *subClassOf* beschrieben, um sie der Klasse *Autor* unterzuordnen.

```
@prefix rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
@prefix rdfs: <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#>
@prefix bsp: http://beispieluri.de/Autor#

bsp:Autor rdf:type rdfs:Class .
bsp:Buch rdf:type rdfs:Class .
bsp:Kinderbuchautor rdf:type rdfs:Class ; rdfs:subClassOf bsp:Autor .
```

Quelltext 2-1: Beispielhafte Modellierung einer exemplarischen Ontologie mit RDFS



## Web Ontology Language (OWL)

Eine noch umfangreichere Beschreibungssprache ist *Web Ontology Language* (OWL). OWL ist eine Spezifikation des W3C, um Ontologien zu beschreiben. OWL basiert syntaktisch auf RDF und RDFS, hält jedoch weitaus mehr Semantik vor. Einige beispielhafte Limitierungen von RDF und RDFS sind, dass keine Disjunktheit von Klassen (z.B. kann eine *Person* nur *Mann* oder *Frau* sein), keine logischen Kombinationen von Klassen (z.B. ist eine *männliche Person*, die *Kinder* hat, automatisch ein *Vater*) oder Kardinalitäten (z.B. hat eine *Person* genau einen *Vater* und genau eine *Mutter*) abgebildet werden können. (Antoniou & Harmelen, 2009)

Mit umfangreicheren Beschreibungsmodellen geht gleichzeitig der Kompromiss zwischen der Aussagekraft des modellierten Wissens und der zur Verarbeitung benötigten Rechenleistung einher. Je umfangreicher eine Wissensbasis beschrieben wird, desto eindeutiger ist deren semantische Interpretation, allerdings steigt gleichzeitig der benötigte Rechenaufwand, um die Wissensbasis computergestützt zu verarbeiten. Aus diesem Grund haben sich zunächst drei Ausprägungen von OWL etabliert (Antoniou & Harmelen, 2009):

- OWL Full: nutzt alle OWL-Prinzipien. Jede RDF- oder RDFS-Beschreibung ist eine valide OWL Full Beschreibung. Diese Ausprägung bedingt den höchsten Rechenaufwand.
- OWL Description Logic (DL): reduziert den benötigten Rechenaufwand durch eine Einschränkung beim Einsatz einiger RDFS-Elemente (z.B. entfällt *subClassOf*). Jede OWL DL-Beschreibung ist eine valide RDF-Beschreibung, allerdings gilt die Kompatibilität nicht uneingeschränkt in die andere Richtung.
- OWL Lite: nimmt noch mehr Einschränkungen ggü. OWL DL vor (z.B. werden Disjunktheit und Kardinalitäten ausgeschlossen). Hinsichtlich der Kompatibilität zu RDF gilt für OWL Lite das gleiche wie für OWL DL.

In einer Überarbeitung von OWL (OWL 2) folgten OWL 2 EL, OWL 2 QL und OWL 2 RL<sup>9</sup>.

In Abbildung 2-5 sind die grundsätzlichen Bestandteile von OWL und deren Beziehung zu RDF und RDFS dargestellt. *owl:Class* ist eine Subklasse von *rdfs:Class*; *rdf:Property* unterteilt sich in *owl:ObjectProperty* für eigenständige Klassen und

---

<sup>9</sup> Unter: <https://www.w3.org/TR/owl2-profiles/>, zuletzt aufgerufen am: 28.12.2023

*owl:DatatypeProperty* für Literale (s. auch Abbildung 2-4). Darüber hinaus gibt es u.a. Randbedingungen für Beziehungen (z.B. *rdfs:subClassOf* oder *owl:minCardinality*), spezielle Beziehungen (z.B. *owl:TransitiveProperty* für größer/kleiner-Vergleiche) und boolesche Operatoren (z.B. *owl:complementOf*). (Antoniou & Harmelen, 2009)

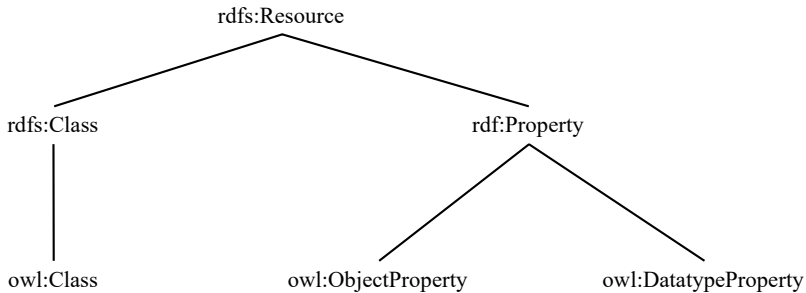


Abbildung 2-5: Bestandteile von OWL und Beziehung zu RDF/DFS (eigene Abbildung nach Antoniou & Harmelen, 2009)

## Grafische Darstellung von Ontologien mit UML

Zur grafischen Visualisierung von Ontologien eignet sich die *Unified Modeling Language* (UML). UML ist eine grafische Modellierungssprache, mit der Software oder andere Systeme einheitlich visualisiert und dokumentiert werden. UML hat sich als Standard in der objektorientierten Programmierung etabliert. Nach einigen Weiterentwicklungen wird UML inzwischen auch zur Modellierung von Geschäftsprozessen eingesetzt. Zur Visualisierung von Ontologien eignen sich UML-Klassendiagramme. (Staud, 2019)

Ein UML-Klassendiagramm besteht aus Klassen, die als Rechtecke dargestellt werden und verschiedenen Verbindungen zwischen Klassen. In Abbildung 2-6 ist ein beispielhaftes UML-Klassendiagramm mit den wichtigsten Verbindungen dargestellt. (Staud, 2019)

Einer Klasse (z.B. „Mensch“) werden Attribute (z.B. „Name“ und „Alter“) sowie Methoden (z.B. „lesen“) zugeordnet. Durch die Verbindung *Vererbung* wird eine „ist ein“-Beziehung ausgedrückt (z.B. ist ein „Student“ ein „Mensch“). Durch die Verbindung *Assoziation* werden zwei Klassen miteinander verknüpft (z.B. hat ein „Student“ ein „Buch“ und besucht „Vorlesungen“). Die Klassen, die durch *Assoziation* verbunden sind,

stellen grundsätzlich eigenständige Klassen dar. Die Verbindung *Aggregation* wird eine „hat“-Beziehung ausgedrückt (z.B. „hat“ eine „Universität“ „Vorlesungen“). Bei der *Aggregation* ist die Richtung der Verbindung wichtig. Durch die Verbindung *Komposition* wird eine „ist Teil von“-Beziehung ausgedrückt (z.B. sind „Buchseiten“ Teil eines „Buchs“). Die *Komposition* drückt aus, dass das Teil (z.B. „Buchseite“) nicht ohne das Ganze (z.B. „Buch“) existieren kann. (Staud, 2019)

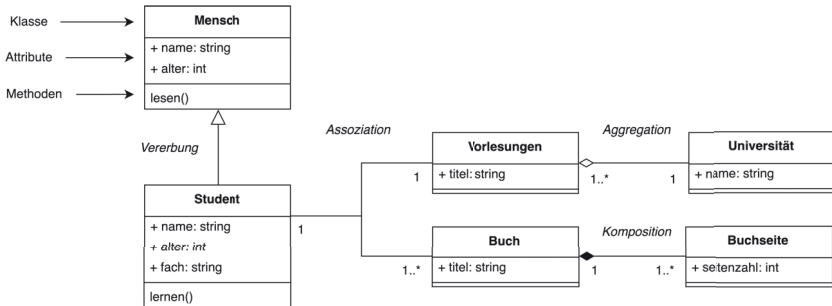


Abbildung 2-6: Beispielhaftes UML-Klassendiagramm (eigene Abbildung)

## Evaluation von Ontologien

Bei der Evaluation von Ontologien wird zwischen Verifikation und Verifizierung unterschieden. *Verifikation* stellt sicher, dass die Ontologie korrekt erstellt wurde und allgemeinen Konventionen folgt. *Verifizierung* stellt sicher, dass das zugrundeliegende System korrekt modelliert wurde. (Gómez-Pérez, 2004)

Da die Modellierung einer Ontologie nicht frei von Subjektivität ist, ist die Verifizierung einer Ontologie nicht ohne weiteres möglich. Um sicherzustellen, dass die „richtige“ Ontologie modelliert wird, empfiehlt es sich, gängige Methoden zur Ontologieentwicklung zu nutzen (vgl. Kapitel 2.4.3). (Vrandečić, 2009)

Um sicherzustellen, dass die Ontologie „richtig“ gebaut wird, können einige Eigenschaften geprüft werden (Vrandečić, 2009):

- *Genauigkeit*: Die Ontologie spiegelt das Fachwissen der Nutzer wider.
- *Anpassungsfähigkeit*: Die Ontologie kann ohne Anpassungen erweitert und adaptiert werden.
- *Übersichtlichkeit*: Die Aussagen der Ontologie sind eindeutig und ohne Kontext verständlich und ausreichend dokumentiert.

- *Vollständigkeit / Fähigkeit*: Die zugrundeliegende Domäne ist ausreichend beschrieben, um für den Anwendungsfall relevante Fragen durch die Ontologie beantworten zu können.
- *Berechnungseffizienz*: Schlussfolgerungen können mit adäquatem Rechenaufwand gezogen werden.
- *Prägnanz*: Die Ontologie enthält keine irrelevanten oder redundanten Aussagen.
- *Konsistenz*: Aussagen in der Ontologie führen nicht zu Widersprüchen.
- *Erreichbarkeit*: Die Ontologie kann leicht in eine Organisation oder in bestehende Ontologien integriert werden.

### 2.4.2 Einordnung der Begriffe Ontologie und Modell

Im Bereich des Semantic Web wird Ontologien zunehmend eine zentrale Rolle zugeschrieben, während sich die klassische Betrachtung in der Softwareentwicklung um Modelle dreht. Da beide Konzepte ähnlich sind und teilweise auch in gleichen Sprachen (z.B. UML) beschrieben werden können, ist eine Abgrenzung der beiden Begriffe notwendig (Aßmann et al., 2006; Atkinson et al., 2006; Atkinson & Kuhne, 2003; Henderson-Sellers, 2011; Parreiras et al., 2007; Živković et al., 2008).

In Atkinson et al. (2006) werden einige **zweckbezogene** und **eigenschaftsbezogene** Merkmale unterschieden:

Zweckbezogene Unterscheidungsmerkmale zwischen Ontologien und Modellen sind:

- Modelle werden für die praktische Implementierung entworfen; Ontologien nicht: Ziel eines Modells ist die Implementierung von Dingen der realen Welt, während Ontologien Eigenschaften und Beziehungen einer Domäne abbilden. In der objektorientierten Programmierung werden Klassen so modelliert, dass sie einen praktischen Zweck (z.B. in Programmcode) erfüllen. Bei der Modellierung einer Ontologie wird das Ziel verfolgt, die zugrundeliegenden Sachverhalt möglichst genau abzubilden. Die zweckbezogene Umsetzung erfolgt meist danach. (Noy & McGuinness, 2000)
- Ontologien sind für die Extraktion von Wissen zur Laufzeit gedacht; Modelle nicht: die zentrale Idee von ontologiegetriebener Softwarearchitektur ist die Entwicklung intelligenter Wissensbasen, die zur Laufzeit verschiedene Arten von Reasoning unterstützen.

- Ontologien bilden webbasierte Informationen ab; Modelle nicht: Ontologien werden als Teil des Semantic Webs oft für die Repräsentation von webbasiertem Wissen genutzt.

Eigenschaftsbezogene Unterscheidungsmerkmale zwischen Ontologien und Modellen sind:

- Ontologien werden mit Sprachen beschrieben, die meist eine präzise Semantik verfügen; Modelle nicht: OWL bietet eine gut definierte Semantik, während UML weniger präzise ist. Mathematische oder logische Schlussfolgerungen sind demnach schwieriger zu ziehen.
- Ontologien unterstützen Reasoning; Modelle nicht: Mittels Ontologien können verschiedene Arten von Reasoning auf Wissensbasen umgesetzt werden, was von Modellen nicht geleistet werden kann.
- Modelle verwenden die *Closed-World Assumption*<sup>10</sup> (CWA); Ontologien verwenden die *Open-World Assumption*<sup>11</sup> (OWA): bei der Modellierung und Interpretation von Modellen und Ontologien spielt die zugrundeliegende Annahme eine wichtige Rolle.

Da in der Softwareentwicklung beide Konzepte benötigt werden, wird in Aßmann et al. (2006) eine Struktur zur Koexistenz beider Konzepte vorgeschlagen, an der sich das in dieser Arbeit zugrundegelegte Verständnis orientiert. (Abbildung 2-7). Zunächst werden die Ebenen der *MetaObject Facility Specification*<sup>12</sup> (MOF) der *Object Management Group*<sup>13</sup> (OMG) zur Strukturierung zu Grunde gelegt. Diese umfassen die Ebene M<sub>0</sub>, in der Anwendungsdaten verortet sind, die Ebene M<sub>1</sub>, in der konkrete Modelle der Ebene M<sub>0</sub> (z.B. Klassendiagramme) verortet sind, die Ebene M<sub>2</sub>, in der Metamodelle der Ebene M<sub>1</sub> (z.B. UML Spezifikationen) und die Ebene M<sub>3</sub>, in der wiederum Metamodelle der Ebene M<sub>2</sub> verortet sind. Modelle der Ebene M<sub>3</sub> werden auch Metametamodelle genannt. (Aßmann et al., 2006)

---

<sup>10</sup> Grundlage CWA: Alles, was nicht explizit als wahr bezeichnet werden kann, wird als falsch bezeichnet. (Aßmann et al., 2006)

<sup>11</sup> Grundlage OWA: Eine Aussage kann wahr sein, egal ob sie als wahr bekannt ist, oder nicht. (Aßmann et al., 2006)

<sup>12</sup> MOF ist eine Grundlage der OMG-Industriestandardumgebung für die Interoperabilität von Modellen. (Unter: <https://www.omg.org/mof/>, zuletzt aufgerufen am: 24.09.2023)

<sup>13</sup> OMG ist ein Konsortium für Standards in der Computerindustrie. OMG Task Forces entwickeln Standards für eine Reihe von Technologien. (Unter: <https://www.omg.org/about/>, zuletzt aufgerufen am: 24.09.2023)

Auf der Ebene  $M_0$  werden Objekte der Softwareentwicklung und Objekte der Realwelt (deren Eigenschaften und Beziehungen in Ontologien abgebildet werden) eingeordnet. Auf der Ebene  $M_1$  werden Domänen-, Basis- und Kernontologien und Modelle der Softwareobjekte eingeordnet. Diese beschreiben jeweils die Objekte der Ebene  $M_0$ . Domänenontologien werden als Instanz von Basis- und Kernontologien betrachtet. Auf der darüberliegenden Ebene  $M_2$  werden Metamodelle eingeordnet. Metamodelle werden als Instanzen von Metametamodellen betrachtet. (Aßmann et al., 2006)

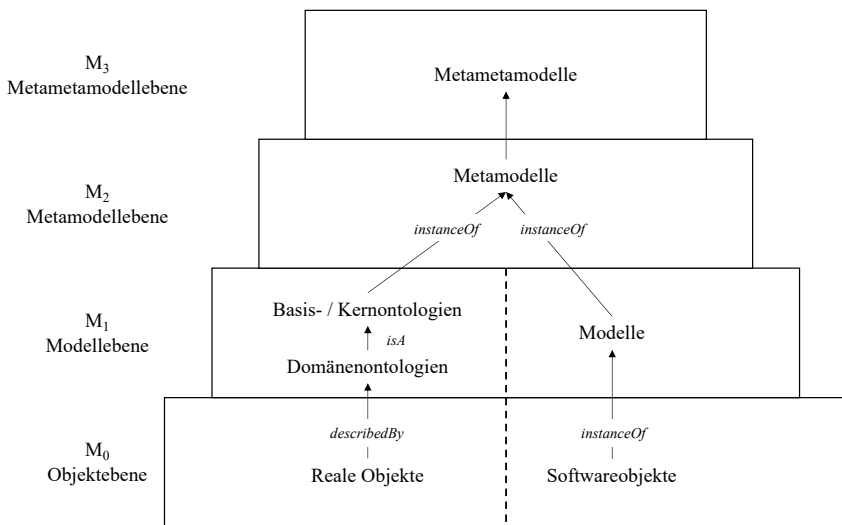


Abbildung 2-7: Einordnung des Ontologiebegriffs in die Metamodel-Pyramide (eigene Abbildung in Anlehnung an Aßmann et al., 2006)

### 2.4.3 Methoden zur Ontologieentwicklung

In der Literatur existieren verschiedene Methoden zur Entwicklung von Ontologien. Einige werden nachfolgend, sortiert nach Erscheinungsdatum, beschrieben. Es werden alle Methoden berücksichtigt, die eindeutige Handlungsanweisungen geben, wie eine Ontologie zu entwickeln ist. Da dieser iterative Prozess meist nicht frei von Subjektivität ist, soll durch eindeutige Handlungsanweisungen der Entwicklungsprozess möglichst zielgerichtet ablaufen.

In Uschold & King (1995) wird eine vierstufige Methodik vorgeschlagen: 1. Zweck der Ontologie identifizieren; 2. Ontologie modellieren; 3. Evaluation; 4. Dokumentation. Der zentrale, zweite Schritt wird in drei weitere Schritte unterteilt: 1. Zentrale Aspekte, Beziehungen und Bezeichnungen des zu modellierenden Systems erfassen; 2. Überführen der Konzeptualisierung in eine formale Beschreibung; 3. Bestehende Ontologien integrieren.

In Grüninger & Fox (1995) wird ebenfalls eine vierstufige Methodik (TOVE<sup>14</sup>) vorgeschlagen: 1. Problembezogene, informelle Fragen definieren, die die Ontologie beantworten soll; 2. Terminologie (Klassen, Attribute und Beziehungen) definieren; 3. Ontologie unter Berücksichtigung der Prädikatenlogik erster Stufe modellieren; 4. Bewertung der Richtigkeit und Vollständigkeit der Ontologie durch Testen mittels der in Schritt 1 definierten Fragen.

In Noy & McGuinness (2000) wird eine siebenstufige Methodik vorgeschlagen: 1. Domäne und Ziel der Ontologie definieren; 2. Bestehende Ontologien auf Wiederverwendbarkeit prüfen; 3. Terminologien festlegen; 4. Klassen und Klassenhierarchie definieren; 5. Attribute der Klassen definieren; 6. Datentypen für Attribute festlegen; 7. Instanzen erzeugen. Die Autoren betonen, dass es keinen objektiv korrekten Weg zur Entwicklung einer Ontologie gibt, da die Modellierung einer Ontologie meist vom Anwendungsfall abhängt und die zuvor genannte Methodik iterativ wiederholt werden sollte.

In Staab et al. (2001) wird eine fünfstufige Methodik vorgeschlagen: 1. Durchführung einer Machbarkeitsstudie, um das Problem und mögliche Lösungen zu identifizieren; 2. Anforderungen, mögliche Inputquellen und grundlegende Taxonomie<sup>15</sup> festlegen; 3. Iterative Verfeinerung und Formalisierung mit Domänenexperten; 4. Evaluation des aktuellen Stands und ggf. Wiederholung der dritten Phase; 5. Verwaltung und Wartung der Ontologie in der Organisation.

In Blomqvist & Öhgren (2008) wird unter Berücksichtigung des Stands der Forschung eine dreistufige Methodik vorgeschlagen: 1. Festlegung der wichtigsten Randbedingungen (z.B. geplante Nutzer, geplanter Nutzen, Zweck und Ziel), des Vokabulars und wiederverwendbarer Ontologien; 2. Entwicklung der Ontologie, wobei Klassen,

---

<sup>14</sup> Toronto Virtual Enterprise (TOVE) (Grüninger & Fox, 1995)

<sup>15</sup> Eine Taxonomie ist eine Beschreibung des Aufbaus eines Sprachsystems durch die Segmentierung und Klassifikation sprachlicher Einheiten in Gruppen und Kategorien. (Koschnik, 1993)

Beziehungen und Attribute iterativ hinzugefügt werden; 3. Evaluierung und Implementierung der Ontologie unter Berücksichtigung der im ersten Schritt festgelegten Ziele.

In Peroni (2017) wird eine dreistufige Methodik vorgeschlagen, die Aspekte der agilen, testgetriebenen Softwareentwicklung berücksichtigt: 1. Sammlung aller Informationen des zu modellierenden Systems, Aufbau einer Ontologie unter Berücksichtigung gängiger Methoden und Formulierung eines Testfalls, um die Ontologie zu testen; 2. Die Ontologie der vorangegangenen Iteration wird mit der aktuellen Iteration zusammengeführt und alle bereits formulierten Testfälle werden erneut getestet; 3. Etwaige Anpassungen an der Terminologie werden vorgenommen, um die Konsistenz der Ontologie zu wahren.

In Abdelghany et al. (2019) wird ebenfalls eine Methodik vorgeschlagen, die an die agile Softwareentwicklung angelehnt ist. Das Vorgehen ist in drei Phasen eingeteilt: In Phase 1 werden das Ziel der Ontologie, zu verwendende Werkzeuge, Quellen und Zielfragestellungen definiert und in einem Backlog gespeichert. In Phase 2 wird die Ontologie entwickelt. Die Entwicklung findet in Form von Sprints statt, die auf Grundlage des Backlogs geplant werden. In Phase 3 wird die Ontologie getestet, implementiert und dokumentiert.

Zusammenfassend gilt festzuhalten, dass es viele Methoden zur Entwicklung einer Ontologie gibt. Je nach Anwendungsfall überwiegen unterschiedliche Vorteile, sodass die Wahl der entsprechenden Methode individuell getroffen werden muss. Der Zweck der zu entwickelnden Ontologie und die Art des Systems sind entscheidend für die Wahl einer Methodik. Die Methode von Noy & McGuinness (2000) beschreibt den Ontologieentwicklungsprozess sehr präzise und ist zugleich leicht verständlich (Li et al., 2016). Diese Methode findet in der Praxis häufig Anwendung (Ameri & Dutta, 2006; Bharti et al., 2021; Usman et al., 2013).

## 2.5 Wissensgraphen

In wissensbasierten Entscheidungsunterstützungssystemen wird die Ähnlichkeit zwischen Elementen mit Ähnlichkeitsmetriken ermittelt, die im Domänenwissen gespeichert sind. Graphbasierte Ansätze bieten vielfältige Möglichkeiten, um mathematische Ähnlichkeitsmetriken zu implementieren und die Informationsrepräsentation bei der strukturellen Fallrepräsentation beim fallbasierten Schließen umzusetzen. Unter Berücksichtigung einer Ontologie, liegt der Einsatz von Wissensgraphen nahe, da für beide Konzepte die Darstellung in Form von Tripeln gängig ist. Wissensgraphen bieten



aufgrund vielfältiger Methoden des maschinellen Lernens ein hohes Potential bei einer automatisierten Implementierung der Problemlösungsmethodik. In Kapitel 2.5.1 werden Wissensgraphen zunächst definiert. Anschließend werden in den Kapiteln 2.5.2 und 2.5.3 die Suche in Wissensgraphen und Möglichkeiten für Analogieschlüsse mit Wissensgraphen erläutert, um die Problemlösungsmethodik fallbasiertes Schließen anzuwenden. In Kapitel 2.5.4 wird aufgezeigt, wie die Validierung eines Wissensgraphen gegenüber einer Ontologie praktisch umgesetzt werden kann.

### 2.5.1 Definition

Wissensgraphen bilden Wissen derart ab, dass Maschinen in der Lage sind, logische Schlussfolgerungen über die Datenbasis zu ziehen. Die Daten sind so strukturiert, dass sie für Maschinen lesbar, gleichzeitig aber für Menschen leicht nachzuvollziehen sind. Nach Hogan et al. (2022) ist ein Wissensgraph wie folgt definiert:

*“A graph of data intended to accumulate and convey knowledge of the real world, whose nodes represent entities of interest and whose edges represent potentially different relations between these entities.”*

In seiner einfachsten Form besteht ein Wissensgraph aus sog. Tripeln (vgl. Abbildung 2-8). Ein Tripel besteht aus zwei Knoten (engl. *head h* und *tail t*), die mit einer gerichteten Kante (engl. *relation r*) verbunden sind. Ein Tripel  $(h, r, t)$  ist als sog. Fakt zu verstehen, indem diese als *Subjekt – Prädikat – Objekt* gelesen werden. Eine Möglichkeit zur formalen Beschreibung sind RDF-Tripel (Vgl. Kapitel 2.4.1). Diese Form der Beschreibung kommt ebenfalls bei Ontologien zum Einsatz, was die Ähnlichkeit beider Konzepte unterstreicht. (Kejriwal, 2019)

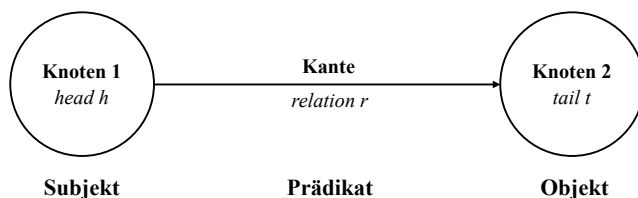


Abbildung 2-8: Ein Tripel  $(h, r, t)$  eines Wissensgraphen besteht aus zwei Knoten (Subjekt und Objekt) und einer gerichteten, beschrifteten Kante (Prädikat) (eigene Abbildung)

Wissensgraphen bieten einige Vorteile in der Speicherung von Wissen, insbesondere gegenüber relationalen oder dokumentenorientierten Datenbanken (Hogan et al., 2022; Kejriwal, 2019):

- Das gespeicherte Wissen und dessen Beziehungen sind durch anschauliche Visualisierung für Menschen intuitiv nachvollziehbar.
- Gleichzeitig sind die Daten ausreichend strukturiert, um für Maschinen verständlich zu sein.
- Durch ein übergeordnetes Domänenmodell wird sichergestellt, dass die Wissensrepräsentation einem konkreten Schema folgt.
- Ontologien und Regeln können für sog. *Reasoning*<sup>16</sup> verwendet werden.
- Methoden des maschinellen Lernens werden zunehmend für Graphen optimiert, wodurch Vorteile hinsichtlich der Rechenzeit erzielt werden.

In Abbildung 2-9 sind exemplarische Ausprägungen gängiger Typen von Wissensgraphen dargestellt.

Ein gerichteter, kantenbeschrifteter Graph (Abbildung 2-9a) besteht aus einer Menge an Knoten (z.B. *wbk*, *KIT* oder *TUM*) und einer Menge an gerichteten, beschrifteten Kanten (z.B. *teilVon*, *austausch* oder *type*). Diese Form eines Wissensgraphen kann im RDF-Format gespeichert werden. Eine gängige Abfragesprache ist SPARQL<sup>17</sup>. (Hogan et al., 2022)

Heterogene Graphen (Abbildung 2-9b) sind grundsätzlich wie gerichtete, kantenbeschriftete Graphen aufgebaut, jedoch wird jedem Knoten ein Typ zugewiesen. Dieser Typ folgt, meist durch Doppelpunkte getrennt, nach der Knotenbeschriftung. Ein Graph wird heterogen genannt, wenn Kanten auch zwischen Knoten unterschiedlicher Typen gezogen werden. (Hogan et al., 2022)

Eigenschaftsgraphen (Abbildung 2-9c) bieten viel Flexibilität bei der Speicherung von Wissen, da für Knoten und Kanten zusätzliche Eigenschaften abgebildet werden können. (Hogan et al., 2022) Diese Form von Graphen wird oft in industrierelevanten

---

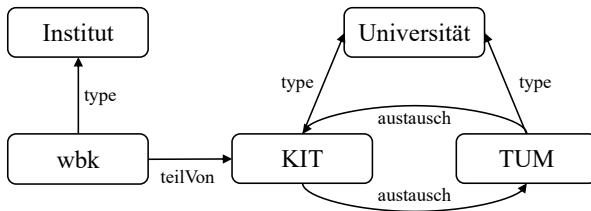
<sup>16</sup> Eine Methode, bei der Logik, Deduktion und Induktion als Werkzeuge eingesetzt werden, um neues Wissen und ein umfassendes Verständnis des Kontextes aus einer Wissensbasis zu gewinnen (Kantorovitch, 2014).

<sup>17</sup> SPARQL Protocol And RDF Query Language (SPARQL) ist eine graphenbasierte Abfragesprache für Abfragen von Inhalten des RDF. (Scherp & Gröner, 2020)

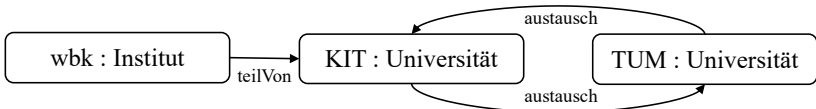
Graphdatenbanken verwendet, wie z.B. *Neo4j*. Die Abfragesprache in *Neo4j* ist *Cypher*. (Barrasa et al., 2021)

Darüber hinaus gibt es weitere, weniger verbreitete Typen, wie z.B. Graph Datasets oder Nested Graphs. (Angles & Gutierrez, 2008)

a) Gerichteter, kantenbeschrifteter Graph



b) Heterogener Graph



c) Eigenschaftsgraph

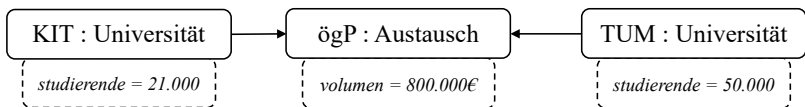


Abbildung 2-9: Beispiele eines (a) gerichteten kantenbeschrifteten Graphen, (b) heterogenen Graphen und (c) Eigenschaftsgraphen<sup>18</sup> (eigene Darstellung in Anlehnung an Hogan et al., 2022)

## 2.5.2 Suche auf Wissensgraphen

Das Ableiten von neuen Fakten<sup>19</sup> aus bereits existierenden Fakten, die in einem Wissensgraphen gespeichert sind, wird *Reasoning* genannt. Es werden dabei Logik,

<sup>18</sup> Die Zahlen für Studierende und Volumen sind fiktiv und dienen lediglich zum allgemeinen Verständnis.

<sup>19</sup> Für die Definition eines Fakts sei auf Kapitel 2.5.1 verwiesen.

Deduktion und Induktion als Werkzeuge eingesetzt. (Kantorovitch, 2014) Dabei werden z.B. plausible Verbindungen zwischen zwei Knoten gesucht, die initial nicht in der Wissensbasis gespeichert sind.

Deduktive Ansätze ziehen Schlussfolgerungen aus bereits vorhandenem Wissen. Bei Wissensgraphen eignet sich eine zugrundeliegende Ontologie, um das Reasoning zu strukturieren. Mit geeigneten Abfragesprachen (z.B. SPARQL) und Suchoperatoren (z.B. *sameAs*, *differentFrom*, *hasValue* oder *subPropertyOf*) werden Fakten aus dem Wissensgraphen extrahiert. Es kommen Regeln für eine Inferenz<sup>20</sup> oder Konzepte der Prädikatenlogik erster Stufe (engl. *First Order Logic*) zum Einsatz. Die Prädikatenlogik erster Stufe beschreibt mathematisch logische Ausdrücke mit verschiedenen Operatoren, wie z.B. Quantoren<sup>21</sup> oder Junktoren<sup>22</sup>. (Hogan et al., 2022; Kreitz & Frank, 2020) Diese Ansätze haben Vorteile hinsichtlich der Interpretierbarkeit, allerdings wird für gute Ergebnisse eine hohe Anzahl genauer Regeln benötigt. Außerdem sind diese Ansätze meist rechenineffizient. (Chen et al., 2020)

Induktive Ansätze können neues, aber nicht zwingend korrektes Wissen erzeugen. Meist geht es um die Vorhersage einer fehlenden Klasse oder einer fehlenden Relation eines Triples; z.B. können für ein Tripel  $(h, r, ?)$  oder  $(?, r, t)$  mögliche *tails*  $t$  oder *heads*  $h$  vorhergesagt werden oder für ein Tripel  $(h, ?, t)$  mögliche Relationen  $r$  zwischen den Instanzen der Klassen  $h$  und  $t$ . (Chen et al., 2020) Die Plausibilität des erzeugten Wissens wird mit einer Unsicherheit bewertet. Diese Ansätze sind geeignet, um Analogieschlüsse aus der Wissensbasis zu generieren. Die Ansätze lassen sich in drei Kategorien gliedern (Hogan et al., 2022):

- Unüberwachte Methoden, z.B. analytische Algorithmen, die die Topologie von Graphen analysieren (sog. Graph Analytics)
- Selbstüberwachte Methoden, z.B. Embeddings (vgl. Kapitel 2.5.3)
- Überwachte Methoden, z.B. Neuronale Graphennetze (engl.: Graph Neural Network)

Überwachte Methoden erlernen eine Funktion (Modell) auf Basis vorab klassifizierter Eingangsdaten (engl. labeling). Das dabei erlernte Modell kann anschließend auf neue,

---

<sup>20</sup> Aufbereitetes Wissen, das aufgrund von logischen Schlussfolgerungen gewonnen wurde. (Nebel & Wöfl, 2020)

<sup>21</sup> Quantoren sind Abkürzungen der Mathematik; insbesondere der Existenzquantor  $\exists$  („Es gibt ein...“) und der Allquantor  $\forall$  („Für alle...“). (Kreitz & Frank, 2020)

<sup>22</sup> Mit Junktoren werden v.a. Aussagen verbunden, wie z.B. mit einem logischen Und  $\wedge$  (Konjunktion) oder einem logischen Oder  $\vee$  (Disjunktion). (Kreitz & Frank, 2020)

nicht klassifizierte Daten angewendet werden. Selbstüberwachte Methoden sind in der Lage, aus einem nicht-klassifizierten Datensatz einen klassifizierten Eingangsdatensatz zu erstellen, der dann einem überwachten Prozess zugeführt wird. Unüberwachte Methoden wenden eine vordefinierte Funktion (meist aus der Statistik) an, um ein Modell zu erlernen. Es werden dabei keine klassifizierte Daten benötigt. (Hogan et al., 2022)

Um Analogieschlüsse aus bestehenden Wissensbasen zu ziehen, eignen sich selbstüberwachte Methoden, wie z.B. Embeddings. Deren Eignung für wissensbasierte Entscheidungsunterstützungssysteme wurde bereits in Veröffentlichungen gezeigt. (Zhang et al., 2016)

### 2.5.3 Analogieschlüsse mit Wissensgraphen

Mittels Embeddings von Wissensgraphen können aus einer Wissensbasis Analogieschlüsse gezogen werden. Sie sind daher geeignet, um das Problemlösungsprinzip des fallbasierten Schließens automatisiert zu implementieren. Es werden entweder

- nicht abgebildete Relationen zwischen zwei Knoten vorhergesagt:  $(h, ?, t)$
- oder für eine Relation und einen Start-/Endknoten mögliche End-/Startknoten vorhergesagt:  $(h, r, ?)$  oder  $(?, r, t)$

Somit können Tripel, die nicht direkt im Wissensgraphen repräsentiert sind, unter Angabe einer Unsicherheit extrahiert werden. Diese Tripel stellen einen Analogieschluss dar. Da diese Analogieschlüsse unter Angabe einer gewissen Unsicherheit gezogen werden, kann nicht unmittelbar davon ausgegangen werden, dass sie richtig sind. Dennoch sind sie, insbesondere bei großen Wissensbasen, oftmals nützlich. (Aamodt & Plaza, 1994; Hogan et al., 2022)

Die algorithmische Implementierung kann mit sog. *Embeddings* durchgeführt werden. Dabei werden Methoden des Maschinellen Lernens verwendet. Ein Embedding ist die Abbildung eines Graphen in einem kontinuierlichen, niedrigdimensionalen Vektorraum. (Hogan et al., 2022) In Abbildung 2-10 ist ein solches Embedding schematisch dargestellt. Durch Anlegen des Vektors der Verbindung  $r$  an einen Knoten 1  $(X_1, Y_1)$  gelangt man zu einem Knoten 2  $(X_2, Y_2)$ .

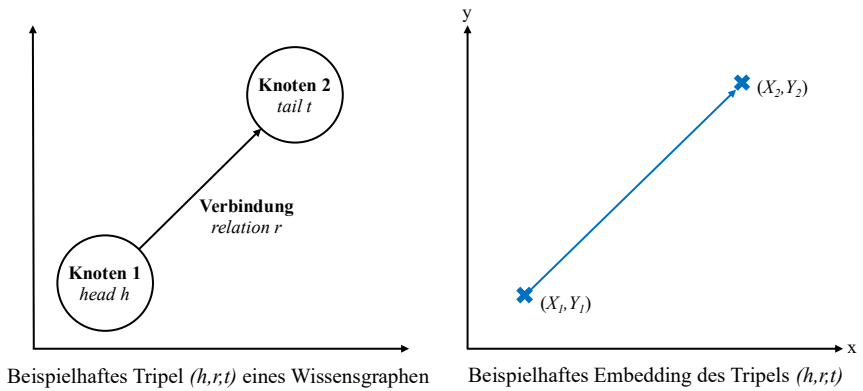


Abbildung 2-10: Beispielhaftes Embedding eines Tripels  $(h, r, t)$  eines Wissensgraphen (eigene Abbildung)

Ein Embedding eines Wissensgraphen besteht i.d.R. aus einem Embedding für Instanzen der Klassen und einem Embedding für Relationen (Abbildung 2-11). Das heißt, die Vektorrepräsentationen der Knoten und Kanten sind in Vektorräumen gespeichert, wobei sich die Relationen jeweils als Verbindung zum Ursprung ergeben. Bei einer Visualisierung des Embeddings für die Instanzen der Klassen lassen sich meist Cluster für ähnliche Instanzen feststellen; d.h. ähnliche Instanzen liegen auch im Vektorraum nah beieinander.

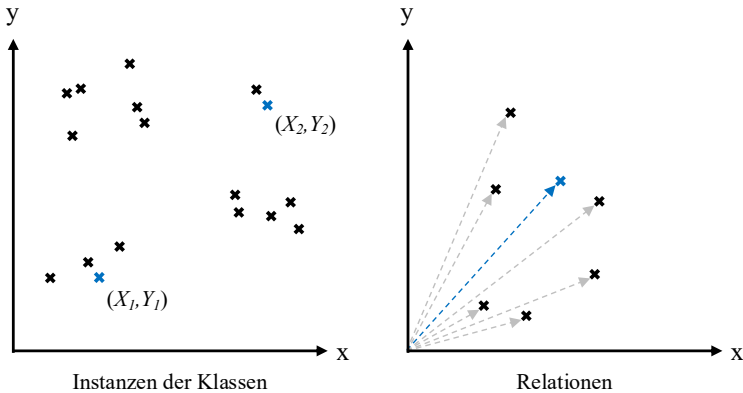


Abbildung 2-11: Exemplarische Darstellung von Embeddings für Instanzen der Klassen und Relationen. Die Knoten und Kanten aus dem vorherigen Beispiel sind blau gekennzeichnet. (eigene Abbildung)

### Modelle und Eigenschaften

Es gibt verschiedene Modelle, die der Berechnung eines Embeddings zugrunde liegen können. Diese Modelle implementieren auf verschiedene Weisen sog. Scoring-Funktionen, die die Plausibilität einer Beziehung zwischen zwei beliebigen Knoten bewerten. Die Modelle lassen sich in drei Kategorien einteilen. Diese Kategorien und beispielhafte Modelle sind in Tabelle 2-2 zusammengefasst. (Chen et al., 2020; Hogan et al., 2022)

Tabelle 2-2: Kategorien von Embeddings von Wissensgraphen mit Beispielmodellen  
(Chen et al., 2020; Hogan et al., 2022)

Kategorie	Beispielmodelle
Geometrische Modelle	TransE, TransH, TransR, TransD, TransA, CrossE, RotateE
Tensor-Dekompositionsmodelle	DistMult, ComplEx, Simple, HoIE, TuckER
Deep Learning Modelle	ConvE, ConvR, CapsE, RSN

Es gibt vier wichtige Eigenschaften, die ein Embedding erfüllen kann. Ob ein Embedding eine der Eigenschaften erfüllt, hängt von der Gestalt der Scoring-Funktion des zugrundeliegenden Modells ab. Die vier Eigenschaften sind in Tabelle 2-3 genannt.

Tabelle 2-3: Eigenschaften von Embeddings nach Chen et al. (2020)

Eigenschaft	Scoring-Funktion
<b>Symmetrie:</b>	$r(h, t) \Rightarrow r(t, h) \forall h, t$
<i>Beispiel: (Mutter, verwandtMit, Kind) <math>\Rightarrow</math> (Kind, verwandtMit, Mutter)</i>	
<b>Asymmetrie:</b>	$r(t, h) \Rightarrow \neg r(h, t) \forall h, t$
<i>Beispiel: (Mutter, mutterVon, Kind) <math>\not\Rightarrow</math> (Kind, mutterVon, Mutter)</i>	
<b>Inversion:</b>	$r_2(h, t) \Rightarrow r_1(t, h)$
<i>Beispiel: (Schüler, schülerVon, Lehrer) <math>\Rightarrow</math> (Lehrer, lehrerVon, Schüler)</i>	
<b>Komposition:</b>	$r_1(x, y) \wedge r_2(y, z) \Rightarrow r_3(x, z) \forall x, y, z$
<i>Beispiel: (Person1, freundVon, Person2) <math>\wedge</math> (Person2, freundVon, Person3) <math>\Rightarrow</math> (Person1, freundVon, Person3)</i>	

Nachfolgend wird je Kategorie ein exemplarisches Modell anhand der Scoring-Funktion und der wichtigsten Vor- und Nachteile erläutert. Für andere Modelle sei auf weiterführende Literatur verwiesen; z.B. Chen et al. (2020) oder Hogan et al. (2022).

Die Scoring-Funktion von *TransE*, als Beispiel eines geometrischen Modells, stellt eine einfache Vektorsumme dar. Es soll der euklidische Abstand zwischen den Punkten  $h$  und  $t$  minimiert werden. Die Scoring-Funktion  $f_r$  ist in Formel 2-3 genannt. Das Ergebnis der Addition des Vektors  $r$  an einen Punkt  $h$  soll möglichst nah an Punkt  $t$  liegen. (Bordes et al., 2013) Das Modell hat Vorteile bei der Rechenzeit, ist allerdings aufgrund der simplen Scoring-Funktion nicht für komplexe Relationen, wie z.B. 1-zu-N oder N-zu-N, geeignet. TransE erfüllt die Eigenschaften Asymmetrie, Inversion und Komposition.<sup>23</sup> (Chen et al., 2020)

$$f_r(h, t) = -\|h + r - t\|_2 \quad 2-3$$

Das Modell *DistMult*, als Beispiel eines Tensor-Dekompositionsmodells, bildet einen Wissensgraphen in einer multidimensionalen Matrix ab. Die Scoring-Funktion  $f_r$  ist in

<sup>23</sup> Die Eigenschaft Symmetrie ist nicht erfüllt, was folgendes Beispiel zeigt: Damit die Eigenschaft Symmetrie erfüllt ist, müsste sowohl  $h + r = t$  als auch  $t + r = h$  gelten. Dies ist allerdings nur für  $r = 0$  erfüllt. Somit ist die Eigenschaft Symmetrie für alle  $r \neq 0$  verletzt. (Nayyeri et al., 2019)



Formel 2-4 genannt. (Yang et al., 2014) Das Modell ist auf diagonale Matrizen limitiert und vergleichsweise wenig komplex ggü. anderen Modellen dieser Klasse. Es erfüllt lediglich die Eigenschaft Symmetrie. (Chen et al., 2020)

$$f_r(h, t) = h^T \text{diag}(r) t = \sum_{i=0}^{d-1} [r]_i * [h]_i * [t]_i \quad 2-4$$

$h^T$  bezeichnet die transponierte Matrix der Matrix  $h$ .  
 $\text{diag}(r)$  bezeichnet eine quadratische Matrix, bei der alle Elemente außerhalb der Hauptdiagonalen Null sind.

Beispiel:  $\text{diag}(1,2,3) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{pmatrix}$

Das Modell *ConvE*, als Beispiel eines Deep Learning Modells, basiert auf Convolutional Neural Networks (CNN). Die Scoring-Funktion ist in Formel 2-5 genannt. Das Modell ist ein Kompromiss aus Rechenaufwand und Aussagekraft von Deep-Learning Modellen. (Dettmers et al., 2018) Je nach Datensatz neigt das Modell schnell zu Überanpassung. Aufgrund mangelnder Nachvollziehbarkeit von CNNs kann keine allgemeingültige Aussage getroffen werden, welche Eigenschaften dieses Modell für einen beliebigen Datensatz erfüllt. (Chen et al., 2020)

$$f_r(h, t) = g(\text{vec}(g(\text{concat}(\bar{e}_h, \bar{r}_r) * w))) M e_t \quad 2-5$$

$g$  bezeichnet eine nicht-lineare Aktivierungsfunktion.  
 $\text{vec}$  bezeichnet die 2D-Darstellung eines Vektors.  
 $\text{concat}$  bezeichnet die Verkettung der Argumente (Matrizen).  
 $e_h$  und  $e_t$  bezeichnen die Embeddings von  $h$  und  $t$ .  
 $r_r$  bezeichnet einen Parameter in Abhängigkeit von  $r$ .  
 $*$  bezeichnet den linearen Faltungsoperator mit einem Filter  $w$ .  
 $M$  bezeichnet eine Matrix, die zur Lineartransformation genutzt wird.

Die Scoring-Funktionen werden auch genutzt, um einen sog. Score für ein vorhergesagtes Tripel anzugeben. Dieser Score ist meist negativ und liegt zwischen 0 und  $-1$ . Mit diesem Score kann die Qualität der Vorhersage bewertet werden. Der Score kann jedoch nicht absolut bewertet werden, da der genaue Wert eines Scores von der Scoring-Funktion und dem zugrundeliegenden Datensatz abhängt. Der Score muss zur Bewertung ins Verhältnis zu der jeweils besten und schlechtesten Vorhersage gesetzt werden. Eine Rückführbarkeit des Scores auf die jeweilige Scoring-Funktion ist nicht möglich.

## Metriken

Um ein Embedding für einen vorliegenden Datensatz zu bewerten, gibt es verschiedene Metriken. Rangbasierte Metriken bewerten die Qualität eines Embeddings auf Basis des Rangs, den eine bestimmte Vorhersage  $q$  in der Menge aller Vorhersagen  $Q$  hat. Aufgrund ihrer einfachen Berechnung werden meist insbesondere *Hits@N*, *Median Rank* (MR) oder *Mean Reciprocal Rank* (MRR) verwendet. (Chen et al., 2020)

*Hits@N* (Formel 2-6) bewertet die Wahrscheinlichkeit, ob eine Vorhersage  $q \in Q$  unter den ersten  $N$  Vorhersagen des Modells ist. Meist wird für  $N$  ein Wert zwischen 1 und 10 gewählt. *Hits@N* sollte möglichst nah an 1 sein. (Chen et al., 2020)

$$\text{Hit@N} = \frac{|\{q \in Q: q < N\}|}{|Q|} \in [0,1] \quad 2-6$$

MR (Formel 2-7) gibt den durchschnittlichen Rang einer Vorhersage  $q$  an. MR sollte möglichst klein sein. (Chen et al., 2020)

$$\text{MR} = \frac{1}{|Q|} \sum_{q \in Q} q \quad 2-7$$

MRR (Formel 2-8) bewertet die Anzahl der korrekten Vorhersagen. Es wird der Durchschnitt über alle wechselseitigen (auch: reziproken) Ränge (engl.: *Reciprocal Ranks*, RR) berechnet. Ist die jeweils erste Vorhersage korrekt, ist RR 1; ist die jeweils zweite Vorhersage korrekt, ist RR  $\frac{1}{2}$ ; ist die jeweils  $n$ -te Vorhersage korrekt, ist RR  $\frac{1}{n}$ . MRR sollte möglichst nah an 1 sein. (Chen et al., 2020)

$$\text{MRR} = \frac{1}{|Q|} \sum_{q \in Q} \frac{1}{q} \in [0,1] \quad 2-8$$

## Hyperparameteroptimierung

Wie bei den meisten Algorithmen für maschinelles Lernen gibt es auch bei der Erstellung von Embeddings Werte, die nicht vom Lernalgorithmus angepasst werden. Aus diesem Grund sollte für eine hohe Modellgüte eine Optimierung der Hyperparameter durchgeführt werden. Dies kann grundsätzlich in Form einer Gittersuche, wobei für alle Wertekombinationen die Modellgüte ermittelt wird, oder einer zufälligen Suche, wobei nur für eine Auswahl der Wertekombinationen die Modellgüte ermittelt wird, erfolgen. (Bauckhage et al., 2020)

Folgende Hyperparameter werden üblicherweise, aber nicht ausschließlich, optimiert (Bauckhage et al., 2020):

- Art des Modells: Geometrisches Modell, Tensor-Dekompositionsmodell, Deep Learning Modell
- Typ der Aktivierungsfunktionen und der Verlustfunktion
- Art und Parameter der Regularisierung
- Parameter des Optimierungsverfahrens, wie z. B. der Typ des Optimierers oder der Lernrate
- Schema zur Veränderung der Lernrate

### 2.5.4 Validierung von Wissensgraphen

Bei der Nutzung von Wissensgraphen muss nicht notwendigerweise ein konkretes Schema vorliegen, nach dem die Daten gespeichert werden. Es können also nahezu beliebige Knoten und Kanten mit entsprechenden Beschreibungen gespeichert werden. Aus diesem Grund sind Konzepte notwendig, mit denen ein Graph hinsichtlich seiner semantischen Richtigkeit bezogen auf eine definierte Form (Ontologie) überprüft werden kann.

Mit sog. *Shape Graphen* (engl. Formgraphen) wird überprüft, ob ein Graph einer definierten Struktur folgt und ob dieser Graph, oder Teile dessen, bestimmte Mindestanforderungen erfüllen. Shape Graphen umfassen eine bestimmte Menge an Knoten und Kanten eines Graphen und definieren für diese Randbedingungen. Shape Graphen können in UML-artigen Klassendiagrammen abgebildet werden. Ein Knoten erfüllt die Form (Shape), wenn alle Randbedingungen erfüllt sind. (Hogan et al., 2022)

Für die Validierung von Wissensgraphen haben sich insbesondere zwei Sprachen etabliert: Shape Expressions (ShEx) und Shapes Constraint Language (SHACL) eignen sich für die Beschreibung und Validierung von RDF-Daten, also insbesondere gerichtete, kantenbeschriftete Graphen. (Hogan et al., 2022) SHACL wurde gezielt entwickelt, um die semantische und technische Interoperabilität von RDF-Daten zu verbessern. SHACL ist vom W3C als Standard anerkannt. Es nutzt sog. *Property Shapes* und *Node Shapes*. Komplexere Bedingungen können über SPARQL- oder JavaScript-Erweiterungen implementiert werden. (Gayo et al., 2018)

## Beispiel

In Quelltext 2-2 ist ein Beispiel einer Instanz in einem Wissensgraphen dargestellt, die eine Person mit dem Namen „*Max Mustermann*“ und dem Alter „42“ repräsentiert. Für diese Instanz sind in Quelltext 2-3 die entsprechende *Node Shape* für den Knoten und in Quelltext 2-4 die entsprechende *Property Shape* für die Eigenschaften gezeigt.

```
PREFIX ex: <http://beispiel-ontologie.com/> .  
  
ex:Max a ex:Person ;  
  ex:name "Max Mustermann" ;  
  ex:age 42 .
```

Quelltext 2-2: Instanz *Person* in RDF (in Anlehnung an Gayo et al., 2018)

In Quelltext 2-3 wird eine *NodeShape* (hier: *PersonShape*) definiert, die zur Klasse *Person* der Beispielontologie gehört. Diese Form legt eine minimale Kardinalität von 1 für *Name* und *Age* fest.

```
PREFIX ex: <http://beispiel-ontologie.com/> .  
PREFIX sh: <http://www.w3.org/ns/shacl#> .  
  
ex:PersonShape a sh:NodeShape ;  
  sh:targetClass ex:Person ;  
  sh:property [  
    sh:path ex:name ;  
    sh:minCount 1 ;  
  ] ;  
  sh:property [  
    sh:path ex:age ;  
    sh:minCount 1 ;  
  ] .
```

Quelltext 2-3: SHACL *NodeShape* für *Person* (in Anlehnung an Gayo et al., 2018)

In Quelltext 2-4 wird eine *PropertyShape* (*AgePropertyShape*) definiert, die zur Eigenschaft *Age* der Beispielontologie gehört. Diese Form legt den Datentyp *integer* und eine Untergrenze von 0 für das Alter definiert.

```
PREFIX ex: <http://beispiel-ontologie.com/> .  
PREFIX sh: <http://www.w3.org/ns/shacl#> .  
  
ex:AgePropertyShape a sh:PropertyShape ;  
  sh:path ex:age ;  
  sh:datatype xsd:integer ;  
  sh:minInclusive 0 .
```

Quelltext 2-4: SHACL *PropertyShape* für *Age* (in Anlehnung an Gayo et al., 2018)

### 3 Stand der Forschung

Im nachfolgenden Kapitel wird der relevante Stand der Forschung für die vorliegende Arbeit dargelegt. In Kapitel 3.1 werden zunächst Anforderungen aufgestellt, die ein Entscheidungsunterstützungssystem für die Auswahl von Messsystemen in unreifen Produktionsprozessen erfüllen muss. In Kapitel 3.2 wird auf Entscheidungsunterstützungssysteme für die Auswahl von Messsystemen eingegangen. In Kapitel 3.3 werden bestehenden Ontologien mit einem Bezug zur Produktions- sowie Fertigungsmesstechnik vorgestellt. In Kapitel 3.4 werden allgemeinere Ansätze betrachtet, die einen Auswahlprozess von Betriebsmitteln in der Produktionstechnik behandeln. In Kapitel 3.5 wird der Stand der Forschung zusammengefasst und ein Forschungsdefizit abgeleitet.

#### 3.1 Anforderungen an ein Entscheidungsunterstützungssystem für die Auswahl von Messsystemen

Bevor der Stand der Forschung, der für diese Arbeit relevant ist, skizziert wird, werden zunächst Anforderungen definiert, die von einer Lösung für die in Kapitel 1.2 beschriebene Zielstellung erfüllt werden müssen:

Die zu schaffende Wissensbasis setzt sich aus Wissen verschiedener Branchen zusammen und wird von Experten mit unterschiedlichen Qualifikationen genutzt (z.B. Applikationsingenieure aus dem Bereich Fertigungsmesstechnik oder Prozessexperten der jeweiligen Anwendung). Um eine Interoperabilität zwischen den verschiedenen Domänen und Anwendern zu gewährleisten, soll die Modellierung der Wissensbasis einer **Ontologie** folgen. Diese Ontologie enthält das Domänenwissen, das für das wissensbasierte Entscheidungsunterstützungssystem notwendig ist.

Zwei Anforderungen, die ein Entscheidungsunterstützungssystem erfüllen soll, sind Neuheit und Serendipität (Aggarwal, 2016). Das heißt, die getroffenen Empfehlungen sollen für einen Nutzer neu und unerwartet/überraschend, also nicht offensichtlich, sein. Die Generierung solcher Empfehlungen ist bei kleinen initialen Wissensbasen, wie sie insbesondere bei unreifen Produktionsprozessen vorliegen, jedoch schwierig. (Middleton et al., 2009) Daher soll das Entscheidungsunterstützungssystem in der Lage sein, durch **Analogieschlüsse** aus anderen Branchen und Anwendungen geeignete Empfehlungen zu treffen. Es soll ferner in der Lage sein zu bewerten, wie wahrscheinlich die Empfehlungen tatsächlich geeignet sind, um die Nachvollziehbarkeit der Empfehlungen für den Nutzer des Systems sicherzustellen.

Mit zunehmender Größe der Wissensbasis steigt auch die Größe des Lösungsraums und die Komplexität der Entscheidungsfindung. Darüber hinaus sind die Methoden zur Generierung von Analogieschlüssen und zur Validierung der Wissensbasis, die iterativ angewendet werden, rechenintensiv. (Chen et al., 2020) Es ist daher eine **automatisierte** Umsetzung des Entscheidungsunterstützungssystems notwendig. Auf diese Weise ist das System auch für Anwender ohne Expertenwissen nutzbar.

Durch eine Erweiterung der Datenbasis, in Form neuer Messsysteme, Messaufgaben oder deren jeweils beschreibenden Eigenschaften, soll eine Verbesserung der Entscheidungsfindung des Entscheidungsunterstützungssystems erzielt werden. Hierfür soll das System **lernfähig** sein.

Abschließend soll die Entscheidung des Entscheidungsunterstützungssystems **nachvollziehbar** sein, damit die Eignung eines vorgeschlagenen Messsystems durch einen Experten für die jeweilige Anwendung bewertet werden kann. Hierfür soll ein Fall entsprechend der Fallrepräsentation beim fallbasierten Schließen mit einem Qualitätsmaß dargestellt werden. Dadurch wird nicht zuletzt auch der Akzeptanzproblematik, mit denen Blackbox-Modelle meist konfrontiert sind, begegnet (Hoffmann et al., 2021).

Zusammenfassend soll die entwickelte Lösung also folgende Anforderungen erfüllen:

1. Eine **Ontologie** ist die Voraussetzung zur Wissensspeicherung und -extraktion sowie der Entwicklung des Entscheidungsunterstützungssystems.
2. Durch **Analogieschlüsse** werden neue, nicht offensichtliche Empfehlungen generiert.
3. Mittels einer **Automatisierung** des Systems ist sichergestellt, dass auch Anwender ohne Expertenwissen das System nutzen können.
4. Durch die **Lernfähigkeit** des Systems kann der Empfehlungsalgorithmus stetig verbessert werden.
5. Die **Nachvollziehbarkeit** der Empfehlungen ist Voraussetzung für die Akzeptanz des Systems.

Die bestehenden Ansätze im Stand der Forschung werden nachfolgend an diesen Anforderungen gemessen und abschließend hinsichtlich des Erfüllungsgrads evaluiert (s. Tabelle 3-1).

### 3.2 Ansätze zur Auswahl von Messsystemen

In Maropoulos et al. (2008) wird ein generisches Vorgehensmodell für die Definition messtechnischer Prozessmodelle vorgestellt, das in der Bauteilkonstruktion und -montageplanung eingesetzt werden soll. Der Ansatz beschränkt sich dabei auf großvolumige Bauteile, die z.B. in der Luft- und Raumfahrt vorkommen. In einem ersten Schritt werden das zugrundeliegende Problem und die Rahmenbedingungen simulationsgestützt definiert. In einem zweiten Schritt findet ein sog. *Metrologie-Prozessmodell* Anwendung; dieses Modell beinhaltet: Messbarkeitsanalyse, Messplanung mit integrierter Toleranz- und Montageplanung, Einsatz von Messgeräten und messtechnisch unterstützte Montageautomation. Das Ziel ist es, die automatisierte Montage durch den Einsatz von Messsystemen zu verbessern. Der Auswahlprozess von Messsystemen wird nicht detaillierter ausgeführt. Eine Implementierung des Modells wird ebenfalls nicht durchgeführt. Die Anforderungen Ontologie, Analogieschlüsse, Automatisierbarkeit und Lernfähigkeit sind nicht erfüllt.

In Muelaner et al. (2010) wird ein Vorgehen vorgestellt, bei dem die Auswahl der zu verwendenden Messsysteme in der Bauteilkonstruktion berücksichtigt werden soll. Das Vorgehen findet in drei Schritten statt: als erstes werden die wichtigsten Eigenschaften für typische Messsysteme skizziert; als zweites werden diese Eigenschaften modelliert, sodass sie quantifiziert werden können; als drittes wird ein Messsystem ausgewählt. Die Eigenschaften, die im ersten Schritt gesammelt werden, umfassen u.a. die Dimensionen der Messung, die Zugänglichkeit zum Messobjekt, Toleranzen, Anzahl benötigter Messungen, zur Verfügung stehende Messzeit, Umgebungsbedingungen, Freiheitsgrade, Kosten und TRL. Die Auswahl im dritten Schritt erfolgt entweder über eine binäre Entscheidung der Eignung des Messsystems oder über einen sog. Fähigkeitsindex. Für die binäre Entscheidung werden in Tabellen sämtliche Eigenschaften der Messsysteme und Prozesse gespeichert und über die Auswahl über eine Filterung vorgenommen. Der Fähigkeitsindex wird auf Basis der „Goldenen Regel der Messtechnik“<sup>24</sup> für jedes Messsystem in Abhängigkeit des zugrundeliegenden Prozesses berechnet. Die Autoren validieren das Vorgehen in Form einer relationalen Datenbank mit zwei Tabellen für Messprozessspezifikationen und Messsystemeigenschaften, in denen jeweils Filter angewendet werden. Eine konkrete Umsetzung in anwenderorientierte Software wird

---

<sup>24</sup> Die Goldene Regel der Messtechnik besagt, dass die Unsicherheit eines Messmittels ein Zehntel der Toleranz nicht überschreiten soll (Keferstein et al., 2018; Linß, 2021).

nicht durchgeführt, allerdings kann das Vorgehen als teilautomatisiert bezeichnet werden. Der Ansatz weist keine Ontologie, Möglichkeiten für Analogieschlüsse oder Lernfähigkeit auf.

In Toteva et al. (2014) werden Kriterien genannt, die für die Auswahl eines Messsystems ausschlaggebend sind. Diese sind in fünf Kategorien gegliedert: Messaufgabe (darunter u.a. Messobjekt und Dokumentation), Organisation (darunter u.a. zur Verfügung stehende Messsysteme und Fachpersonal), Kosten (darunter u.a. Lohn-, Schulungs- und Wartungskosten), Ausgangsdaten (darunter u.a. Standards, Regularien, Sicherheitsbestimmungen und Kundenanforderungen) und Weitere (darunter u.a. Umgebungsbedingungen, Zeit und Automatisierungsgrad). Im Anschluss werden verschiedene Ansätze zur Auswahl eines Messsystems skizziert; z.B. auf Basis der geforderten Genauigkeit, der Messunsicherheit, Fähigkeitsindizes oder Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen. Eine Implementierung oder Validierung eines Verfahrens erfolgt nicht.

In Tang & Chen (2015) wird ein computergestütztes Verfahren zur Einsatzplanung von Messgeräten vorgestellt, das durch Digitalisierung und Automatisierung von Erfahrungswissen, Regulatorien, Equipment und historischen Daten die Genauigkeit und Effizienz von Messungen verbessern und Kosten senken soll. Hierfür wird ein multidimensionales Modell vorgeschlagen, das Daten und Eigenschaften in drei Dimensionen berücksichtigt: Eigenschaften des Messsystems (z.B. Genauigkeit, Kosten und Zeit), des Prozesses (z.B. Messplan, Bediener und Algorithmus) und der physischen Umgebung (z.B. Messobjekt und Umgebungsbedingungen). Die Attribute der Dimensionen werden in Form von Entity-Relationship-Modellen abgebildet. Die Eignung eines Messsystems für eine neue Messaufgabe wird mit einer multidimensionalen Merkmalsmatrix bewertet, in der alle Attribute der drei Dimensionen quantifiziert werden. Auf Basis der Matrix wird ein Fähigkeitsindex berechnet. Der vorgestellte Ansatz implementiert keine zugrundeliegende Datenbank und kann somit kein konkretes Messsystem vorschlagen, historische Daten berücksichtigen oder lernfähig umgesetzt werden. Eine Ontologie wurde nicht entwickelt oder berücksichtigt.

In Kincaid & Pollock (2017) wird ein virtueller Assistent beschrieben, der in mehrstufigen Abfragen durch Beantwortung von Fragen in natürlicher Sprache (engl.: Natural Language Processing, kurz: NLP) eine Verfeinerung der Auswahl von Prüf- und Messgeräten ermöglicht. Dabei wurde die Möglichkeit zur Implementierung einer Ontologie für Messsysteme und deren Eigenschaften geprüft, um Reasoning zu ermöglichen. Eine Nutzereingabe wird von einem domänenspezifischen Sprachmodell analysiert, in eine



SPARQL-Query überführt, die Anfrage an die Datenbank gestellt und die Ergebnisse an den Nutzer zurückgegeben. Der Fokus der Arbeit liegt auf Entwicklung eines domänenspezifischem Assistenzsystems, das eine Anfrage iterativ verfeinern kann und eine Spracheingabe unterstützt. Aus diesem Grund ist die vorgestellte Ontologie sehr generisch. Eine Modellierung von Messsystemen oder Messaufgaben wurde nicht vorgenommen. Diese Arbeit zeigt die Eignung von graphbasierten Ansätzen für die Auswahl von Messsystemen auf Basis von Nutzereingaben zu einer Messaufgabe. Die Möglichkeit Analogieschlüsse zu ziehen wurde von den Autoren nicht gezeigt; es wird jedoch davon ausgegangen, dass dies aufgrund der Anwendung graphbasierter Ansätze möglich ist. Dafür ist u.U. jedoch eine Weiterentwicklung der Ontologie und des Empfehlungsalgorithmus notwendig.

In Feng et al. (2017) wird ein Aktivitätsmodell für dimensionale Messungen beschrieben, um festzulegen, welches Messsystem genutzt und wie dieses eingesetzt werden soll. Die Wahl des Messsystems berücksichtigt u.a. geometrische Charakteristika und Toleranzen. Für den Einsatz der Fertigungsmesstechnik werden Messstrategie und etwaiges Zubehör konkretisiert. Bedienerfähigkeiten, Taktzeiten und der Integrationsgrad der Messtechnik werden explizit aus der Betrachtung ausgeschlossen. Das Ziel des Ansatzes ist die Entwicklung von Regeln für die Auswahl von Messsystemen und Konformitätsentscheidungen. Der Ansatz ist regelbasiert und kann, auch wenn in dieser Arbeit nicht umgesetzt, teilautomatisiert werden. Die Nachvollziehbarkeit ist durch die Darstellung von Aktivitäten und Informationsflüssen gegeben.

In Stepanov et al. (2020) wird vorgeschlagen, relationale Datenbanken für die Speicherung der Informationen über Fertigungsmesstechnik und ein Verwaltungssystem zu verwenden. Das System besteht aus: Tabellen für die Speicherung von Daten; Datenbankabfragen; Formulare für einfache Eingaben, Ansicht und Bearbeitung von Daten; Zugriff auf die Datenbank von einer Webseite. In der Tabelle für Messsysteme sind u.a. die gemessene Größe, das Messverfahren, das Modell und der Preis eines Messsystems gespeichert. Die Auswahl eines Messsystems erfolgt durch die Anwendung von Filtern in der Tabelle. Die Implementierung des Systems erfolgte mit MS Access und der Programmiersprache Visual Basic. Datenbankabfragen basierten auf SQL. Es wurden zwei miteinander verbundene Tabellen verwendet: *Messsysteme* und *Technische Merkmale*. Der vorgestellte Ansatz kann konkrete Messsysteme automatisiert vorschlagen, allerdings liegen für relationale Datenbanken typische Nachteile vor. So kann die Wahl nicht nachvollzogen werden. Darüber hinaus ist das System nicht lernfähig. Eine

Ontologie wurde nicht entwickelt oder berücksichtigt; insofern ist die Generierung von Analogieschlüssen ohne grundlegende Anpassungen des Ansatzes nicht möglich.

### **Zwischenfazit**

Die vorgestellten Ansätze, die einen Auswahlprozess für Messsysteme betrachten, erfüllen nicht die eingangs gestellten Anforderungen für das Forschungsziel dieser Arbeit. Es gibt bereits einige Ansätze, die automatisierte Systeme entwickeln, deren Empfehlungen z.T. auch nachvollziehbar sind. Es fehlen allerdings sowohl Ansätze, die eine Ontologie für die Domäne dieser Arbeit implementieren als auch Ansätze, die Analogieschlüsse und Lernfähigkeit ermöglichen. Daher wird die Betrachtung im Folgenden speziell auf Ontologien in der Produktionstechnik und auf Ansätze, die fallbasiertes Schließen für Betriebsmittel in der Produktionstechnik implementieren (dadurch Analogieschlüsse und Lernfähigkeit), erweitert.

### **3.3 Ontologien in der Produktionstechnik**

Im Folgenden werden Ontologien in der Produktionstechnik und deren Bezug zur Fertigungsmesstechnik betrachtet. Im Fokus dieser Veröffentlichungen stehen die Ontologien. Sofern nicht anders gekennzeichnet wird davon ausgegangen, dass keine Anwendung in einem Entscheidungsunterstützungssystem gezeigt wird. Ist dies der Fall, sind die Anforderungen Analogieschluss, Automatisierbarkeit, Lernfähigkeit und Nachvollziehbarkeit nicht erfüllt.

In Schlenoff et al. (2000) wird eine Ontologie (engl.: *Process Specification Language*, kurz: PSL) für den Informationsaustausch zwischen verschiedenen Prozessen der Produktionstechnik, wie z.B. der Prozessmodellierung, Simulation und Steuerung, vorgestellt. Ziel ist es, Interoperabilität zwischen verschiedenen Systemen und Anwendungen in der Produktionstechnik herzustellen. PSL besteht aus zwei Teilen: *PSL-Core* und eine Reihe von Erweiterungen. Die Grundlage von PSL-Core bilden vier Konzepte: Aktivitäten (engl.: *Activities*), Aktivitätsereignisse (engl.: *Activity Occurrences*), Zeitpunkte (engl.: *Time Points*) und Objekte (engl.: *Objects*).

In Vegetti et al. (2005) wird eine Ontologie (engl.: *PRoduct ONTOlogy*, kurz PRONTO) für die Modellierung komplexer Produkte und produktbezogene Planungsmaßnahmen vorgestellt. Die Ontologie berücksichtigt Einflüsse entlang des Produktentstehungsprozesses (z.B. Produktion, Logistik und Verkauf), jedoch überwiegt der Einfluss der

Produktentwicklung. Die Ontologie ist nicht zur Modellierung von Prozessen oder Ressourcen geeignet.

In Ameri & Dutta (2006) wird eine Ontologie (engl.: *Manufacturing Service Description Language*, kurz: MSDL) für Fertigungsdienstleistungen in der Produktionstechnik vorgeschlagen. Dienstleistungen nutzen dabei Prozesse (z.B. Drehen, Bohren oder Fräsen), die auf Ressourcen (z.B. Arbeitsstationen, Maschinen, Werkzeuge oder Vorrichtungen) zurückgreifen. Ein beispielhafter Prozess kann eine Messaufgabe sein; eine beispielhafte Ressource kann ein Messsystem sein. Eine Konkretisierung der Klassen *Prozess* und *Ressource* durch konkretisierende Eigenschaften wird nicht vorgenommen. Bei der Entwicklung der Ontologie wurde berücksichtigt, dass diese in nachfolgenden Arbeiten automatisiert in Anwendungen implementiert werden kann.

In Lemaignan et al. (2006) wird eine allgemeine Ontologie für die Produktionstechnik (engl.: *MANufacturing's Semantics ONtology*, kurz: MASON) vorgeschlagen. Die Ontologie baut auf drei Kernkonzepten auf: Entitäten (engl.: *entities*), Operationen (engl.: *operations*) und Ressourcen (engl.: *resources*). Entitäten dienen der Beschreibung eines Produkts und umfassen z.B. geometrische Merkmale, Materialien, Montageanweisungen oder Kosten. Operationen beschreiben den Prozess, z.B. Bearbeitungsschritte oder Logistikprozesse. Ressourcen umfassen alle in der Produktion benötigten Ressourcen, z.B. Maschinen, Werkzeuge, Menschen oder ganze Werke. Eine beispielhafte Operation kann eine Messaufgabe sein; eine beispielhafte Ressource kann ein spezifisches Messsystem sein. Eine für Messsysteme und Messaufgaben relevante Konkretisierung der Klassen *Operation* und *Ressource* wird nicht vorgenommen. Es werden zwei beispielhaften Anwendungen zur Kostenberechnung und einem Multiagentensystem für die Fertigungssimulation gezeigt, die größtenteils automatisiert funktionieren. Die Entscheidungsunterstützungssysteme sind allerdings nicht fallbasiert, sodass Analogieschlüsse und Lernfähigkeit nicht gegeben sind.

In Lin & Harding (2007) wird eine Ontologie (engl.: *Manufacturing System Engineering*, kurz: MSE) vorgestellt, um die Kommunikation und den Informationsaustausch in unternehmensübergreifenden, multidisziplinären Konstruktionsteams zu erleichtern. Die Kernkonzepte dieser Ontologie sind: Erweitertes Unternehmen (engl.: *Extended Enterprise*), Projekt (engl.: *Project*), Fluss (engl.: *Flow*), Unternehmen (engl.: *Enterprise*), Prozess (engl.: *Process*), Ressource (engl.: *Resource*) und Strategie (engl.: *Strategy*). Prozesse und Ressourcen beinhalten jeweils die Unterklassen Produktionsprozesse (darunter u.a. Qualitätssicherungsprozesse) und -ressourcen

(darunter u.a. Maschinen und Werkzeuge). Qualitätssicherungsprozesse werden nicht mit weiteren Unterklassen konkretisiert. Es wird ein beispielhaftes Anwendersystem gezeigt, um die Zusammenarbeit in Teams durch den Einsatz einer einheitlichen Terminologie zu verbessern. Dieses System erfüllt jedoch lediglich die Anforderung Automatisierung zu Teilen.

In Borgo & Leitão (2007) wird eine Ontologie (engl.: *ADaptive holonic COntrol aRchitecture for distributed manufacturing systems*, kurz: ADACOR) am Beispiel der Fertigungsplanung und -steuerung vorgestellt. Die Kernkonzepte der Ontologie sind: Produkte, Operationen, Ressourcen und Produktionsreihenfolgen. Ressourcen sind bspw. Transporteinrichtungen, Werkzeuge oder Greifer. Ressourcen sind darüber hinaus Störungen zugeordnet, was den Fokus der Ontologie auf die Steuerung von Fertigungsprozessen verdeutlicht.

In Usman et al. (2011) (engl.: *Manufacturing Core Concepts Ontology*, kurz: MCCO) und Usman et al. (2013) (engl.: *Manufacturing Reference Ontology*, kurz: MRO) werden Ontologien vorgeschlagen, um die Interoperabilität zwischen den Bereichen Produktion und Design des Produktlebenszyklus zu verbessern. Die Kernkonzepte von MCCO sind: Produktionsressource (engl.: *ManufacturingResource*), Produktionsprozess (engl.: *ManufacturingProcess*), Produktionsstätte (engl.: *ManufacturingFacility*), Merkmal (engl.: *Feature*), Teilefamilie (engl.: *PartFamily*), Teileversion (engl.: *PartVersion*) und gefertigtes Teil (engl.: *RealisedPart*). Teil der Produktionsressourcen sind *Maschinen und Werkzeuge*, worunter auch Messsysteme fallen kann. MRO basiert auf MCCO und nimmt weitere Formalisierungen (u.a. in Form von Axiomen) vor. Es wurde eine Implementierung am Beispiel der Luftfahrtindustrie gezeigt; die Autoren halten dabei jedoch fest, dass die Ontologie für ein Anwendersystem noch weiterentwickelt werden muss und eine geeignete Benutzeroberfläche notwendig ist, um die Ontologie nutzbarer zur Verfügung zu stellen.

In Panetto et al. (2012) wird eine Ontologie (engl.: *ONTOlogy for Product Data Management*, kurz: ONTO-PDM) zur Erleichterung der Interoperabilität von Systemen in einer Fertigungsumgebung und dem Produktdatenmanagement unter Berücksichtigung der Normen IEC 62264 und ISO 10303 vorgestellt. Die Ontologie ist umfassend mit einem starken Fokus auf die Produktsicht. In einer kurzen Fallstudie wurde eine Anwendung der Ontologie am Beispiel von zwei Produktionsstandorten gezeigt. Details zur Anwendung gehen aus der Fallstudie nicht hervor.

In Ahmad et al. (2018) wird eine Ontologie (engl.: *Product, Process, and Resource (PPR) Ontology*, kurz: OP-PR) zur Unterstützung der Wandlungsfähigkeit, Rekonfigurierbarkeit und Flexibilität von Produktionssystemen durch Informationsintegration und Wissensgenerierung vorgestellt. Die modular aufgebaute Ontologie besteht aus drei Subontologien für Produkt, Prozess und Ressource. Die Ressourcen-Domäne sieht eine Klasse *Sensor* vor, die jedoch nicht konkreter modelliert wird. Von der Ressourcen-Domäne besteht eine Verbindung zur Prozess-Domäne und der darin enthaltenen Klasse *Aufgabe* (engl. *Task*). Eine beispielhafte Aufgabe kann eine Messaufgabe sein. Am Beispiel einer automatisierten Station einer Motorenmontage wurden mittels der Ontologie geeignete Betriebsmittel anhand gegebener Produkt- und Prozessspezifikationen ermittelt. Die Auswahl erfolgte laut der Autoren durch die automatisierte Externalisierung von implizitem Wissen in explizites Wissen. Dieses Vorgehen kann für Analogieschlüsse weiterentwickelt werden, allerdings basiert das System grundsätzlich nicht auf einem fallbasierten Entscheidungssystemansatz.

In Haller et al. (2019) wird eine Ontologie (engl.: *Semantic Sensor Network Ontology*, kurz: SSN) veröffentlicht. Sie besteht aus der übergeordneten Ontologie SSN und der Kernontologie SOSA (engl.: *Sensor, Observation, Sample, and Actuator*). Die Ontologien sind ein Standard des W3C zur Beschreibung von Sensoren und ihren Beobachtungen, den damit verbundenen Verfahren, den untersuchten Merkmale, den dafür verwendeten Proben und den beobachteten Eigenschaften sowie den Akteuren.

In Maksimov et al. (2020) wird eine Ontologie (engl.: *Ontology of properties and units of measurement*, in dieser Arbeit kurz: OPUA) für die automatische Extraktion von Eigenschaften, Werten und Einheiten aus Texten vorgestellt. Dabei werden unterschiedliche Schreibweisen und Bedeutungen berücksichtigt, die die automatische Extraktion erschweren. In der Ontologie wird eine Messeinheit (engl.: *Unit of Measurement*) durch eine Zeit, einen Ort, einen Multiplikator und eine SI-Einheit definiert; ein Messinstrument (engl.: *Measuring instrument*) wird durch eine Methode, einen Maßstab, eine Genauigkeit und Umgebungsbedingungen definiert. Der Ansatz geht nicht über die Betrachtung der genannten Elemente hinaus. In einem Anwendungsbeispiel wird die grundsätzliche Funktionsweise gezeigt; die Methoden orientieren sich stark an Methoden zur Verarbeitung natürlicher Sprache. Der Ansatz ist nicht für die Implementierung in einem Entscheidungsunterstützungssystem entwickelt.

In Hippolyte et al. (2021) wird eine Ontologie (engl.: *domain-agnostic measurement ontology*, kurz: DAMO) für eine Beschreibung von Daten in der Metrologie vorgestellt,

um einen einheitlichen Wissensaustausch von Messergebnissen zu ermöglichen. Für Messdaten soll dadurch das FAIR<sup>25</sup>-Prinzip realisiert werden. Bei der Entwicklung von DAMO wurden u.a. die Ontologien OBOE<sup>26</sup> und QUDT<sup>27</sup> berücksichtigt, die einen Bezug zur Metrologie aufweisen. DAMO besteht aus verteilten Ontologien; eine Messung wird durch die Klassen Einheit (engl.: *Unit*), Beobachtung (engl.: *Observation*), Protokoll (engl.: *Protocol*), Messwert (engl.: *Measurement Value*), Standard (engl.: *Standard*), Experiment (engl.: *Experiment*) und Agent (engl.: *Agent*) definiert. Eine Modellierung von Messsystemen, o.ä. Ressourcen wird nicht vorgenommen.

In Bharti et al. (2021) wird eine Ontologie zur Modellierung der Messunsicherheit von Messergebnissen am Beispiel von taktilen Koordinatenmessgeräten vorgestellt (in dieser Arbeit kurz: OMU). Die Ontologie soll die Bewertung von Messungen, durch eine einheitliche Beschreibung der Messunsicherheit und damit einhergehender Metadaten nach dem FAIR-Prinzip, vereinfachen. Es werden u.a. die Klassen Messsystem (engl. *Measurement System*), Messgerät (engl. *Measurement Instrument*), Messergebnis (engl. *Measurement Result*), Messplanung (engl. *Measurement Planning*), Messobjekt (engl. *Measured Artefact*), Unsicherheit (engl. *Uncertainty*) und Analyse und Dokumentation (engl. *Analysis and Documentation*) modelliert. Der Fokus liegt auf der Modellierung der Unsicherheit und der relevanten Komponenten nach GUM (JCGM, 2008). Es wurden potenzielle Anwendungsfälle diskutiert, aber nicht umgesetzt. Die Ontologie beschreibt die genannten Elemente sehr detailliert, allerdings fehlen viele Elemente, die für den Anwendungsfall dieser Arbeit wichtig sind (z.B. Messaufgaben und Möglichkeiten Analogieschlüsse zu ziehen).

In Pfrommer et al. (2022) wird eine Ontologie für Remanufacturingsysteme (in dieser Arbeit kurz: OREMAN) vorgestellt, die die Anpassungsfähigkeit des Produktionssystems an verschiedene Produktvarianten und -zustände bei der Wiederaufbereitung von gebrauchten Produkten ermöglichen soll. Der Aufbau der Ontologie folgt dem PPR-Modell und besteht aus sechs einzelnen Ontologien für: Produkt (engl.: *Product*), Prozess (engl.: *Process*), Ressource (engl. *Resource*), Aufgabe (engl.: *Task*), Fähigkeit (engl.: *Capability*) und Operation (engl.: *Operation*). Die Subontologie *Aufgabe* setzt

---

<sup>25</sup> FAIR-Prinzip: *Findable, Accessible, Interoperable and Reusable* (deutsch: Auffindbarkeit, Zugänglichkeit, Interoperabilität und Wiederverwendbarkeit) (Hippolyte et al., 2021)

<sup>26</sup> *Extensible Observation Ontology* (OBOE), unter: <http://ecoinformatics.org/oboe/oboe.1.2/>, zuletzt aufgerufen am: 15.03.2023

<sup>27</sup> *Quantity, Unit, Dimension and Type* (QUDT), unter: <http://qudt.org/schema/qudt/>, zuletzt aufgerufen am: 15.03.2023

sich aus Konzepten der Ontologien *Produkt* und *Prozess* zusammen; die Subontologie *Fähigkeit* aus Konzepten der Ontologien *Prozess* und *Ressource*; die Subontologie *Operation* aus Konzepten der Ontologien *Aufgabe* und *Fähigkeit*. In der Ontologie *Prozess* werden Inspektionen (mittels Messsystemen) vorgesehen, die sich auf Prozesse des Remanufacturings beziehen. In der Ontologie *Ressourcen* werden alle Betriebsmittel auf dem Shopfloor, wie z.B. Maschinen oder Logistikequipment, berücksichtigt. Darunter fallen auch Messsysteme. Die hierarchische Struktur dieser Ontologie bietet vielfältige Möglichkeiten zur modularen Erweiterung. Neben dem genannten Anwendungsfall des Remanufacturings werden keine weiteren Anwendungsbeispiele genannt oder angewendet.

In Rijgersberg et al. (2023) wird eine Ontologie (engl.: *Ontology of units of Measure*, kurz: OM2) für die Verwendung in wissenschaftlicher Forschung veröffentlicht. Die Ontologie fokussiert sich insbesondere auf die Modellierung von Einheiten, Mengen, Messungen und Dimensionen für eine branchenunabhängige Anwendbarkeit.

### **3.4 Fallbasiertes Schließen für Betriebsmittel in der Produktionstechnik**

Fallbasiertes Schließen wird in verschiedenen Branchen erfolgreich angewandt: u.a. in der Medizin (Entscheidungsunterstützung bei Operationen (Katić et al., 2016, 2017; Schmidt et al., 2001)), in der Automobilindustrie (Situationsklassifizierung für autonomes Fahren (Vacek et al., 2007a, 2007b)), für die Notfallplanung (Reaktion auf U-Bahn-Unfälle (Hongliang & Zhenhai, 2020)) und der Produktentwicklung bzw. Produktionstechnik (Auswahl von Prozessequipment (Virkki-Hatakka et al., 1997), Herstellungsprozessen (Mabkhot et al., 2019) oder Werkzeugen (Chakraborty & Boral, 2017)). Nachfolgend werden die relevanten Ansätze im Bereich der Produktionstechnik skizziert, deren methodischen Grundlagen fallbasiertes Schließen beinhalten.

In Virkki-Hatakka et al. (1997) wurde untersucht, wie bei fallbasiertem Schließen für Prozessequipment die Suche nach ähnlichen Fällen automatisiert werden kann, um die Qualität der Suche zu verbessern. Aufgrund unterschiedlicher Datentypen, darunter numerische und textuelle Daten, und begrenzter Möglichkeiten zur Computerunterstützung erfolgt die Ähnlichkeitsberechnung mittels mathematischer Distanzfunktionen und Fuzzy-Logik. Es werden jeweils die fünf ähnlichsten Fälle als Ergebnis der Suche ausgegeben. Ein gelernter Fall wird am Ende in der Fallbasis gespeichert. Die Umsetzung erfolgt mittels eines Tabellenkalkulationsprogramms (ähnlich zu Microsoft Excel). Die

technische Umsetzung entspricht nicht mehr dem aktuellen Stand der Technik, allerdings zeigen die Autoren die Vorteile einer verifizierten, qualitativ hochwertigen Wissensbasis auf, die mit einer Automatisierung des Auswahlprozesses einhergeht.

In Chakraborty & Boral (2017) wird ein Ansatz für die Auswahl von Werkzeugen in CNC-Maschinen auf Basis von fallbasiertem Schließen vorgestellt. Um hohe Qualitäten bei der CNC-Bearbeitung von Produkten zu erreichen, ist je nach Bearbeitungsschritt spezielles Werkzeug notwendig. Aufgrund immer kleiner werdender Losgrößen muss die Auswahl des richtigen Werkzeugs immer häufiger getroffen werden. Die falsche Auswahl eines Werkzeugs kann zu geringerer Produktivität, Flexibilität, Präzision und schlechter Reaktionsfähigkeit führen. Aus diesem Grund wird ein Entscheidungsunterstützungssystem für die Auswahl des richtigen Werkzeugs und die Einstellung passender Bearbeitungsparameter entwickelt. Dabei werden verschiedene Prozesscharakteristika, wie z.B. Steifigkeit, Toleranz, Energiebedarf oder Kosten, betrachtet. Es folgt ein mehrstufiger Auswahlprozess, wobei die Ähnlichkeit zwischen Fällen mittels eines k-Nearest Neighbors-Algorithmus berechnet wird. Die Umsetzung erfolgt in Visual BASIC 6.0. Die Validierung erfolgte an drei Beispielen: Oberflächenbearbeitung von Stahl und Aluminium sowie das Wälzfräsen von Stahl. Eine Ontologie wird dem Ansatz nicht zugrunde gelegt.

In Mabkhot et al. (2019) wird ein Ontologie-basierter Ansatz für die Auswahl von Herstellungsprozessen auf Basis von fallbasiertem Schließen vorgestellt. Aufgrund individueller Kundenanforderungen und sich schnell verändernden Rahmenbedingungen wird ein Entscheidungsunterstützungssystem für Konstrukteure und Fertigungsingenieure benötigt. Für die Fallauswahl wird die Übereinstimmung zwischen Produktmerkmalen (z.B. Geometrie) und Materialeigenschaften eines zu entwickelnden Produkts und den in der Fallbasis gespeicherten Produkten ermittelt. Werden mindestens drei vergleichbare Produkte in der Fallbasis gefunden, werden die Fertigungsverfahren dieser Produkte als Ergebnis vorgeschlagen. Für die Suche wird ein Ähnlichkeitsmaß auf Grundlage der Ontologie definiert. Die zugrundeliegende Ontologie bildet vorwiegend Materialien und Prozesse für Fügetechnologien ab. Falls bei der Suche keine vergleichbaren Produkte in der Fallbasis ermittelt werden können, werden für das neue Produkt regelbasiert Fertigungsverfahren vorgeschlagen. Die Regeln werden für jedes



Fertigungsverfahren individuell in SWRL<sup>28</sup> implementiert. Das entwickelte System wird abschließend anhand von 3D-Modellen eines Zylinderkopfes eines Verbrennungsmotors und einem Gehäuse einer Abwasserpumpe validiert.

### 3.5 Zusammenfassung und Forschungsdefizit

In Tabelle 3-1 sind die zuvor skizzierten Veröffentlichungen sowie eine Bewertung anhand der genannten Anforderungen gelistet. Die Tabelle ist in die Bereiche Ansätze zur Auswahl von Messsystemen (Kapitel 3.2), Ontologien in der Produktionstechnik mit Bezug zur Fertigungsmesstechnik (Kapitel 3.3) und fallbasiertes Schließen für Betriebsmittel in der Produktionstechnik (Kapitel 3.4) unterteilt. Keine der Veröffentlichungen erfüllt alle Anforderungen, jedoch werden Teilaspekte erfüllt, auf die nachfolgend eingegangen wird.

Einige Veröffentlichungen schlagen **Ontologien** für die Produktionstechnik mit einem Bezug zu Messsystemen oder Messaufgaben vor. In OPPR (Ahmad et al., 2018) wird die Klasse *Sensor* berücksichtigt, allerdings nicht detaillierter modelliert. In OPUA (Maksimov et al., 2020) werden die Klassen *Messeinheit* und *Messinstrument* modelliert. In DAMO (Hippolyte et al., 2021) wird die Klasse *Messung* modelliert. In OMU (Bharti et al., 2021) wird die Modellierung der *Messunsicherheit* betrachtet. Keine der genannten Veröffentlichungen berücksichtigt bei der Modellierung jedoch gängige Normen und Definitionen der Messtechnik (z.B. DIN 1319-1:1995-01 (1995) oder Brinkmann (2012)). Die zugrundeliegende Domäne ist daher nicht hinreichend modelliert, da die existierenden Ontologien zu ungenau sind. Ferner erlauben die Ontologien nicht die Generierung von Analogieschlüssen. Eine gute Grundlage für weitere Detaillierungen bietet OREMAN (Pfrommer et al., 2022), da sich diese Ontologie eng am PPR-Modell orientiert und die Klassen *Messsystem* und *Messaufgabe* mit der geforderten Genauigkeit integriert werden können.

Die meisten Ansätze implementieren Systemarchitekturen, die keine **Analogieschlüsse** erlauben. In Kincaid & Pollock (2017) wird ein Ansatz vorgestellt, dessen zugrundeliegender Wissensspeicher mittels Graphdatenbanken abgebildet wird und somit zur Generierung von Analogieschlüssen befähigt werden kann. Der Ansatz in Ahmad et al. (2018) wird genutzt, um implizites Wissen zu externalisieren. Allerdings wird dabei kein Entscheidungsunterstützungssystem angedacht, sodass diese

---

<sup>28</sup> Semantic web rule language (SWRL) ist eine Sprache für das Semantic Web, mit der sowohl Regeln als auch Logik ausgedrückt werden können.

Veröffentlichung das Forschungsziel dieser Arbeit nicht hinreichend erfüllt. Im Auswahlprozess einiger Ansätze werden Regeln vorgesehen (Chakraborty & Boral, 2017; Kincaid & Pollock, 2017; Maksimov et al., 2020), die bei der Generierung von Analogieschlüssen einer Wissensbasis hilfreich sein können.

Moderne Ansätze zur Auswahl von Betriebsmitteln mittels fallbasiertem Schließen sind aufgrund vielfältiger Hilfsmittel und Werkzeuge zur Computerunterstützung meist (teil-) **automatisiert** (Chakraborty & Boral, 2017; Mabkhot et al., 2019). Sonstige Ansätze zur Auswahl von Messsystemen, deren methodische Grundlage fallbasiertes Schließen nicht beinhaltet, sind in der Regel nur automatisiert, wenn sie die Nutzung einer Datenbank vorsehen (Kincaid & Pollock, 2017; Stepanov et al., 2020). Viele andere Ansätze können jedoch grundsätzlich (teil-) automatisiert werden, auch wenn dies in den jeweiligen Veröffentlichungen noch nicht gezeigt wurde (Feng et al., 2017; Muelaner et al., 2010; Tang & Chen, 2015; Toteva et al., 2014).

Ansätze, die fallbasiertes Schließen als grundlegende Methodik implementieren, sind meist **lernfähig** oder können lernfähig umgesetzt werden, indem die Speicherung gelernter Fälle in die Fallbasis berücksichtigt wird (Chakraborty & Boral, 2017; Mabkhot et al., 2019). Bei den sonstigen Ansätzen zur Auswahl von Messsystemen ist ein lernfähiges System nur in Kincaid & Pollock (2017) möglich, wobei die tatsächliche Umsetzung nicht gezeigt wird. Der Ansatz ist jedoch so weit automatisiert, dass die Implementierung der Lernfähigkeit denkbar ist.

Bei den Ansätzen zur Auswahl von Messsystemen kann die Entscheidungsfindung (außer in Stepanov et al., 2020), mindestens teilweise, nachvollzogen werden. Die Auswahl eines Betriebsmittels mittels fallbasiertem Schließen kann grundsätzlich **nachvollziehbar** dargestellt werden, wenn die ähnlichen Fälle und der Entscheidungsweg offen gelegt werden. In den in Kapitel 3.3 gezeigten Ansätzen ist dies nicht der Fall; mit zunehmender Komplexität der Ähnlichkeitsmaße ist eine nachvollziehbare Offenlegung schwer umzusetzen.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass sich nur eine sehr geringe Anzahl an Veröffentlichungen der Entwicklung von (wissensbasierten) Entscheidungsunterstützungssystemen zur Auswahl von Messsystemen widmet. Alternative Ansätze zur Auswahl von Messsystemen können, ggf. mit weiterem Aufwand, automatisiert und nachvollziehbar Empfehlungen generieren. Allerdings werden dabei keine Ontologien oder die Möglichkeit, Analogieschlüsse zu ziehen, berücksichtigt, sodass sie nicht für unreife

Produktionsprozesse geeignet sind und keine Interoperabilität zulassen. Die existierenden Ontologien bilden bereits verschiedene Teilaspekte der in dieser Arbeit zu modellierenden Domäne ab. Dabei wird das Domänenwissen allerdings nicht ausreichend genau modelliert. Keine der Ontologien repräsentiert bereits die Elemente Prozess und Betriebsmittel / Messsystem ausreichend, um als Grundlage für ein wissensbasiertes Entscheidungsunterstützungssystem für die Auswahl von Messsystemen eingesetzt werden zu können.

Es ist weitere Forschungsarbeit notwendig, um zunächst eine Ontologie zu entwickeln, die die zugrundeliegende Domäne ausreichend genau modelliert. Dabei sind anerkannte Normen der Messtechnik zu berücksichtigen. Des Weiteren ist die Entwicklung eines geeigneten Entscheidungsunterstützungssystems für die Auswahl von Messsystemen in unreifen Produktionsprozessen notwendig, das Analogieschlüsse zulässt und lernfähig ist. Die Implementierung sollte bereits zu Beginn automatisiert erfolgen, so dass kein Expertenwissen zur Anwendung benötigt wird.

Tabelle 3-1: Zusammenfassung des Stands der Forschung anhand der Bewertung der Anforderungen

<input type="radio"/> Nicht erfüllt / keine Aussage <input type="radio"/> Bedingt erfüllt <input checked="" type="radio"/> Vollständig erfüllt	Ontologie	Analogieschluss	Automatisierung	Lernfähigkeit	Nachvollziehbarkeit
<i>Ansätze zur Auswahl von Messsystemen</i>					
Maropoulos et al., 2008	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Muelaner et al., 2010	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Toteva et al., 2014	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Tang & Chen, 2015	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Kincaid & Pollock, 2017	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Feng et al., 2017	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Stepanov et al., 2020	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<i>Ontologien in der Produktionstechnik</i>					
Schlenoff et al., 2000	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Vegetti et al., 2005	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ameri & Dutta, 2006	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Lemaignan et al., 2006	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Lin & Harding, 2007	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Borgo & Leitão, 2007	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Usman et al., 2011, 2013	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Panetto et al., 2012	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ahmad et al., 2018	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Haller et al., 2019	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Maksimov et al., 2020	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Hippolyte et al., 2021	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Bharti et al., 2021	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Pfrommer et al., 2022	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Rijgersberg et al., 2023	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<i>Fallbasiertes Schließen für Betriebsmittel in der Produktionstechnik</i>					
Virkki-Hatakka et al., 1997	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Chakraborty & Boral, 2017	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Mabkhot et al., 2019	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>

## 4 Eigener Ansatz

### 4.1 Lösungsansatz

Wie in Kapitel 1.2 genannt, adressiert dieses Vorhaben folgendes **Forschungsziel**:

*Die Zielsetzung dieser Arbeit ist die Entwicklung eines wissensbasierten Entscheidungsunterstützungssystems zur Vorhersage eines Messsystems für eine vorliegende Messaufgabe in unreifen Produktionsprozessen.*

Um dieses Ziel zu erreichen, werden die in Kapitel 3.1 genannten Anforderungen wie folgt umgesetzt:

- **Ontologie:** Entwicklung einer Ontologie für die Konzepte *Messsysteme* und *Messaufgaben* als übergeordnetes Domänenmodell des Wissensgraphen, um Wissen eindeutig zu modellieren und Interoperabilität zwischen verschiedenen Anwendern und Domänen sicherzustellen. Die Ontologie berücksichtigt die Struktur auf Basis des PPR-Modells aus Pfrommer et al. (2022), damit eine langfristige Nutzbarkeit und Weiterentwicklung sichergestellt sind. Des Weiteren wird die Ontologie für die Anwendung der Problemlösungsmethodik fallbasiertes Schließen optimiert. Bei der Modellierung der Domäne werden insbesondere DIN 1319-1:1995-01 (1995) und DIN 1319-2:2005-10 (2005) berücksichtigt.
- **Analogieschlüsse:** Das validierte Expertenwissen wird in Wissensgraphen gespeichert. Zur Generierung von Analogieschlüssen werden *Knowledge Graph Embeddings* eingesetzt. Die Analogieschlüsse werden in einem separaten Graphen gespeichert, um sie von validiertem Wissen unterscheiden zu können. Die Analogieschlüsse werden gegenüber der Ontologie mit SHACL-Shapes validiert. Auf diese Weise kann das Entscheidungsunterstützungssystem auch für kleine Wissensbasen, wie bei unreifen Produktionsprozessen, neue und nicht offensichtliche Empfehlungen generieren.
- **Automatisierung:** Entwicklung eines computergestützten Entscheidungsunterstützungssystems, das den Entscheidungsprozess automatisiert durchläuft und möglichst weniger, aber zielführender menschlicher Interaktion bedarf, um ein geeignetes Messsystem für eine gegebene Messaufgabe auszuwählen. Dadurch wird das für die Anwendung notwendige Expertenwissen reduziert.
- **Lernfähigkeit:** Implementierung der Methodik des fallbasierten Schließens auf Grundlage des Problemlösungszyklus nach Aamodt & Plaza (1994). Das

Validieren der Fälle zur Bewertung der tatsächlichen Eignung geschieht durch den Anwender des Systems. Dadurch wird die Wissensbasis stetig vergrößert und die Qualität späterer Empfehlungen verbessert.

- **Nachvollziehbarkeit:** Damit die Empfehlung eines Messsystems nachvollzogen werden kann, werden die ähnlichen Fälle sowie die Bewertung mittels des Ähnlichkeitsmaßes für den Nutzer offengelegt und intuitiv visualisiert. Das Ähnlichkeitsmaß entspricht dem Qualitätsmaß der Fallrepräsentation beim fallbasierten Schließen. Es soll deutlich werden, welche Empfehlungen aus validiertem Expertenwissen stammen und welche Empfehlungen Ergebnis von automatisierten Analogieschlüssen sind.

Das **Forschungsziel dieser Arbeit** ist eine Ontologie für Messsysteme und Messaufgaben, die diese Konzepte ausreichend genau modelliert, um die Generierung von Analogieschlüssen zu ermöglichen. Auf Grundlage dieser Ontologie wird ein fallbasiertes Entscheidungsunterstützungssystem entwickelt, das den Problemlösungszyklus nach Aamodt & Plaza (1994) implementiert. Analogieschlüsse werden mit Embeddings des Wissensgraphen generiert. Das Entscheidungsunterstützungssystem wird an konkreten Beispielen validiert. Zu diesem Zweck wird zuvor eine eigene Wissensbasis erstellt.

### Überblick über das Vorgehen im eigenen Ansatz

In Abbildung 4-1 ist das Vorgehen dargestellt, das zur Erarbeitung einer Lösung für das zuvor beschriebene Forschungsziel in dieser Arbeit angewandt wird.

Im ersten Schritt wird in Kapitel 4.2 eine Domänenontologie für *Messsysteme* und *Messaufgaben* auf der Ebene  $M_1$  (vgl. Kapitel 2.4.2) entwickelt. Die Entwicklung der Domänenontologie folgt der Methodik nach Noy & McGuinness (2000). Die vollständige Ontologie ist im veröffentlichten Datensatz (s. Kapitel 5) enthalten.

Im zweiten Schritt wird in Kapitel 4.3 das Vorgehen zum Aufbau einer Wissensbasis, auf deren Grundlage das fallbasierte Entscheidungsunterstützungssystem entwickelt wird, vorgestellt. Dafür wird zunächst ein initialer Wissensgraph durch Experten erstellt. Dieser Wissensgraph wird anschließend mit Embeddings des Wissensgraphen um Analogieschlüsse erweitert. Die erweiterte Wissensbasis wird danach validiert, um die Konformität zur Ontologie sicherzustellen. Im letzten Schritt wird der Wissensgraph in Form des fallbasierten Entscheidungsunterstützungssystems, das die Problemlösungsmethodik fallbasiertes Schließen implementiert, bereitgestellt.

Das Vorgehen aus Kapitel 4.3 wird in Kapitel 5.1 exemplarisch angewandt und ein Wissensgraph am Beispiel der Batteriezellfertigung erstellt. In Kapitel 5.2 wird das Entscheidungsunterstützungssystem am Beispiel der Brennstoffzellenfertigung validiert.

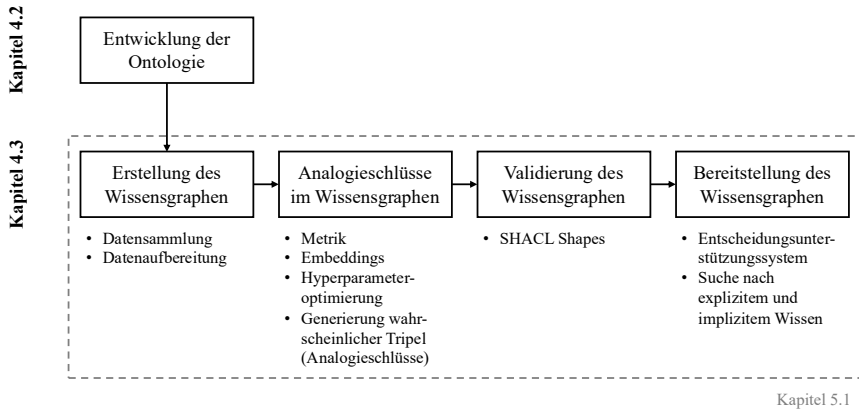


Abbildung 4-1: Überblick über das Vorgehen im eigenen Ansatz

## 4.2 Ontologie für Messsysteme und -aufgaben

Für die Entwicklung der Domänenontologie wird die Methodik nach Noy & McGuinness (2000) verfolgt. Diese Methodik eignet sich für die Entwicklung von Anwendungssystemen und hat sich in der Literatur für den Bereich der Produktionstechnik bereits als nützlich erwiesen (Bharti et al., 2021; Usman et al., 2013). Es werden sieben Schritte durchgeführt (s. Abbildung 4-2):

1. **Domäne und Ziel der Ontologie:** Es wird die Domäne, die die Ontologie abbilden soll, und das Ziel der Ontologie festgelegt. Dabei wird berücksichtigt, welche Fragen die Ontologie beantworten soll und wer die Ontologie nutzt und pflegt.
2. **Wiederverwendung von Ontologien:** Es wird überprüft, ob es bereits Ontologien in der betrachteten Domäne gibt, die entweder verfeinert oder als Schnittstelle genutzt werden können.
3. **Begriffe auflisten:** Es werden alle Begriffe, die in der Ontologie modelliert werden sollen oder über die Anfragen formuliert werden sollen, aufgelistet. Ebenso werden Eigenschaften gelistet, die die Begriffe beschreiben. In diesem Schritt steht eine vollständige Liste relevanter Begriffe im Vordergrund, ohne dabei auf Redundanzen, Relationen oder Struktur in der Ontologie zu achten.

4. **Klassen und Klassenhierarchie definieren:** Um die Klassenhierarchie zu definieren, kann ein Top-Down-Ansatz, Bottom-Up-Ansatz oder Kombinationen dieser beiden Ansätze verfolgt werden. Die Wahl des Ansatzes hängt von der Sichtweise des Experten auf die Domäne ab.
5. **Attribute der Klassen definieren:** Meist bieten Klassen allein keinen ausreichenden Informationsgehalt. Daher wird die Struktur der Klassen weiter detailliert und durch Attribute beschrieben.
6. **Beschreibung der Attribute:** Es erfolgt eine Beschreibung der Attribute hinsichtlich des Datentyps (z.B. String, Integer oder Boolean), der Kardinalität und sonstigen Einschränkungen.
7. **Instanzen erzeugen:** Abschließend werden Instanzen erzeugt, indem zunächst eine Klasse ausgewählt wird, diese Klasse instanziiert wird und die Attribute unter Berücksichtigung der beschreibenden Eigenschaften befüllt werden.

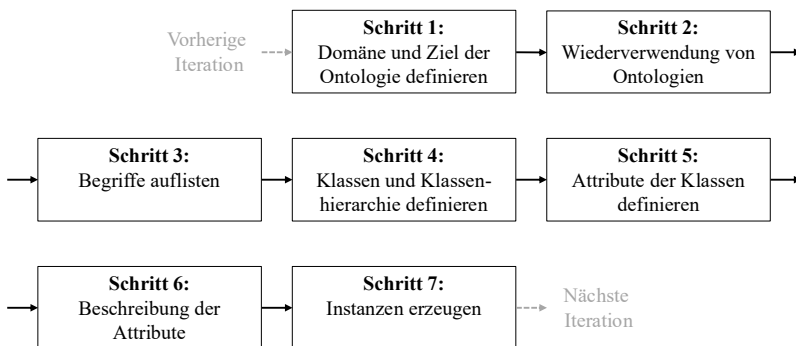


Abbildung 4-2: Iteratives Vorgehen zur Entwicklung von Ontologien (Eigene Abbildung nach Noy & McGuinness, 2000)

#### 4.2.1 Domäne und Ziel der Ontologie

Das Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung eines fallbasierten Entscheidungsunterstützungssystems für die Auswahl von Messsystemen im Bereich der Produktionstechnik. Dabei soll bereits bestehendes Wissen über den Einsatz von Messsystemen aus verschiedenen Branchen berücksichtigt werden. Mittels fallbasiertem Schließen soll dieses Wissen genutzt werden, um für eine neue Messaufgabe (Problem) ein geeignetes Messsystem (Lösung) vorzuschlagen. Dafür wird zunächst die Problembeschreibung



in Form von charakterisierenden Eigenschaften einer neuen Messaufgabe von einem Anwender abgefragt. Anschließend werden ähnliche, in der Wissensbasis gespeicherte, Messaufgaben extrahiert. Diejenigen Messsysteme, mit ähnliche Messaufgaben durchgeführt wurden, kommen zur Lösung der neuen Messaufgabe in Frage. Die neue Messaufgabe, für die ein funktionierendes Messsystem gefunden und deren Eignung praktisch validiert wurde, wird anschließend als gelernter Fall in der Wissensbasis gespeichert.

Die zu entwickelnde Ontologie soll daher *Messsysteme* und *Messaufgaben* sowie deren branchenübergreifende Anwendung im Bereich der Produktionstechnik modellieren. *Messaufgaben* sollen so detailliert modelliert werden, dass die Ähnlichkeit zwischen verschiedenen Messaufgaben für die Methodik des fallbasierten Schließens hinreichend genau ermittelt werden kann. Ferner soll eine Verbindung zwischen *Messsystemen* und *Messaufgaben* modelliert werden, um von einer Messaufgabe auf ein geeignetes Messsystem schließen zu können. Um dem Problem zu begegnen, dass womöglich nicht immer ein konkretes Messsystem in der Wissensbasis gespeichert ist, soll die Ontologie die Möglichkeit bieten, statt eines konkreten Messsystems zumindest ein allgemeines Messverfahren vorzuschlagen.

Die Ontologie wird von Produktionstechnikexperten für Fertigungsmesstechnik gepflegt. Das Entscheidungsunterstützungssystem soll von Anwendern verschiedenster Branchen mit unterschiedlichen Qualifikationen genutzt werden. Für das Entscheidungsunterstützungssystem ist daher eine geeignete Benutzeroberfläche notwendig, während für die Pflege der Ontologie Expertenwissen vorausgesetzt werden kann.

Nicht zuletzt soll die zu entwickelnde Ontologie automatisierte Abfragen mittels SPARQL-Queries ermöglichen, damit das Entscheidungsunterstützungssystem automatisiert und lernfähig umgesetzt werden kann.

#### 4.2.2 Wiederverwendung von Ontologien

Zur Strukturierung der zu entwickelnden Ontologie wird OREMAN nach Pfrommer et al. (2022) berücksichtigt, da diese das PPR-Modell vollständig abbildet. Die Ontologie wird dieser Arbeit als Basis-/Kernontologie auf der Ebene  $M_1$  (vgl. Kapitel 2.4.2) zu Grunde gelegt<sup>29</sup>. Die Ontologie verknüpft Produkte, Prozesse und Ressourcen mit Aufgaben,

---

<sup>29</sup> In der Originalveröffentlichung wurde die Art der Ontologie und die MOF-Ebene nicht konkretisiert. Aufgrund des Abstraktionsgrad wird die Einordnung als Basisontologie und die Ebene  $M_1$  festgelegt.

Fähigkeiten und Operationen und bietet eine gute Struktur für weitere Ontologien in der Produktionstechnik. Die sechs Konzepte sind wie folgt definiert (Pfrommer et al., 2022):

- **Produkt:** Ein Produkt besteht aus einer oder mehrerer Komponenten, die durch Eigenschaften, wie Gewicht oder Volumen, beschrieben werden. Je nach Sichtweise kann ein Produkt ein Endprodukt (z.B. Kundensicht) oder ein Bauteil (z.B. Lieferantensicht) sein.
- **Prozess:** Ein Prozess wird im Kontext von OREMAN als ein Fertigungsverfahren verstanden, also z.B. *Bohren*, *Schweißen* oder *Handhaben*.
- **Ressource:** Alle physischen Betriebsmittel, die in der Produktionsumgebung zu finden sind (z.B. Maschinen oder Transportsysteme), werden als Ressource modelliert.
- **Aufgabe:** Bei einer Aufgabe werden eine oder mehrere Produkte einem Prozess zugeführt, be-/verarbeitet und in gleicher oder veränderter Weise weitergeleitet.
- **Fähigkeit:** Eine Fähigkeit beschreibt die Möglichkeit einer Ressource einen bestimmten Prozess durchzuführen. Eine Fähigkeit kann für verschiedene Aufgaben genutzt werden.
- **Operation:** Eine Operation ist die Implementierung einer Aufgabe mit einer oder mehrerer, konkreter Ressourcen (z.B. der Ablauf eines Roboterprogramms). Ziel ist es, Operationen wiederverwendbar zu gestalten, sodass sie leicht ausgeführt werden können.

Neben OREMAN werden weitere Ontologien berücksichtigt, wobei diese keine Auswirkungen auf die grundsätzliche Struktur der zu entwickelnden Ontologie haben. Es werden jeweils Teile der Ontologien und deren Relationen betrachtet, um zu gewährleisten, dass die zu entwickelnde Ontologie in existierende Ontologien integriert werden kann oder durch diese erweitert werden kann.

- Aus DAMO (Hippolyte et al., 2021) wird die Klasse *Messung* berücksichtigt, um die Klassenhierarchie der zu entwickelnden Ontologie zu erarbeiten.
- Aus OMU (Bharti et al., 2021) findet die Klasse *Messunsicherheit* Berücksichtigung, um bei Bedarf in die zu entwickelnde Ontologie integriert werden zu können.
- Aus SOSA (Haller et al., 2019) wird die Struktur zu *Observations* berücksichtigt, um die Klassenhierarchie der zu entwickelnden Ontologie zu erarbeiten.

- In OPPr (Ahmad et al., 2018) kann die Klasse *Sensor* durch die zu entwickelnde Ontologie für *Messsysteme* erweitert werden.

Darüber hinaus enthält die Datenbank wikidata einige Klassen (s.u.), die für die zugrundeliegende Arbeit relevant sind. Das darin gespeicherte Wissen ist aber zu unvollständig und ungenau. Aus diesem Grund kann dieses Wissen für diese Arbeit nicht verwendet werden. Die Verbindungen zu den Klassen werden bei der Erstellung des Wissensgraphen dennoch berücksichtigt, um zu einem späteren Zeitpunkt nützliches Wissen nachträglich hinzufügen zu können. Das Vorgehen wird in Kapitel 5.1.4 genauer erläutert.

- *measurement tool* (wikidata ID: Q1047213)
- *measurement* (wikidata ID: Q12453)
- *measurand* (wikidata ID: Q1924249)
- *measurement method* (wikidata ID: Q18120378)
- *measurement technique* (wikidata ID: Q1924397)
- *measuring equipment* (wikidata ID: Q1584378)
- *unit of measurement* (wikidata ID: Q47574)

### 4.2.3 Begriffe der Domäne

Es sollen die Konzepte *Messsystem* und *Messaufgabe* modelliert werden.

Ein Messsystem (Vgl. Kapitel 2.1.1) besteht aus einem Messgerät (Vgl. Kapitel 2.1.1) und Hilfseinrichtungen. Sowohl ein Messgerät als auch eine Hilfseinrichtung können einem eindeutigen Hersteller, Preis und Technologiereifegrad (TRL) (Vgl. Kapitel 2.1.2) zugeordnet werden.

Ein Messgerät kann darüber hinaus durch eine Auflösung (Vgl. Kapitel 2.1.1), eine Messzeit (Vgl. Kapitel 2.1.2), eine Frequenz (Vgl. Kapitel 2.1.2) und einen Messbereich (Vgl. Kapitel 2.1.1) charakterisiert werden.

Ein Messsystem wird weiter durch einen Freiheitsgrad (Vgl. Kapitel 2.1.2) und eine Messobjektschnittstelle (Vgl. Kapitel 2.1.2) charakterisiert. Einem Messsystem sind zudem ein Messverfahren (Vgl. Kapitel 2.1.1) und ein Messprinzip (Vgl. Kapitel 2.1.1) zugeordnet.

Eine Messaufgabe wird grundlegend durch eine Messung (Vgl. Kapitel 2.1.1), ein Messobjekt (Vgl. Kapitel 2.1.1) und ein Messverfahren beschrieben. Die Messung hat eine konkrete Messgröße (Vgl. Kapitel 2.1.1), der sie gilt.

Die Messung benötigt eine bestimmte Zeit in Form einer Messdauer (Vgl. Kapitel 2.1.2). Sie ist einer bestimmten Branche zuzuordnen. Darüber hinaus besitzt sie einen Integrationsgrad (Vgl. Kapitel 2.1.2), in welchem das Messsystem eingesetzt wurde. (Toteva et al., 2014) Auf die Messung wirken verschiedene Einflussgrößen (Vgl. Kapitel 2.1.1); insbesondere Temperatur und Luftfeuchtigkeit sind entscheidend. Der Messung ist ein vollständiges Messergebnis (Vgl. Kapitel 2.1.1), bestehend aus einem Messwert (Vgl. Kapitel 2.1.1), einer SI-Einheit und einer Messunsicherheit (Vgl. Kapitel 2.1.1), zuzuordnen. (Hippolyte et al., 2021) Die Messung wird mit einem konkreten Messsystem durchgeführt.

Das Messobjekt wird durch verschiedene produktspezifische Eigenschaften charakterisiert, darunter insbesondere Toleranzen des Bauteils, einem Gewicht, einer Geometrie, einem Material, einem Volumen und einem Aggregatzustand.

In Tabelle 4-1 sind zusammenfassend alle Begriffe für die Konzepte Messsystem und Messaufgabe gelistet, die im Folgenden zu einer Ontologie modelliert werden

Tabelle 4-1: Zusammenfassung der Begriffe für die Konzepte *Messsysteme* und *Messaufgaben* der Ontologie

<b>Konzept Messsysteme</b>	<b>Konzept Messaufgaben</b>
Messsystem	Messaufgabe
Messverfahren	Messung
Messprinzip	Messobjekt
Messgerät	Messgröße
Hilfseinrichtung	Messdauer
Messobjektschnittstelle	Branche
Freiheitsgrade	Integrationsgrad
Auslösung	Einflussgrößen
Messzeit	Temperatur
Frequenz	Feuchtigkeit
Messbereich	Vollständiges Messergebnis
Hersteller	Messwert
Kosten	SI-Einheit
Technologiereifegrad (TRL)	Messunsicherheit
	Toleranz
	Gewicht
	Geometrie

---

Material  
 Volumen  
 Aggregatzustand  
 Messsystem  
 Messverfahren

---

#### 4.2.4 Klassen und Klassenhierarchie

Für die Definition der Klassen und der Klassenhierarchie wird ein Top-Down-Approach gewählt. Zunächst wird die Grobstruktur definiert, indem die wichtigsten Begriffe in die Struktur nach Pfrommer et al. (2022) eingeordnet werden. Anschließend wird die Feinstruktur definiert, indem die verbleibenden Begriffe als Ontologie modelliert werden. Zwischen allen Klassen werden eindeutige Relationen definiert. Die Namen der Relationen sowie die Feinstruktur der Ontologien für Messsysteme und Messaufgaben gehen aus Abbildung 4-4 respektive Abbildung 4-5 hervor.

##### Grundstruktur

In Abbildung 4-3 ist die Struktur nach Pfrommer et al. (2022) für die Begriffe der zugrundeliegenden Domäne dargestellt<sup>30</sup>. Ein Produkt entspricht einem Messobjekt, das gemessen wird. Ein Prozess ist ein Messverfahren. Eine Ressource ist ein Messgerät oder eine Hilfseinrichtung, die für eine Messung benötigt werden. Eine Aufgabe ist eine Messaufgabe, also die Anwendung eines Messverfahrens auf ein bestimmtes Messobjekt. Eine Fähigkeit verbindet eine oder mehrere Ressourcen (d.h. Messgeräte und Hilfseinrichtungen) und ein bestimmtes Messverfahren. Das Messsystem hat dann die Fähigkeit, das Messverfahren auszuführen. Eine Operation ist eine konkrete Messung, d.h. die Anwendung eines bestimmten Messsystems auf eine bestimmte Messaufgabe.

---

<sup>30</sup> Anmerkung: in der Originalveröffentlichung wurde die Ontologie nicht als UML-Diagramm dargestellt. Das hier gezeigte UML-Diagramm wurde in Absprache mit dem Autor der Originalveröffentlichung erstellt. Zum Zeitpunkt dieser Arbeit wurde die Darstellung von OREMAN als UML-Diagramm noch nicht veröffentlicht.

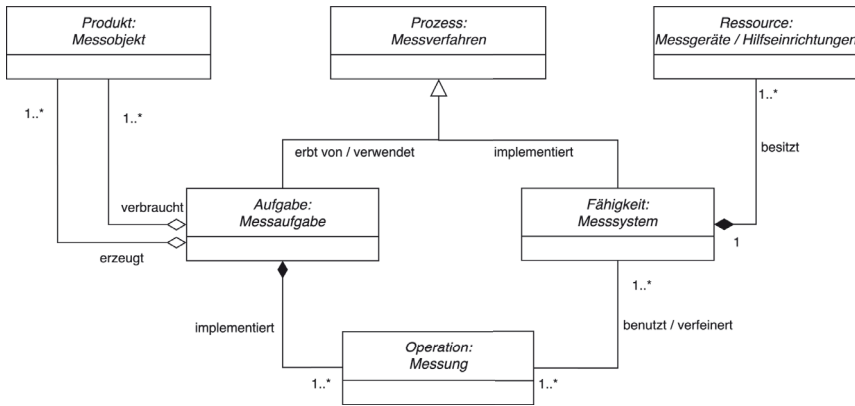


Abbildung 4-3: Grobstruktur der Ontologie auf der Ebene M<sub>1</sub> als UML-Diagramm in Anlehnung an Pfrommer et al. (2022)

Das nachfolgende Beispiel (Tabelle 4-2) verdeutlicht die Einordnung der Begriffe in die Struktur nach Pfrommer et al. (2022) und die entsprechende MOF-Ebene. Das Beispiel ist die *Messung eines Durchmessers an einem Getriebebauteil mittels taktiler Koordinatenmesstechnik*.

Tabelle 4-2: Beispiel 1 für die Einordnung der Begriffe in das PPR-Modell nach Pfrommer et al. (2022)

OREMAN (M <sub>1</sub> )	M <sub>1</sub> Ebene	M <sub>0</sub> Ebene
Produkt	Messobjekt	Getriebebauteil mit einer Bohrung
Prozess	Messverfahren	<i>Taktile</i> Koordinatenmesstechnik
Ressource	Messgeräte/Hilfseinrichtung.	Zeiss O-Inspect, Werkstückhalter, Taster
Aufgabe	Messaufgabe	Durchmesser einer Bohrung
Fähigkeit	Messsystem	Zeiss O-Inspect, konfiguriert für <i>taktile</i> Koordinatenmessung
Operation	Messung	Messung des Bohrungsdurchmessers am Getriebebauteil

In Tabelle 4-3 ist ein weiteres Beispiel aufgeführt, das die Abgrenzung der Begriffe Messgerät (Ressource) und Messsystem (Fähigkeit) verdeutlicht. Im Vergleich zu Tabelle 4-2 hat sich das Messverfahren geändert; nun soll der Bohrungsdurchmesser

mittels *optischer* Koordinatenmesstechnik gemessen werden. Das zuvor verwendete Messgerät (Zeiss O-Inspect) ist sowohl für taktile als auch optische Koordinatenmessungen geeignet; daher ändert sich die Ressource nicht. Die Änderung des Prozesses (Messverfahren) bei gleichbleibender Ressource spiegelt sich also in der Fähigkeit, dem Messsystem, wider.

Tabelle 4-3: Beispiel 2 für die Einordnung der Begriffe in das PPR-Modell nach Pfrommer et al. (2022)

OREMAN (M <sub>1</sub> )	M <sub>1</sub> Ebene	M <sub>0</sub> Ebene
Produkt	Messobjekt	Getriebebauteil mit einer Bohrung
Prozess	Messverfahren	<i>Optische</i> Koordinatenmesstechnik
Ressource	Messgeräte/Hilfseinrichtung.	Zeiss O-Inspect, Werkstückhalter, Taster
Aufgabe	Messaufgabe	Durchmesser einer Bohrung
Fähigkeit	Messsystem	Zeiss O-Inspect, konfiguriert für <i>optische</i> Koordinatenmessung
Operation	Messung	Messung des Bohrungsdurchmessers am Getriebebauteil

### Feinstruktur Messaufgaben

In Abbildung 4-4 ist die Feinstruktur der Ontologie *Messaufgaben* als UML-Klassendiagramm dargestellt. Auf die Darstellung von Methoden<sup>31</sup> wird aus Gründen der Übersichtlichkeit im UML-Diagramm verzichtet. Nachfolgend wird die Struktur erläutert:

Einer Messaufgabe ist eine konkrete Messung zugeordnet. Die Messung ist das Ergebnis der Messaufgabe, daher kann eine Messung nicht ohne eine Instanz einer Messaufgabe existieren. Einer Messaufgabe ist zudem ein konkretes Messobjekt zugeordnet. Einer Messaufgabe sind zudem Messverfahren zugeordnet, mit denen sie grundsätzlich durchgeführt werden kann.

Der Messung ist ein konkretes Messsystem zugeordnet, mit dem die Messung durchgeführt wurde. Die Messung hat eine Messgröße, der sie gilt. Im o.g. Beispiel (*Bohrung im Getriebebauteil*) kann dies z.B. ein Durchmesser sein. Die Messung benötigte eine

<sup>31</sup> Methoden beschreiben in einem UML-Diagramm das Verhalten eines Objekts und verleihen Fähigkeiten; z.B. kann ein Messsystem in Benutzung sein oder nicht. (Staud, 2019)

bestimmte Zeit in Form der Messdauer. Sie ist einer bestimmten Branche zuzuordnen und hat einen Integrationsgrad, in dem das Messsystem eingesetzt wurde. Die Messung wird von verschiedenen Einflussgrößen, nämlich Temperatur und Feuchtigkeit, beeinflusst. Die Messung wird durch ein vollständiges Messergebnis, bestehend aus einem oder mehreren Messwerten, einer SI-Einheit und einer Messunsicherheit (nach JCGM, 2008) beschrieben.

Ein Messobjekt wird durch Toleranzen, einem Gewicht (in kg), einer Geometrie (Abmessungen in Länge, Breite und Höhe), einem Material, einem Volumen (in cm<sup>3</sup>) und einem Aggregatzustand beschrieben.

### **Feinstruktur Messsysteme**

In Abbildung 4-5 ist die Feinstruktur der Ontologie *Messsysteme* als UML-Klassendiagramm dargestellt. Auf die Darstellung von Methoden wird aus Gründen der Übersichtlichkeit im UML-Diagramm verzichtet. Nachfolgend wird die Struktur erläutert:

Einem Messsystem sind ein allgemeines Messverfahren (im o.g. Beispiel: taktile und optische Koordinatenmesstechnik) und ein Messprinzip (im o.g. Beispiel entsprechend: Taktile oder optische Verfahren) zugeordnet. Das Messverfahren erbt Eigenschaften vom Messprinzip; das Messsystem erbt Eigenschaften vom Messverfahren.

Ein Messsystem wird zudem durch eine Messobjektschnittstelle, einen Freiheitsgrad, ein oder mehrere Messgeräte und kein oder mehrere Hilfseinrichtungen beschrieben. Die Messobjektschnittstelle beschreibt, ob das Messsystem berührend oder nicht-berührend ist und ob das Messsystem zerstörend oder nicht-zerstörend ist. Der Freiheitsgrad des Messsystems liegt zwischen 1 und 6 (Vgl. Kapitel 2.1.2).

Ein Messgerät wird durch eine Auflösung (entsprechend der Spezifikation des Herstellers), eine Messzeit (Zeit, die für eine Messung benötigt wird), einer Abtastrate (entsprechend der Spezifikation des Herstellers), einer oberen und einer unteren Grenze des Messbereichs (entsprechend der Spezifikation des Herstellers), einem Hersteller, einem Preis (in Euro) und einem Technologiereifegrad (zwischen 1 und 9, Vgl. Kapitel 2.1.2) beschrieben.

Eine Hilfseinrichtung wird ebenfalls durch einen Hersteller, einen Preis und einen Technologiereifegrad beschrieben. Die drei Klassen, die eine Hilfseinrichtung beschreiben, sind die gleichen wie die, die ein Messgerät beschreiben.



### **Relationen zwischen den Konzepten Messsysteme und Messaufgaben**

Zwischen den Konzepten *Messaufgaben* und *Messsysteme* bestehen zwei wichtige Verbindungen:

1. Jede Messaufgabe ist nach Möglichkeit einem Messverfahren zugeordnet. Die Messsysteme, die diesem Messverfahren zugeordnet sind, sind potenziell für die entsprechende Messaufgabe geeignet. Durch die Verallgemeinerung in Form der Messverfahren ergibt sich allerdings eine gewisse Unschärfe, ob ein Messsystem auch für eine in Verbindung stehende Messaufgabe geeignet ist.
2. Jeder Messung, die zu einer bestimmten Messaufgabe gehört, ist ein Messsystem zugeordnet. Die Eignung dieses Messsystems für die in Verbindung stehende Messaufgabe ist sichergestellt, da die Messung bereits in der Vergangenheit erfolgreich durchgeführt wurde.

Die zu ziehenden Analogieschlüsse werden in erster Linie über die Klasse Messung gezogen, da hieraus mit höherer Wahrscheinlichkeit geeignete Messsysteme für Messaufgaben gefunden werden können.

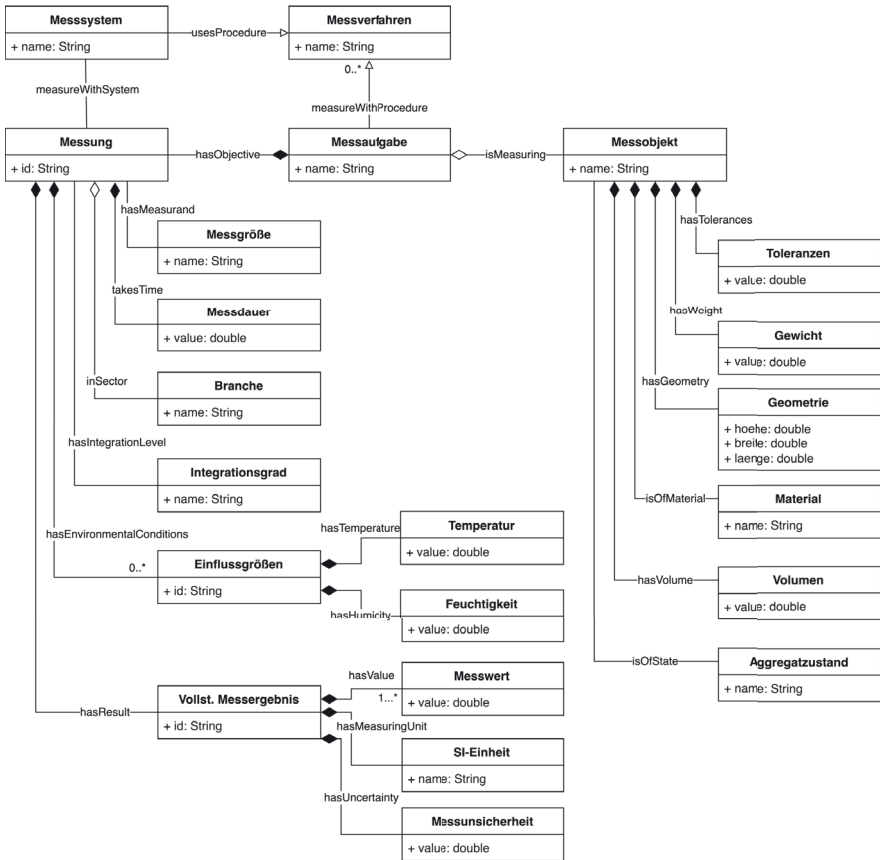


Abbildung 4-4: Domänenontologie Messaufgabe auf der Ebene M<sub>1</sub> als UML-Klassendiagramm

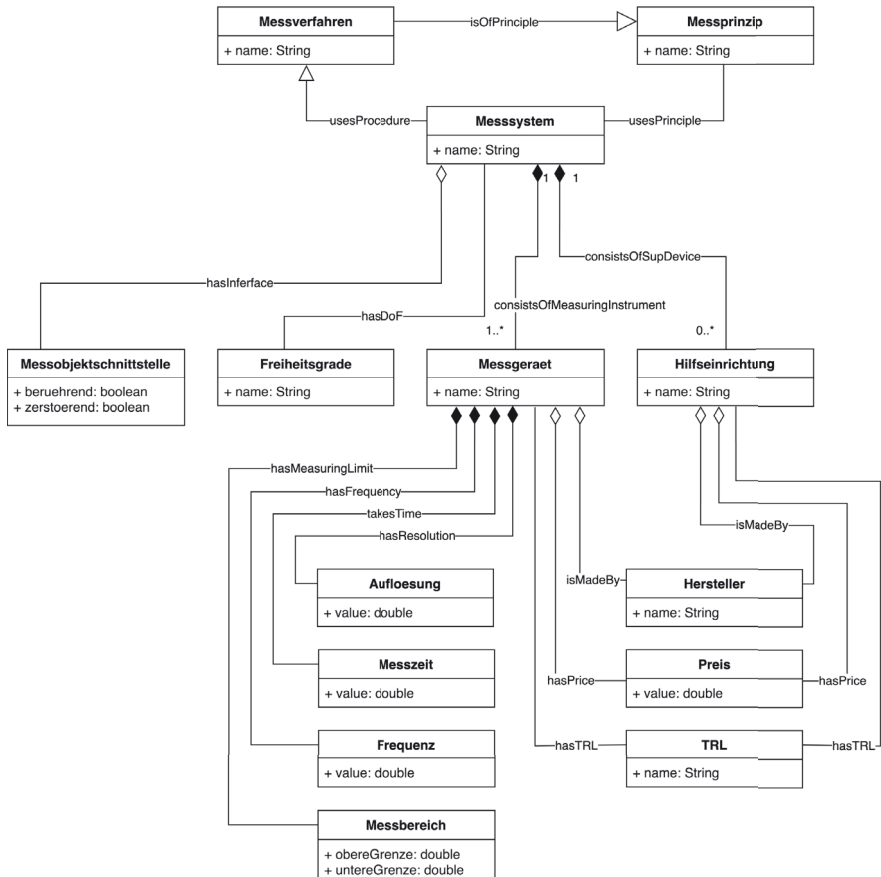


Abbildung 4-5: Domänenontologie Messsystem auf der Ebene  $M_1$  als UML-Klassendiagramm

#### 4.2.5 Attribute der Klassen

Die Attribute der jeweiligen Klassen sind den UML-Diagrammen aus Abbildung 4-4 und Abbildung 4-5 zu entnehmen.

Die Klassen Messung, Einflussgrößen und vollst. Messergebnis des Konzepts *Messaufgaben* werden mit einer jeweils eindeutigen ID modelliert, da ihnen keine eindeutigen Klarnamen zugewiesen werden können.

Die Klassen Auflösung, Messzeit, Frequenz, Messbereich und Preis des Konzepts *Messsysteme* und die Klassen Messdauer, Temperatur, Feuchtigkeit, Messwert, Messunsicherheit, Toleranzen, Gewicht, Geometrie und Volumen des Konzepts *Messaufgaben* werden als Werte (Literele) modelliert. Die übrigen Klassen werden als Klassen mit eindeutiger URI modelliert. Die Klassen Freiheitsgrade und TRL werden ebenfalls als eindeutige Klassen modelliert, da dies bei der späteren Erstellung des Embeddings eindeutiger ist und zu besseren Ergebnissen führt.

#### 4.2.6 Beschreibung der Attribute

Die Datentypen und Kardinalitäten der Attribute der jeweiligen Klassen sind den UML-Diagrammen aus Abbildung 4-4 und Abbildung 4-5 zu entnehmen.

Eine vollständige Beschreibung der Konzepte *Messsysteme* und *Messaufgaben* im RDF/XML-Format sind in dem zu dieser Arbeit gehörenden Datensatz enthalten (s. Kapitel 5). Alle Klassennamen und Attribute sind auf deutsch und englisch hinterlegt.

#### 4.2.7 Instanzen der Klassen

In Tabelle 4-4 sind die Instanzen der Klassen Messprinzipien und darin zugeordnet die Klassen der Instanzen Messverfahren auf der Ebene  $M_0$  gelistet. In Tabelle 4-5 sind die Instanzen der Klassen Freiheitsgrade, Technologiereifegrade, Integrationsgrade, SI-Einheiten und Aggregatzustände auf der Ebene  $M_0$  (vgl. Kapitel 2.4.2) gelistet. Diese Instanzen werden bereits implementiert, um eine einheitliche Nomenklatur zu gewährleisten. Eine Erweiterung der Liste bleibt weiterhin möglich. Die nicht genannten Klassen sind frei instanzierbar.

Tabelle 4-4: Instanzen zur Klasse Messprinzip (fett gedruckt) und zugehörige Instanzen der Klasse Messverfahren auf der Ebene  $M_0$  (in Anlehnung an Kölmel, 2016)

<b>Akustische Verfahren</b>	
Modalanalyse	Shearographie
Resonanzanalyse	Ultraschall
Schallemission	
<b>BRDF (Bidirektionale Reflexionsverteilungsfunktion)</b>	
Reflektanzerfassung	
Streulichtverfahren	
<b>Durchstrahlungsprüfung</b>	
Radioskopie	Ultraschall
Radioskopie / Gammastrahlung	Weisslichtinterferometrie
Röntgenfluoreszenzspektroskopie	Computertomographie
Terahertzstrahlung	
<b>Elektrische / magnetische Verfahren</b>	
Kapazitive Verfahren	
Röntgenfluoreszenzspektroskopie	
<b>Elektrische Verfahren</b>	
Beschleunigungsmessung	Kraftmessung
Drehmomentmessung	Mikro-Raman-Spektroskopie
Druckmessung	Modalanalyse
Elektronenmikroskopie	Multimeter
Energiedispersive Röntgenfluoreszenzspektroskopie	Positionsbestimmung
Feuchtemessung	Temperaturmessung
Frequenzmessung	Volumenstrommessung
Gewichtsmessung	Widerstandsmessung
Impedanzmessung	
<b>Induktive Verfahren</b>	
Kapazitive Verfahren	
Wirbelstromverfahren	
<b>Komplexer Brechungsindex</b>	
Ellipsometrie	Reflektometrie/Interferenzspektroskopie
Energiedispersive Röntgenfluoreszenzspektroskopie	Röntgen-/Retroreflexionsreflektometrie
Mikro-Raman-Spektroskopie	
<b>Magnetische Verfahren</b>	
Drehzahlmessung	Magnetpulver
Magnetischer Streufluss	Wirbelstromverfahren

**Mechanische Verfahren**


---

Ausrichtwerkzeug	Längenmessung
Beschleunigungsmessung	Positionsbestimmung
Drehmomentmessung	Ultraschall
Druckmessung	Viskositätsmessung
Härteprüfung	Volumenstrommessung
Kraftmessung	

**Optische Verfahren**


---

2D Kamerasystem	Lichtfeldkamera
3D Kamerasystem	Lichtmikroskopie
Aktive Thermografie	Machine Vision
Passive Thermografie	Magnetischer Streufluss
Autofokus	Multimeter
Chromatisch-konfokale Abstandsmessung	Photogrammetrie
Computertomographie	Radioskopie
Deflektometrie	Radioskopie / Gammastrahlung
Elektronenmikroskopie	Rasterelektronenmikroskopie
Energiedispersive Röntgenspektroskopie	Reflektanzerfassung
Farbeindringprüfung	Reflektometrie/Interferenzspektroskopie
Fokusvariation	Schattenwurf
Konfokale Mikroskopie	Shearographie
Konoskopische Holographie	Streifenprojektion
Optische Koordinatenmesstechnik	Streulichtverfahren
Laserinterferometrie	Ultraschall
Lasertriangulation	Weisslichtinterferometrie

**Radiographische Verfahren**


---

Computertomographie  
Radioskopie

**Spektroskopie**


---

Absorptionsspektroskopie	Infrarotspektroskopie
Ellipsometrie	Mikro-Raman-Spektroskopie
Fluoreszenzspektroskopie	

**Taktile Verfahren**


---

Taktile Koordinatenmesstechnik

**Thermische Verfahren**


---

Aktive Thermografie  
Passive Thermografie

**Visuelle Verfahren**


---

2D Kamerasystem	Härteprüfung
3D Kamerasystem	

---

Machine Vision	Konoskopische Holographie Laserinterferometrie
Autofokus	Lasertriangulation
Chromatisch-konfokale Abstandsmessung	Magnetpulver
Deflektometrie	Modalanalyse
Elektronenmikroskopie	Multimeter
Energiedispersive Röntgenspektroskopie	Fotogrammetrie
Farbeindringprüfung	Schattenwurf
Fokusvariation	Streifenprojektion

Tabelle 4-5: Instanzen zu den Klassen Freiheitsgrade, Technologiereifegrade, Integrationsgrade, SI-Einheiten und Aggregatzustände auf der Ebene  $M_0$

<b>Freiheitsgrade</b> (Vgl. Kapitel 2.1.2)	<b>Technologiereifegrad</b> (Vgl. Kapitel 2.1.2)	<b>Integrationsgrade</b> (Vgl. Kapitel 2.1.2)
1	1	Off-Shopfloor
2	2	On-Shopfloor
3	3	Off-Line
4	4	In-Line
5	5	Off-Machine
6	6	On-Machine
	7	Off-Process
	8	In-Process
	9	

<b>SI-Einheiten</b>
s
m
kg
A
kg
mol
cd

<b>Aggregatzustände</b>
fest
flüssig
gasförmig

### 4.3 Wissensgraph für die Auswahl von Messsystemen

Ein fallbasiertes Entscheidungsunterstützungssystem für die Auswahl von Messsystemen benötigt eine umfassende Wissensbasis, da die Methodik einen Ähnlichkeitsvergleich zwischen einer Vielzahl von Messaufgaben vorsieht. Die Wissensbasis muss verschiedene Messaufgaben und Messsysteme enthalten, die einander zugeordnet sind. Dieses, auf Erfahrung basierende, Wissen liegt bislang nicht in strukturierter Form vor, sodass eine initiale Wissensbasis in Form eines Wissensgraphen durch Experten aufgebaut werden muss (Kapitel 4.3.1). Während das Wissen über Messsysteme vorwiegend bei Experten der Fertigungsmesstechnik vorliegt, liegt das Wissen über Messaufgaben bei Produktionsprozessexperten vor. Die Größe des Wissensgraphen ist aufgrund des manuellen Aufwands und der geringen Anzahl an Experten begrenzt. Insbesondere das Wissen über nachweislich funktionierende (validierte) Messsysteme für bestimmte Messaufgaben ist limitiert. Um dennoch in der Lage zu sein, einem Nutzer neue und nicht offensichtliche Empfehlungen für potenziell geeignete Messsysteme vorschlagen zu können, soll die Wissensbasis durch Analogieschlüsse angereichert werden (Kapitel 4.3.2). Diese Analogieschlüsse werden als RDF-Tripel in einem eigenen Graphen gespeichert, um sie nicht mit dem validierten Wissen zu vermischen. Um die Konformität der Tripel aus den Analogieschlüssen zur Ontologie sicherzustellen, wird der Wissensgraph validiert (Kapitel 4.3.3), bevor er einem Anwender bereitgestellt wird (Kapitel 4.3.4).

Konkret ist das Ziel, auf Basis eines, zunächst manuell erstellten, Wissensgraphen ein Embedding zu erstellen. Dieses Embedding wird genutzt, um automatisiert Analogieschlüsse aus der Wissensbasis zu extrahieren. Das heißt, es werden für gespeicherte Messaufgaben geeignete Messsysteme vorhergesagt, die bislang nicht Teil des validierten Wissens sind. Die vorhergesagten Messsysteme können bei zukünftigen Anfragen zu neuen Messaufgaben als Alternativen bereitgestellt werden.

#### 4.3.1 Erstellung des Wissensgraphen

##### Datensammlung

Zunächst wird die Möglichkeit überprüft, bereits vorhandenes, strukturiertes Wissen über die zugrundeliegende Domäne zu nutzen. Dafür werden öffentlich verfügbare Datenbanken nach Informationen über Messsysteme und Messaufgaben durchsucht.



Folgende Datenbanken werden betrachtet: wikidata<sup>32</sup> (ca. 749 Mio. Tripel), DBPedia<sup>33</sup> (ca. 412 Mio. Tripel), NELL<sup>34</sup> (ca.(Färber & Rettinger, 2018)<sup>35</sup> (ca. 1 Mrd. Tripel) (Färber & Rettinger, 2018). Außerdem werden Instanzen der Ontologie OM2 (Klassen *dimension* und *quantity*) berücksichtigt.

Zusammengefasst existiert bislang keine Quelle, aus der Messsysteme und Messaufgaben in strukturierter Form extrahiert werden können. Daher werden für die Erstellung einer initialen Wissensbasis Literaturrecherchen und Experteninterviews durchgeführt. Um den Aufwand der manuellen Datensammlung gering zu halten, wird das Wissen zunächst in leicht handhabbarer Form gespeichert. Hierzu eignen sich je eine Tabelle für Messsysteme und Messaufgaben, deren Spalten die notwendigen Klassen der jeweiligen Ontologie enthalten (vgl. Abbildung 4-6). Ziel ist es, möglichst viele Messsysteme und Messaufgaben zu sammeln und jeder Messaufgabe mindestens ein validiertes Messsystem zuzuordnen. Die Wissensbasis muss ausreichend groß sein, damit ein branchenübergreifender Ähnlichkeitsvergleich von Messaufgaben zu Empfehlungen für Messsysteme führt. Durch die strukturierte Wissensabfrage und die Befragung von Experten am wbk Institut für Produktionstechnik<sup>36</sup> ist eine hohe Qualität der Daten sichergestellt.

Das Ergebnis der Datensammlung sind zwei Tabellen, in denen Messsysteme und Messaufgaben mindestens einer Branche gemäß der Ontologie definiert sind. Die Tabellen sind im veröffentlichten Datensatz (s. Kapitel 5) enthalten.

---

<sup>32</sup> Wikidata ist die Grundlage für Wikipedia und kann über SPARQL-Queries angefragt werden. [https://www.wikidata.org/wiki/Wikidata:Main\\_Page](https://www.wikidata.org/wiki/Wikidata:Main_Page) [07.05.2023]

<sup>33</sup> DBPedia basiert auf wikidata und wird vom Institut für Angewandte Informatik (InfAI, Univ. Leipzig) verwaltet (Lehmann et al., 2015).

<sup>34</sup> NELL versucht das Web zu lesen und somit Instanzen in einem Wissensgraphen zu erstellen (Mitchell et al., 2018).

<sup>35</sup> YAGO ist Gegenstand einer Kooperation zwischen dem Max-Planck-Institut für Informatik und der Telecom ParisTech Universität (Rebele et al., 2016).

<sup>36</sup> Das wbk Institut für Produktionstechnik verfügt über eine fundierte Expertise, um die Erarbeitung einer solchen Wissensbasis zu befähigen. Zum einen verfügt das wbk über eine umfassende Ausstattung in Form eines Labormessraums (z.B. Zeiss Metrotom 800, Zeiss F25, Zeiss O-Inspect 322, JEOL JSM-6010) und zahlreicher In-Line-fähiger Messsysteme (z.B. InfraTec ImagerR 9400, Alicona µCMM, Xarion opt. Mikroskop). Zum anderen ist das wbk in zahlreichen Verbundprojekten aktiv, in denen relevante Fragestellungen behandelt werden (s. dazu auch Kapitel 5).

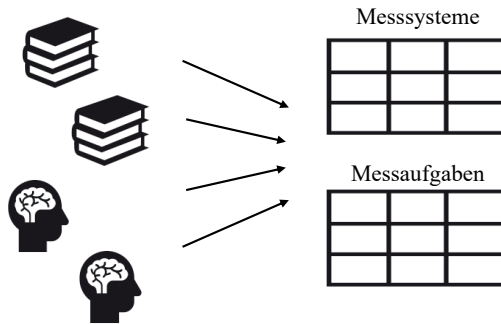


Abbildung 4-6: Datensammlung mit Hilfe von Literaturrecherchen und Experten

### Datenaufbereitung und -speicherung

Aus Gründen der Handhabbarkeit wird das Wissen zunächst in Tabellen gespeichert. Damit daraus ein Wissensgraph erstellt werden kann, werden die Einträge der Tabellen in RDFS-Tripel transformiert (vgl. Abbildung 4-7). Für die Erstellung der Tripel werden die Beziehungen zwischen den in Spalten gespeicherten Klassen aus der Ontologie entnommen. Die jeweiligen Einträge zweier Spalten und die entsprechende Beziehung bilden gemeinsam ein Tripel. Da die Einträge beider Tabellen (Messsysteme und Messaufgaben) gemeinsam in einem Wissensgraphen gespeichert werden, werden alle Tripel in einer Liste gespeichert. Bei der Erstellung der Tripel ist auf die Unterscheidung zwischen Objekten und Werten/Literalen zu achten; so wird bspw. ein Hersteller (*string*) als Objekt gespeichert, während ein Preis (*int*) als Literal gespeichert wird.

Die Tripel werden anschließend in einer Graphdatenbank gespeichert. Die Graphdatenbank sollte SPARQL-Queries per API unterstützen und auch bei größeren Datenmengen eine konstant hohe Performanz bieten. Die Wahl einer konkreten Datenbank wird in Kapitel 5.1.4 getroffen.

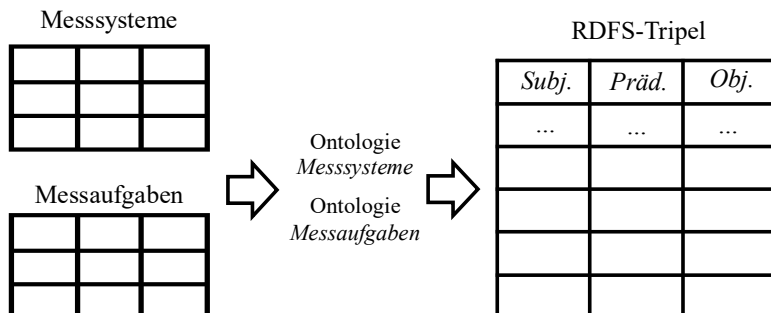


Abbildung 4-7: Erstellung von Tripeln aus strukturiertem Wissen

In Quelltext 4-1 sind beispielhafte Tripel für das Messgerät „Metrotom 800“ der Firma Zeiss dargestellt, wie sie aus der Tabelle Messsysteme resultieren können. Zunächst wird mit der Relation *rdf:type* festgelegt, welcher Klasse der Ontologie das Messgerät zugeordnet ist. Mit den Relationen *messsystemOnto:isMadeBy*, *messsystemOnto:hasTRL* und *messsystemOnto:hasPrice*, die aus der Ontologie stammen<sup>37</sup>, werden der Hersteller (Zeiss), der Technologiereifegrad (TRL) und der Preis des Messgeräts zugeordnet. Der Hersteller ist als eigenes Objekt instanziiert, um dem Hersteller Zeiss mehrere Messgeräte zuordnen zu können. Der Technologiereifegrad und der Preis sind als Werte/Literale instanziiert, sodass hierüber z.B. Filter angewendet werden können.

Subjekt	Prädikat	Objekt
messsystemOnto:Metrotom_800	rdf:type	messsystemOnto:Messgeraet
messsystemOnto:Metrotom_800	messsystemOnto:isMadeBy	messsystemOnto:Zeiss
messsystemOnto:Metrotom_800	messsystemOnto:hasTRL	„9“
messsystemOnto:Metrotom_800	messsystemOnto:hasPrice	„600000“

Quelltext 4-1: Beispielhafte Tripel für das Messgerät „Metrotom 800“ von der Firma Zeiss (keine vollständige Beschreibung des Messgeräts)

<sup>37</sup> Mit dem Prefix *messsystemOnto* wird gekennzeichnet, unter welcher URI der Eintrag zu finden ist. Am Anfang eines SPARQL-Queries muss dieser Prefix festgelegt werden, z.B. durch: *PREFIX messsystemOnto: <http://beispiel.com/messsystem-ontologie>*

Neben den Einträgen aus den beiden Tabellen werden auch die Ontologie selbst und die Instanzen, die während der Entwicklung der Ontologie vorgesehen wurden (vgl. Kapitel 4.2.7), in RDFS-Tripel überführt.

Eine Klasse der Ontologie resultiert in mindestens vier Tripeln mit:

- der Relation *rdf:type*, um die OWL-Klasse *owl:Class* zuzuordnen,
- der Relation *rdfs:isDefinedBy*, um die URI der Ontologie zuzuordnen und
- den Relation *rdfs:label* für die deutsche und englische Bezeichnung des Subjekts.

Im nachfolgenden Beispiel (Quelltext 4-2) sind diese vier Tripel für die Klasse *Messverfahren* beispielhaft dargestellt:

Subjekt	Prädikat	Objekt
messsystemOnto:Messverfahren	<i>rdf:type</i>	<i>owl:Class</i>
messsystemOnto:Messverfahren	<i>rdfs:isDefinedBy</i>	<a href="http://beispiel.com/messsystem">http://beispiel.com/messsystem</a>
messsystemOnto:Messverfahren	<i>rdfs:label</i>	„Messverfahren“ <sup>de</sup>
messsystemOnto:Messverfahren	<i>rdfs:label</i>	„Measurement_Procedure“ <sup>en</sup>

Quelltext 4-2: Tripel für die Klasse *Messverfahren* der Ontologie *Messsysteme*

Die während der Entwicklung der Ontologie vorgesehenen Instanzen (Tabelle 4-4 und Tabelle 4-5) resultieren in je einem Tripel mit der Relation *rdf:type* um die jeweilige Klasse der Ontologie zuzuordnen. Für die Instanzen *Autofokus* und *In-Line* der Klassen *Messverfahren* respektive *Integrationsgrad* ist dies beispielhaft in Quelltext 4-3 dargestellt:

Subjekt	Prädikat	Objekt
messsystemOnto:Autofokus	<i>rdf:type</i>	messsystemOnto:Messverfahren
messsystemOnto:In-Line	<i>rdf:type</i>	messsystemOnto:Integrationsgrad

Quelltext 4-3: Tripel für die Instanzen *Autofokus* und *In-Line* der Klassen *Messverfahren* und *Integrationsgrad*

Die Summe aller Tripel können nun in Form eines Wissensgraphen dargestellt und in einer Graphdatenbank gespeichert werden. Zwei Knoten, die durch eine Verbindung miteinander verknüpft sind, entsprechen dabei genau einem Tripel (Abbildung 4-8).

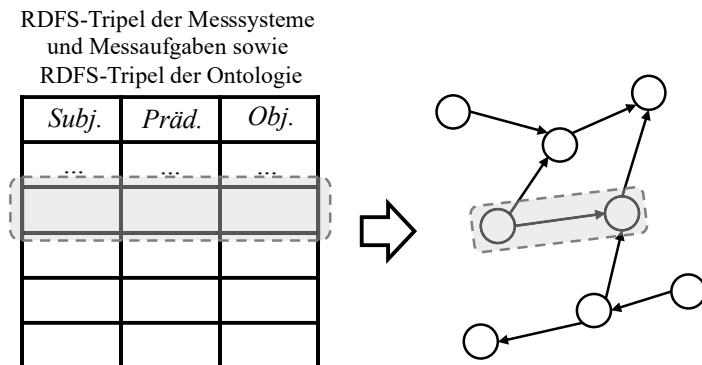


Abbildung 4-8: Speicherung der Tripel in Form eines Graphen

### 4.3.2 Analogieschlüsse mit dem Wissensgraphen

Der Wissensgraph basiert zu diesem Zeitpunkt allein auf manuell gesammeltem und gespeichertem Wissen. Aus diesem Grund wird der Wissensgraph im nächsten Schritt um Tripel aus den Analogieschlüssen erweitert. Dafür wird ein Embedding des Wissensgraphen erstellt. Das in diesem Kapitel beschriebene Vorgehen wird insbesondere nach der manuellen Erstellung des Wissensgraphen durchgeführt, sollte allerdings immer dann wiederholt werden, wenn sich der Wissensgraph signifikant durch neue, gelernte Fälle ändert. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass jederzeit sowohl bekanntes, validiertes Wissen als auch neue Vorschläge aus Analogieschlüssen vorliegen.

#### Metrik

Zur Bewertung des Embeddings sind geeignete Metriken notwendig. Hierfür werden *Hits@N* (Vgl. Formel 2-6) und Median Rank (Formel 2-7) verwendet. *Hits@N* bewertet, ob sich eine wahre Vorhersage unter den ersten  $N$  Vorhersagen befindet und eignet sich somit zur Beurteilung, ob ein Analogieschluss tatsächlich richtig ist. Für  $N$  wird 1, 3, 5 und 10 verwendet. Mit Median Rank wird die Genauigkeit der Vorhersagen des Embeddings bewertet und eignet sich zur Beurteilung des jeweiligen Modells des Embeddings. (Chen et al., 2020)

### Ermittlung des besten Modells für das Embedding

Zunächst wird ein Modell ermittelt, das für den vorliegenden Wissensgraphen in einem möglichst guten Ergebnis der Metriken resultiert. Dafür werden die in Tabelle 4-6 genannten Modelle getestet; für die drei Modellkategorien werden jeweils mehrere Modelle betrachtet. Für jedes Modell wird anschließend ein Embedding für Instanzen der Klassen und Relationen erstellt und das Ergebnis mit der Metrik bewertet.

Tabelle 4-6: Ausgewählte Modelle für die Erstellung eines Embeddings

Kategorie	Beispiele (Vgl. Kapitel 2.5.3)
Geometrische Modelle	<i>TransD, TransE, TransF, TransH, RotatE</i>
Tensor-Dekompositionsmodelle	<i>Complex, DistMult, HolE, RESCAL, QuatE</i>
Deep Learning Modelle	<i>ConvE, RGCN</i>

Für das Training der Modelle wird folgendes Vorgehen durchgeführt:

1. **Abrufen des Datensatzes:** Es werden alle Tripel von der Graphdatenbank abgerufen und gespeichert.
2. **Aufteilen des Datensatzes:** Die Tripel werden zufällig in einen Trainings-, Validierungs- und Testdatensatz geteilt (Aufteilung: 80% / 10% / 10%).
3. **Auswahl des Modells:** Aus den in Tabelle 4-6 genannten Modellen wird ein Modell ausgewählt.
4. **Erstellung des Embeddings:** Für das ausgewählte Modell und den vorbereiteten Datensatz wird ein Embedding mit Standardparametern<sup>38</sup> erstellt.
5. **Bewertung des Ergebnisses:** Das Embedding wird mit den Metriken *Hits@1, Hits@3, Hits@5 und Hits@10* und *MR* bewertet.
6. **Nächstes Modell:** Es wird mit Schritt 3 und dem nächsten Modell fortgefahren.

Um eine Vergleichbarkeit zwischen den Modellen zu gewährleisten, werden die gleiche Aufteilung des Datensatzes in Trainings-, Validierungs- und Testdatensatz und der gleiche Seed für das Training der Modelle verwendet.

<sup>38</sup> Als Standardparameter werden die Parameter verwendet, die in der jeweiligen Originalveröffentlichung des Modells als beste Parameter genannt sind.

## Hyperparameteroptimierung

Für das beste Modell werden nachfolgend die Hyperparameter, also die Parameter, die nicht vom Lernalgorithmus angepasst werden, optimiert. Dafür wird für die in Tabelle 4-7 gelisteten Modellparameter eine Gittersuche, also ein vollfaktorielles Training im genannten Parameterraum, durchgeführt. Eine eventuelle Verbesserung der Modellperformance wird wieder mit den Metriken *Hits@1*, *Hits@3*, *Hits@5* und *Hits@10* und *MR* bewertet.

Tabelle 4-7: Parameter für die Hyperparameteroptimierung (Gittersuche)

Hyperparameter	Werte
Embedding Dimensionen	[16...512, 32]
Verlustfunktion	MarginRanginkLoss, CrossEntropyLoss
Anzahl Epochen	[10...1000, 100]
Lernrate	[0,001...0,1, log]
Optimierungsfunktion	Adam, Adagrad, Stochastic Gradient Descent (SGD)

Das Zwischenergebnis nach der Hyperparameteroptimierung ist ein Embedding für Instanzen der Klassen und Relationen für den vorliegenden Wissensgraphen auf Basis eines Modells aus Tabelle 4-6 und optimierten Modellparametern im Parameterraum aus Tabelle 4-7 (s. Abbildung 4-9). Mit Hilfe dieses Embeddings können in den nachfolgenden Schritten Analogieschlüsse generiert werden.

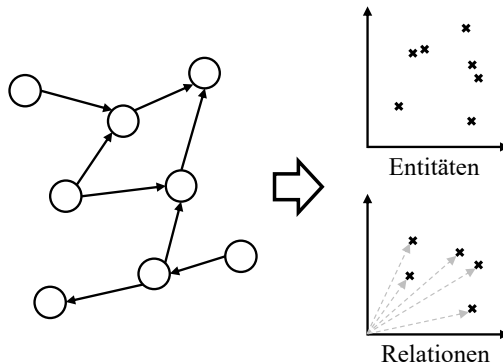


Abbildung 4-9: Erstellung eines Embeddings für Instanzen der Klassen und Relationen aus dem Graphen

### Vorhersage von Tripeln

Das Embedding wird nun genutzt, um Analogieschlüsse aus der Wissensbasis zu generieren. Das heißt es werden Tripel gesucht, die neu und nützlich, aber unsicher sind. Das Ziel sind insbesondere Tripel, die einer Messaufgabe ein potenziell geeignetes Messsystem zuordnen, um diese im späteren Verlauf als mögliche Lösung für eine neue Messaufgabe vorschlagen zu können.

Der Mechanismus zur Vorhersage wahrscheinlicher Tripel ist in Abbildung 4-10 schematisch dargestellt. An eine Klasse  $A$  wird eine Relation  $r$  angelegt. Am Zielpunkt der Relation  $r$  werden Klassen in unmittelbarer Nähe gesucht (im Beispiel die Klassen  $B, C, D, E, F$  und  $G$ ). Es wird ein Schwellwert festgelegt, wie weit eine Klasse vom Zielpunkt der Relation  $r$  entfernt sein darf, um als ausreichend sicher zu gelten (im Beispiel die Klassen  $B, C, D$  und  $E$ ; die Klassen  $F$  und  $G$  sind zu weit entfernt und demnach zu unwahrscheinlich). Für die als sicher geltenden Klassen werden Tripel erstellt; bestehend aus der Klasse  $A$  als Subjekt, der Relation  $r$  als Prädikat und der vorhergesagten Klasse als Objekt.

Die Vorhersage neuer Tripel wird automatisiert für das gesamte Embedding durchgeführt. Das Resultat ist eine Liste an Tripeln und einer zugehörigen Unsicherheit (sog. Score)<sup>39</sup>.

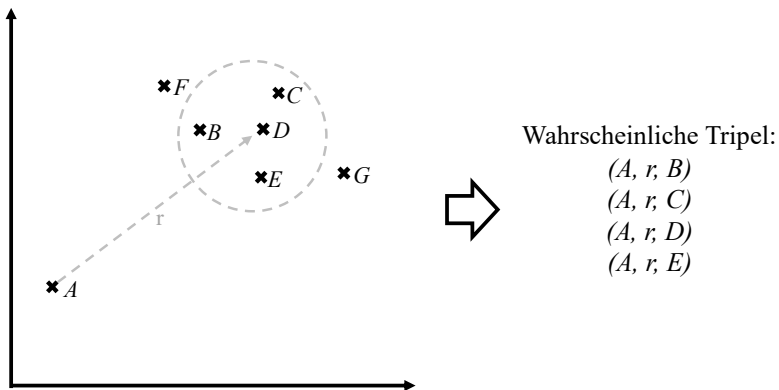


Abbildung 4-10: Vorhersage neuer Tripel mit Hilfe des Embeddings

<sup>39</sup> Zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit s. Kapitel 5.1.2



### Filterung von neuen Tripeln

Da ein Embedding nur ein angenähertes Modell des Wissensgraphen ist, können auch im Wissensgraph bereits gespeicherte Tripel, also bekanntes Wissen, vorhergesagt werden. Der Grund hierfür ist, dass auch ein bekanntes Tripel i.d.R. nicht exakt am Zielpunkt der Relation  $r$  liegt, sondern einen minimalen Abstand hat. Es wird demnach lediglich als sehr sicheres Tripel interpretiert.

Folglich wird als nächstes für jedes vorhergesagte Tripel geprüft, ob dieses bereits im Wissensgraphen gespeichert ist, um die Liste auf unbekannte Tripel zu reduzieren.

In Abbildung 4-11 wird das Beispiel aus Tabelle 4-2 und Tabelle 4-3 aufgegriffen und der obige Sachverhalt verdeutlicht. Im Beispiel ist Teil des validierten Wissens, dass ein Getriebebauteil mit dem Messgerät Zeiss O-Inspect 322 vermessen werden kann. Daher befindet sich dieses Messgerät in der Nähe des Ziels der Kante *messenMit*, wenn man diese an das *Getriebebauteil* anlegt. Das Messgerät Zeiss F25 befindet sich innerhalb der Grenze des Schwellwerts, daher kann dieses Messgerät ebenfalls geeignet sein. Das Messgerät Zeiss Metrotom 800 ist hingegen zu weit entfernt und würde nicht als wahrscheinliches Tripel erkannt werden.

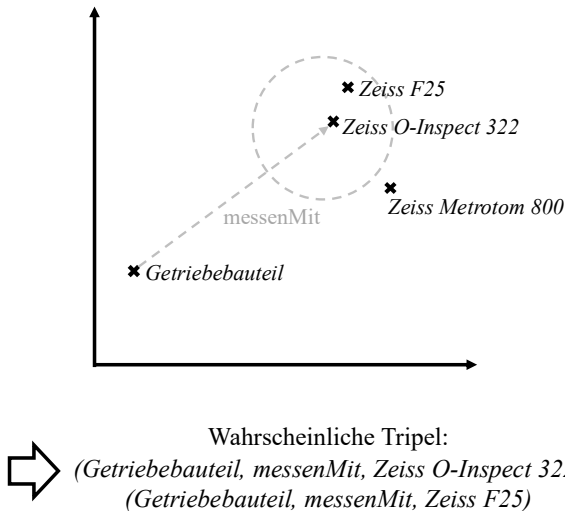


Abbildung 4-11: Beispiel für die Vorhersage wahrscheinlicher Tripel

### 4.3.3 Validierung des Wissensgraphen

#### SHACL-Shapes

Darüber hinaus gilt es zu überprüfen, ob die vorhergesagten Tripel der Ontologie entsprechen. Grundsätzlich können durch ein Embedding auch Verbindungen zwischen Klassen vorhergesagt werden, die in der Ontologie nicht vorgesehen sind. Durch die Validierung wird sichergestellt, dass alle Randbedingungen, die durch die Ontologie definiert sind (z.B. Relationen zwischen Klassen, Kardinalitäten oder Datentypen), eingehalten werden.

Die Validierung wird mittels SHACL durchgeführt. Für die Ontologie *Messsysteme* und *Messaufgaben* werden jeweils zugehörige SHACL-Shapes definiert.<sup>40</sup> Die Validierung wird computergestützt und automatisiert durchgeführt. Falls ein vorhergesagtes Tripel in einer Verletzung der SHACL-Shapes resultiert und nicht konform zur Ontologie ist, wird es aus der Liste der vorhergesagten Tripel entfernt.

Die verbleibenden Tripel, die neues, nützliches Wissen darstellen und ggü. der Ontologie validiert sind, werden anschließend in einem gesonderten Wissensgraphen gespeichert und stehen für zukünftige Abfragen zur Verfügung.

In Abbildung 4-12 ist das Vorgehen dieses Schrittes schematisch dargestellt. Die zuvor vorhergesagten Tripel  $(A, r, B)$ ,  $(A, r, C)$ ,  $(A, r, D)$  und  $(A, r, E)$  werden ggü. der Ontologie validiert; dabei verletzt das Tripel  $(A, r, D)$  beispielhaft eine Randbedingung und wird aus der Liste gestrichen. Die Tripel  $(A, r, B)$  und  $(A, r, C)$  befinden sich bereits im Wissensgraphen und stellen kein neues Wissen dar. Das Tripel  $(A, r, E)$  ist neu und zur Ontologie konform und wird somit im Wissensgraphen gespeichert.

---

<sup>40</sup> Die vollständigen SHACL-Shapes der Ontologien *Messsysteme* und *Messaufgaben* sind in dem zu dieser Arbeit gehörenden Datensatz enthalten (s. Kapitel 5).

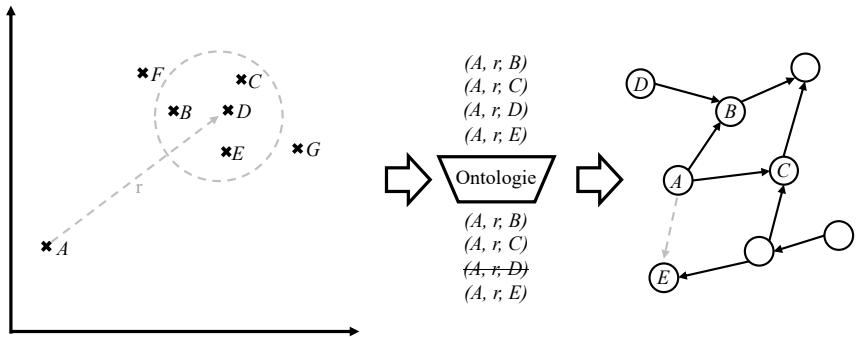


Abbildung 4-12: Speicherung von neuen, Ontologie-konformen Tripeln im Graphen

#### 4.3.4 Bereitstellung des Wissensgraphen

##### Entscheidungsunterstützungssystem

Für eine anwenderfreundliche Suche auf dem Wissensgraphen, ist die Entwicklung einer Benutzeroberfläche für das Entscheidungsunterstützungssystem notwendig, das die Methodik fallbasiertes Schließen nach Aamodt & Plaza (1994) implementiert. Das System sollte einen geeigneten Abstraktionsgrad aufweisen, damit es auch von Anwendern ohne Expertise zu Wissensgraphen und fallbasiertem Schließen genutzt werden kann. Das im Entscheidungsunterstützungssystem implementierte Vorgehen ist in Abbildung 4-13 dargestellt.

Zunächst beschreibt der Anwender seine vorliegende Messaufgabe. Die relevanten Merkmale, die eine Messaufgabe beschreiben, resultieren aus den Klassen der Ontologie *Messaufgabe*. Für jede der Klassen gibt es eine Filteroption. Die beschriebene Messaufgabe wird mit der Fallbasis verglichen und ähnliche, im Wissensgraph gespeicherte Messaufgaben abgerufen. Für diese Messaufgaben werden die gespeicherten Messsysteme extrahiert. Dabei werden sowohl die bereits validierten Messsysteme als auch die Messsysteme aus den Analogieschlüssen berücksichtigt. Sollte die Wissensbasis für die beschriebene Messaufgabe keine potenziell geeigneten Messsysteme aufweisen, soll dem Nutzer zumindest ein geeignetes Messverfahren vorgeschlagen werden. Dieses Messverfahren wird aus der Verbindung zwischen den Klassen *Messaufgabe* und *Messverfahren* gezogen. Die dem Anwender vorgeschlagenen Messsysteme und Messverfahren werden zusammen mit einer Wahrscheinlichkeit

visualisiert, damit der Anwender die potenzielle Eignung der Vorschläge für seine Messaufgabe bewerten kann. Dies entspricht dem Qualitätsmaß der Fallrepräsentationen beim fallbasierten Schließen. Ebenso werden die Messaufgaben des Ähnlichkeitsvergleichs dargestellt, damit der Entscheidungsweg des Systems vom Anwender nachvollzogen werden kann.

Wenn ein geeignetes Messsystem gefunden wurde und dies vom Anwender getestet und validiert wurde, wird die eingangs beschriebene Messaufgabe sowie das Messsystem als gelernter Fall im Wissensgraphen gespeichert. Dieser Fall steht für zukünftige Abfragen zur Verfügung. Sobald sich der Wissensgraph durch eine ausreichende Anzahl gelernter Fälle vergrößert, können die Methoden zur Generierung von Analogieschlüssen erneut angewendet werden, um die wiederum neuen Empfehlungen nutzbar zu machen.

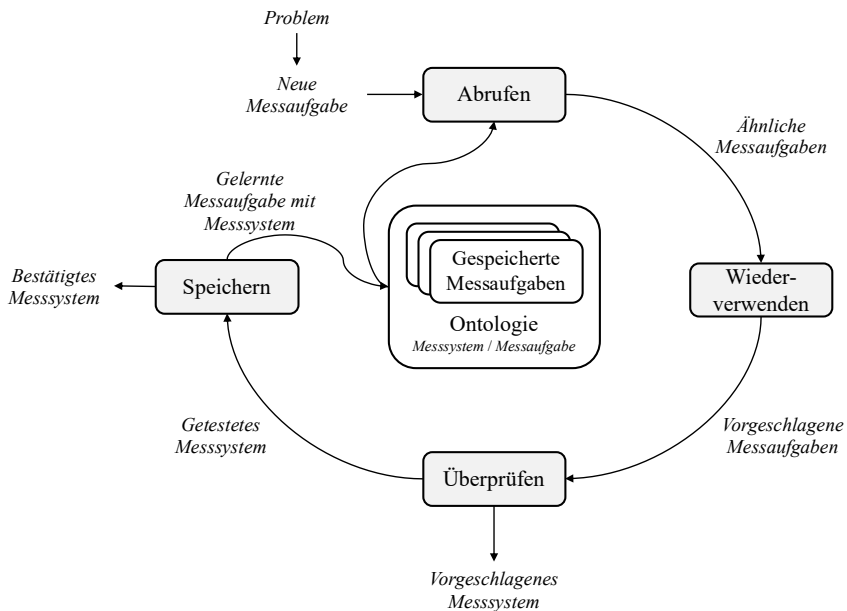


Abbildung 4-13: Problemlösungszyklus für fallbasiertes Schließen neuer Messsysteme aus bekannten Messaufgaben (in Anlehnung an Abbildung 2-2)

## Aufbau der Suche

In Quelltext 4-4 ist der Grundaufbau des SPARQL-Queries dargestellt, der für die Suche auf dem Wissensgraphen nach Messsystemen und Messverfahren für eine beschriebene Messaufgabe verwendet wird.

Zunächst werden die Präfixe für RDF und RDFS sowie für die Ontologien Messsysteme und Messaufgabe definiert.

Das *SELECT*-Statement definiert die Variablen, nach denen gesucht wird. Das Ergebnis sollen *Messsysteme*, *Messverfahren* und *Messaufgaben* enthalten.

Das *WHERE*-Statement definiert, in welcher Beziehung die Variablen des *SELECT*-Statements stehen. Es soll nach Messsystemen (Relation *measureWithSystem*) oder Messverfahren (Relation *measureWithProcedure*) gesucht werden, mit denen die Messaufgabe durchgeführt werden kann. Sämtliche Beschreibungen zur Variable *Messaufgabe* sind nicht Teil des Grundaufbaus des SPARQL-Queries, sondern hängen von der Nutzereingabe ab. Für jede Klasse der Ontologie Messaufgabe, für die der Anwender im Entscheidungsunterstützungssystem eine Angabe macht, wird der SPARQL-Query dynamisch erweitert. Da diese meist die Messung beschreiben, wird die Verbindung zwischen der Messaufgabe und der Messung im SPARQL-Query bereits eingefügt (Relation *hasObjective*). Auf diese Weise wird die Suche mit jeder Eingabe weiter verfeinert.

Das *LIMIT*-Statement limitiert die Anzahl der Ergebnisse auf 100.

```

PREFIX messsystemontology: <http://ontologies.metaphacts.com/mess-messsystem/>
PREFIX messaufgabeontology: <http://ontologies.metaphacts.com/mess-messaufgabe/>

SELECT ?messaufgabe ?messverfahren ?messsystem
WHERE
{
  { ?messung messaufgabeontology:measureWithSystem ?messsystem . }
  { ?messsystem messsystemontology:measureWithProcedure ?messverfahren . }
  { ?messaufgabe messaufgabeontology:hasObjective ?messung . }
}
LIMIT 100

```

Quelltext 4-4: Grundaufbau des SPARQL-Queries für die Suche auf dem Wissensgraphen

## Nachvollziehbarkeit des Ergebnisses

Damit die Qualität der Vorschläge des Entscheidungsunterstützungssystems für einen Anwender nachvollziehbar ist, wird für jeden Vorschlag, der aus einem Analogieschluss

resultierte, eine Wahrscheinlichkeit angegeben. Diese Wahrscheinlichkeit *prob* wird auf Basis des Scores *score* des Embeddings (Vgl. Kapitel 2.5.3) gemäß Formel 4-1 berechnet. Diese Formel basiert auf der Sigmoidfunktion.

$$prob = \frac{1}{1 + e^{-score}} \quad 4-1$$

An dieser Stelle sei angemerkt, dass der Wert *prob* nicht die absolute Wahrscheinlichkeit widerspiegelt, wie das Messsystem oder das Messverfahren die zugrundeliegende Messaufgabe tatsächlich löst. Eine solche absolute Angabe ist nicht möglich, da ein Embedding lediglich ein Modell ist und der *score* keine absoluten Aussagen zulässt. Dennoch kann durch den Wert ein Vergleich zwischen allen Vorschlägen durchgeführt werden und hilft bei der Entscheidungsfindung.

## 5 Ergebnisse der exemplarischen Implementierung

In diesem Kapitel wird das zuvor beschriebene Vorgehen exemplarisch implementiert und validiert. In Kapitel 5.1 wird zunächst ein Wissensgraph nach dem in Kapitel 4.3 beschriebenen Vorgehen aufgebaut. In Kapitel 5.2 wird das Entscheidungsunterstützungssystem mit beispielhaften Messaufgaben validiert und die Eignung der vorgeschlagenen Messsysteme experimentell erprobt.

Als Beispiel für die Erstellung des Wissensgraphen dient die Batteriezellfertigung. Am wbk Institut für Produktionstechnik liegt hierzu umfangreiches Erfahrungswissen aus Forschungsprojekten und Dissertationen vor, sodass sich diese Branche zur Erstellung der initialen Wissensbasis eignet. Im Projekt BMWK SmartBatteryMaker *Neuartiges Anlagenkonzept zur flexiblen Herstellung von Lithium-Ionen Pouch-Zellen* (Förderkennzeichen: 3-4332.62-KIT/9) wurde die Qualität von Li-Ionen-Zellen mittels optischer Messtechnik (insbesondere Kameratechnik) überprüft. Im Projekt BMWK / BMBF AgiloBat *Aufbau eines agilen Produktionssystems für die format-, material- und stückzahlflexible Pouch-Zellen* (Förderkennzeichen: 03XP0369A) wird sowohl In-Line-fähige Sensorik in den Produktionsprozess von Li-Ionen-Zellen integriert als auch an übergeordneten Qualitätsmetriken gearbeitet.

Als Beispiel für die Validierung des Entscheidungsunterstützungssystems dient die Brennstoffzellenfertigung. Diese Branche weist unreife Produktionsprozesse mit bislang ungelösten Messaufgaben vor. In verschiedenen Forschungsprojekten wurde am wbk Institut für Produktionstechnik bereits Erfahrung gesammelt, allerdings liegt diese nicht im gleichen Maße wie für die Batteriezellfertigung vor. Im Projekt BMVi EMSigBZ *Entwicklung eines modularen und skalierbaren Produktionssystems zur Herstellung von Brennstoffzellen-Stacks* (Förderkennzeichen: 03B11012C) wurden Herausforderungen für eine Produktionsanlage von PEM-Brennstoffzellenstacks in Großserienstückzahlen betrachtet. Im Projekt WM KliMEA *Klimaadaptive und Modellgestützte MEA-Fertigung* (Förderkennzeichen: 3-4332.62-KIT/14) wurden die Möglichkeiten lokaler Mikro-Environments für die MEA-Fertigung einer PEM-Brennstoffzelle untersucht.

Unter folgender DOI sind die Ergebnisse dieser Arbeit zu finden: DOI: 10.35097/1699. Dort enthalten sind die Ontologien im RDF/XML-Format, die Tabellen für Messsysteme und Messaufgaben und deren Konvertierung in RDF-Tripel.

## 5.1 Instanziierung des Wissensgraphen am Beispiel der Batterie-zellfertigung

In Kapitel 4.3 wurde das allgemeine Vorgehen zur Erstellung einer Wissensbasis für das Entscheidungsunterstützungssystem beschrieben, das für diese Arbeit entwickelt wurde. Dieses Verfahren wird nun am Beispiel der Batteriezellfertigung angewandt: in Kapitel 5.1.1 wird der Wissensgraph zunächst erstellt. In Kapitel 5.1.2 werden Analogieschlüsse aus der Wissensbasis generiert. In Kapitel 5.1.3 wird die Wissensbasis mit SHACL-Shapes validiert. In Kapitel 5.1.4 erfolgt dann die Bereitstellung des Systems in einem Entscheidungsunterstützungssystem.

### 5.1.1 Erstellung des Wissensgraphen

#### Datensammlung

Für den Aufbau einer ersten Datenbasis werden zwei Tabellen für Messsysteme und Messaufgaben erstellt. Die Tabellen enthalten in Spalten die Klassen und Relationen der jeweiligen Ontologien. Ein Beispiel für die Tabelle für Messsysteme ist in Abbildung 5-1 dargestellt; aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde die Tabelle in der Mitte geteilt und in zwei Zeilen dargestellt. Alle gesammelten Messsysteme sind in Tabelle 5-1 gelistet; aus Gründen der Übersichtlichkeit wird nur der Name des Messsystems und das zugehörige Messverfahren genannt. In Tabelle 5-2 sind alle gesammelten Messaufgaben gelistet; aus Gründen der Übersichtlichkeit wird nur der Name der Messaufgabe, ggf. die zugehörige Branche und das zugehörige Messverfahren genannt. Es wurden insgesamt 86 Messsysteme und 170 Messaufgaben gesammelt.

Die Liste der Messsysteme wurde aus am wbk Institut für Produktionstechnik vorhandenen Messsystemen und Internetrecherchen erstellt. Die Liste der Messaufgaben wurde aus aktueller Fachliteratur und Erfahrungswissen am wbk Institut für Produktionstechnik (insbesondere aus den Forschungsprojekten *SmartBatteryMaker* und *AgiloBat*) erstellt.

Die vollständigen Tabellen sind im veröffentlichten Datensatz einsehbar.



Messsystem	Messverfahren	Hilfseinrichtung	Freih	Messobjektschnittstel	Messgerät
SYSTEM_ImageIR_9400 Blitzlampe	Aktive_Thermografie	Blitzlampe	6	Nicht-beruehrend	ImageIR_9400
SYSTEM_ImageIR_9400 Blitzlampe	Aktive_Thermografie	Blitzlampe	6	Nicht-zerstoerend	ImageIR_9400
SYSTEM_ImageIR_9400 Blitzlampe	Passive_Thermografie	Blitzlampe	6	Nicht-beruehrend	ImageIR_9400
SYSTEM_ImageIR_9400 Blitzlampe	Passive_Thermografie	Blitzlampe	6	Nicht-zerstoerend	ImageIR_9400
SYSTEM_ImageIR_5385_S Blitzlampe	Aktive_Thermografie	Blitzlampe	6	Nicht-beruehrend	ImageIR_5385_S
SYSTEM_ImageIR_5385_S Blitzlampe	Aktive_Thermografie	Blitzlampe	6	Nicht-zerstoerend	ImageIR_5385_S
SYSTEM_ImageIR_5385_S Blitzlampe	Passive_Thermografie	Blitzlampe	6	Nicht-beruehrend	ImageIR_5385_S
SYSTEM_ImageIR_5385_S Blitzlampe	Passive_Thermografie	Blitzlampe	6	Nicht-zerstoerend	ImageIR_5385_S
SYSTEM_Endmass_6mm	Laengenmessung	Endmass_6mm		Beruehrend	
SYSTEM_Endmass_6mm	Laengenmessung	Endmass_6mm		Nicht-zerstoerend	
SYSTEM_ImageIR_5385_S Lasertriangulationsportal	Aktive_Thermografie	Lasertriangulationsportal	6	Nicht-beruehrend	ImageIR_5385_S
SYSTEM_ImageIR_5385_S Lasertriangulationsportal	Aktive_Thermografie	Lasertriangulationsportal	6	Nicht-zerstoerend	ImageIR_5385_S
SYSTEM_ImageIR_5385_S Lasertriangulationsportal	Passive_Thermografie	Lasertriangulationsportal	6	Nicht-beruehrend	ImageIR_5385_S

Hersteller	Frequenz	Preis	Messzeit	SI-Einheit	Unterer Messbereich	Oberer Messbereich	Auflösung	TRL
InfraTec	180	160000		°C	-40	1500	1	9
InfraTec	180	160000		°C	-40	1500	1	9
InfraTec	180	160000		°C	-40	1500	1	9
InfraTec	180	160000		°C	-40	1500	1	9
InfraTec	481	80000		°C			1	8
InfraTec	481	80000		°C			1	8
InfraTec	481	80000		°C			1	8
InfraTec	481	80000		°C			1	8
Guedner		50						
Guedner		50						
InfraTec	481	80000		°C			1	8
InfraTec	481	80000		°C			1	8
InfraTec	481	80000		°C			1	8

Abbildung 5-1: Auszug aus der Tabelle für Messsysteme (Tabelle in der Mitte geteilt und in zwei Zeilen dargestellt)

Tabelle 5-1: Messsysteme mit Messverfahren in Klammern (Ebene M<sub>0</sub>)

Advanced Energy IN 500 (Temperaturmessung)	InfraTec ImageIR 9400 (Passive Thermografie)
Alicona µCMM (Fokusvariation)	Ino MICROXCAM-3841 (Terahertzstrahlung)
Alicona µCMM (Koordinatenmesstechnik)	Jeol JSM-6010 PLUSLV (Rasterelektronenmikroskopie)
Allied Vision Technologies GmbH Kamera Manta G-235B Mono (2D Kamerasystem)	Kern ABT 220-5 DNM (Gewichtsmessung)
Ametek Solatron Model 1260A (Impedanzmessung)	Kern EW 220-3NM (Gewichtsmessung)
ATP Barcol-Härteprüfgerät (Härteprüfung)	Kern PCB 2500-2 (Gewichtsmessung)
ATP SMT-500 (Drehzahlmessung)	Keyence LJ-V7060 (Lasertriangulation)
Balluff BVS002A (2D Kamerasystem)	Keyence VHX-7000 (Lichtmikroskopie)
Basler Ace acA2500 (2D Kamerasystem)	Kienzle Kontavisor (Fluoreszenzspektroskopie)
Bosch Rexroth Wägetransmitter WTS (Elektrischer Messverstärker)	Kinexon RTLS (Positionsbestimmung)
Brüel & Kjær LDS V406 (Modalanalyse)	Kistler Type 6005 (Druckmessung)
Faro FaroARM Platinum (Koordinatenmesstechnik)	Kistler Type 8628 B-50 (Beschleunigungsmessung)
FLIR One Pro (Temperaturmessung)	Kistler Type 9049 (Drehmomentmessung)
Fluke Type 114 (Multimeter)	Kistler Type 9217 (Kraftmessung)
Fluke Type 175 (Multimeter)	Kracht Type TM 1,1 TR 320S (Volumenstrommessung)
Fluke Type 45 (Multimeter)	Kracht Type VC 0,04 (Volumenstrommessung)
Fluke Type 6304 (Impedanzmessung)	Kron Chronos 1.4 (2D Kamerasystem)
Fluke Type 8845A (Multimeter)	Mahr Digital-Bügelmessschraube Micromar 40 (Längenmessung)
Framos Depth Camera D435e Starter Kit (Active IR Stereo Vision)	MenloSystems K15 (Terahertzstrahlung)
FRT CWL (Längenmessung)	optibelt TT (Frequenzmessung)
FRT CWL (Weisslichtinterferometrie)	Pesola Federwaage Macro Line 20 kg (Gewichtsmessung)
Garant Digitaler Messschieber 150 mm (Längenmessung)	Pesola Federwaage Macro Line 50 kg (Gewichtsmessung)
Garant Digitaler Messschieber 300 mm (Längenmessung)	Precitec CHRcodile SE (Konfokale Mikroskopie)

GOM Atos Q (3D Kamerasystem)	Precitec CHRcodile SE (Längenmessung)
GoPro HERO7 (2D Kamerasystem)	Precitec CHRcodile SE (Reflektometrie/Interferenzspektroskopie)
Greisinger GFTB 200 (Luftdruckmessung)	Qass Optimizer4D (Schallemission)
Greisinger GFTB 200 (Luftfeuchtemessung)	Röckle Horizontal Wasserwaage (Ausrichtwerkzeug)
Greisinger GFTB 200 (Temperaturmessung)	Schmalz VS-V-SA-M5 (Druckmessung)
Güldner (Längenmessung)	Stiefelmayer Kurbelzapfen-Wasserwaage (Ausrichtwerkzeug)
HBM Wegaufnehmer W1T3 (Längenmessung)	Stiefelmayer Maschinenwasserwaage (Ausrichtwerkzeug)
HD Vision Systems LumiScanX (Machine Vision)	Tesa Digitaler Messschieber 150 mm (Längenmessung)
Heidenhain ST 1288 (Längenmessung)	Voltkraft K101 (Temperaturmessung)
HHW Messuhr 1 mm (Längenmessung)	Xarion Membranfreies optisches Mikroskop (Schallemission)
HHW Messuhr 10 mm (Längenmessung)	Zeiss F25 (Koordinatenmesstechnik)
HHW Messuhr 2 mm (Längenmessung)	Zeiss Metrotom 800 (Computertomographie)
HHW Messuhr 50 mm (Längenmessung)	Zeiss O-Inspect 322 (Koordinatenmesstechnik)
IDS UI-3240LE-C-H-Q (Machine Vision)	Zeiss Stemi 508 (Lichtmikroskopie)
IDS UI-3260CP-C-HQ Rev 2 (Machine Vision)	Zeiss Stemi SV 11 (Lichtmikroskopie)
IDS UI-3290SE (Machine Vision)	Zeiss SurfMax (Deflektometrie)
IDS UI-3590CP-C-HQ Rev.2 (Machine Vision)	Zeiss T-Scan 10 (Optische 2D-/3D-Messtechnik)
ifm PA3022 (Druckmessung)	
ifm PA3023 (Druckmessung)	
ifm SD8000 (Volumenstrommessung)	
InfraTec ImageIR 5385 S (Aktive Thermografie)	
InfraTec ImageIR 5385 S (Passive Thermografie)	
InfraTec ImageIR 9400 (Aktive Thermografie)	

Tabelle 5-2: Messaufgaben mit Messverfahren in Klammern (Ebene M<sub>0</sub>)

Abstand (2D Kamerasystem)	Beschichtungsprüfung Wasser (Deflektometrie)
Abstand (Autofokus)	Beschichtungsprüfung Wasser (Ellipsometrie)
Abstand (Computertomographie)	Beschichtungsprüfung Wasser (Photogrammetrie)
Abstand (Fokusvariation)	Brennstoffzelle: Falten (Aktive Thermografie)
Abstand (Konfokale Mikroskopie)	Brennstoffzelle: Falten (Terahertzstrahlung)
Abstand (Koordinatenmesstechnik)	Brennstoffzelle: Feuchtigkeitsmessung (Impedanzmessung)
Abstand (Lasertriangulation)	Brennstoffzelle: Feuchtigkeitsmessung (Terahertzstrahlung)
Abstand (Lichtfeldkamera)	Erhebungen (Deflektometrie)
Abstand (Photogrammetrie)	Feste Einschlüsse (Aktive Thermografie)
Abstand (Radioskopie)	Feste Einschlüsse (Computertomographie)
Abstand (Weisslichtinterferometrie)	Feste Einschlüsse (Deflektometrie)
Additive Fertigung: Porendetektion (Computertomographie)	Feste Einschlüsse (Radioskopie / Gammastrahlung)
Additive Fertigung: Porendetektion (Schallemission)	Feste Einschlüsse (Terahertzstrahlung)
Aluminiumkorrosion (Ellipsometrie)	Feste Einschlüsse (Ultraschall)
Aluminiumkorrosion (Infrarotspektroskopie)	Feste Einschlüsse (Wirbelstromverfahren)
Aluminiumkorrosion (Konfokale Mikroskopie)	Gratdetektion (Deflektometrie)
Aluminiumkorrosion (Reflektometrie/Interferenzspektroskopie)	Gratdetektion (Konfokale Mikroskopie)
Batterie: Benetzungsfehler des Haftvermittlers (Infrarotspektroskopie)	Gratdetektion (Lasertriangulation)
Batterie: Benetzungsfehler des Haftvermittlers (Konfokale Mikroskopie)	Gratdetektion (Photogrammetrie)
Batterie: Benetzungsfehler des Haftvermittlers (Reflektometrie/Interferenzspektroskopie)	Kratzer (Deflektometrie)
Batterie: Dichtheitsprüfung (Passive Thermografie)	Kupferkorrosion (Deflektometrie)
Batterie: Dichtheitsprüfung (Weisslichtinterferometrie)	Kupferkorrosion (Ellipsometrie)
	Länge (2D Kamerasystem)

---

Batterie: Elektrische Isolationsprüfung (Gewichtsmessung)	Länge (Computertomographie)
Batterie: Elektrische Isolationsprüfung (Impedanzmessung)	Länge (Konfokale Mikroskopie)
Batterie: Filmhomogenitätsmessung Beschichten (Lasertriangulation)	Länge (Koordinatenmesstechnik)
Batterie: Funktionsprüfung Zelle (Radioskopie)	Länge (Laserinterferometrie)
Batterie: HV Festigkeitsprüfung (2D Kamerasystem)	Länge (Lasertriangulation)
Batterie: Korrosionsprüfung Gehäuse	Länge (Photogrammetrie)
Batterie: Korrosionsprüfung Gehäuse (Streulichtverfahren)	Länge (Radioskopie)
Batterie: Leitfähigkeitsprüfung Fügestellen (Ultraschall)	Länge (Schattenwurf)
Batterie: Leitfähigkeitsprüfung Fügestellen (Widerstandsmessung)	Länge (Streifenprojektion)
Batterie: Messung der Lösungsmittelkonzentration (2D Kamerasystem)	Länge (Weisslichtinterferometrie)
Batterie: Messung der Lösungsmittelkonzentration (Energiedispersive Röntgenspektroskopie)	Leichtbau: Delamination (Aktive Thermografie)
Batterie: Messung Elektrolytmenge (Lasertriangulation)	Leichtbau: Delamination (Computertomographie)
Batterie: Oberflächenprüfung nach Laserschneiden (2D Kamerasystem)	Lochtiefe (Computertomographie)
Batterie: Oberflächenprüfung nach Vereinzeln (Chromatisch-konfokale Abstandsmessung)	Lochtiefe (Koordinatenmesstechnik)
Batterie: Oberflächenprüfung nach Vereinzeln (Lasertriangulation)	Lochtiefe (Laserinterferometrie)
Batterie: Oberflächenprüfung nach Vereinzeln (Machine Vision)	Lochtiefe (Photogrammetrie)
Batterie: Oberflächenprüfung nach Vereinzeln (Ultraschall)	Lochtiefe (Radioskopie)
Batterie: Oberflächenprüfung Zellhülle (Deflektometrie)	Lochtiefe (Weisslichtinterferometrie)
Batterie: Oberflächenprüfung Zellhülle (Fluoreszenzspektroskopie)	Partikeldetektion (Deflektometrie)
Batterie: Positionsbestimmung Stapeln (Machine Vision)	Partikeldetektion (Konfokale Mikroskopie)
Batterie: Positionsbestimmung Stapeln (Widerstandsmessung)	Partikeldetektion (Photogrammetrie)
Batterie: Positionsbestimmung Zellmodule (Druckmessung)	Position (Computertomographie)
Batterie: Positionsbestimmung Zellmodule (Machine Vision)	Position (Fluoreszenzspektroskopie)
Batterie: Prüfung auf Fettverunreinigung auf Ableitern (Fluoreszenzspektroskopie)	Position (Laserinterferometrie)
Batterie: Prüfung auf Ölverunreinigung auf Ableitern (Fluoreszenzspektroskopie)	Position (Lasertriangulation)
Batterie: Prüfung auf Verunreinigung am Gehäuse	Position (Photogrammetrie)
Batterie: Prüfung auf Verunreinigung am Gehäuse (Streulichtverfahren)	Position (Radioskopie)
Batterie: Prüfung Benetzungsfehler Klebstoff (Ultraschall)	Position (Weisslichtinterferometrie)
Batterie: Prüfung Form Kleberaube (Ultraschall)	Radius (2D Kamerasystem)
Batterie: Prüfung Risse/Einschlüsse Kleberaube (Aktive Thermografie)	Radius (Computertomographie)
	Radius (Koordinatenmesstechnik)
	Radius (Photogrammetrie)
	Radius (Radioskopie)
	Radius (Schattenwurf)
	Rauhigkeit (Streifenprojektion)
	Rissdetektion geschlossen (Aktive Thermografie)
	Rissdetektion geschlossen (Computertomographie)
	Rissdetektion geschlossen (Magnetischer Streufluss)
	Rissdetektion geschlossen (Passive Thermografie)
	Rissdetektion geschlossen (Radioskopie / Gammastrahlung)
	Rissdetektion geschlossen (Resonanzanalyse)
	Rissdetektion geschlossen (Schallemision)
	Rissdetektion geschlossen (Terahertzstrahlung)
	Rissdetektion geschlossen (Ultraschall)
	Rissdetektion geschlossen (Widerstandsmessung)

---

---

Batterie: Qualitätsprüfung Separator (2D Kamerasystem)	Rissdetektion offen (Aktive Thermografie)
Batterie: Qualitätsprüfung Separator (Machine Vision)	Rissdetektion offen (Computertomographie)
Batterie: Qualitätsprüfung Slurry (Absorptionsspektroskopie)	Rissdetektion offen (Farbeindringprüfung)
Batterie: Qualitätsprüfung Trocknen (Machine Vision)	Rissdetektion offen (Magnetischer Streufluss)
Batterie: Qualitätsprüfung Trocknen (Mikro-Raman-Spektroskopie)	Rissdetektion offen (Optische 2D-/3D-Mess-technik)
Batterie: Qualitätsprüfung Zelle (Passive Thermografie)	Rissdetektion offen (Passive Thermografie)
Batterie: Randprofilmessung Beschichten (2D Kamerasystem)	Rissdetektion offen (Radioskopie / Gammastrahlung)
Batterie: Schichtdickenmessung Elektroden (Laserinterferometrie)	Rissdetektion offen (Resonanzanalyse)
Batterie: Schichtdickenmessung Elektroden (Lasertriangulation)	Rissdetektion offen (Schallemission)
Batterie: Schweissnahtprüfung Modul (Radioskopie)	Rissdetektion offen (Terahertzstrahlung)
Batterie: Schweissnahtprüfung Modul (Widerstandsmessung)	Rissdetektion offen (Ultraschall)
Batterie: Thermomanagementprüfung (Passive Thermografie)	Rissdetektion offen (Widerstandsmessung)
Batterie: Thermomanagementprüfung (Viskositätsmessung)	Rissdetektion offen (Wirbelstromverfahren)
Beschichtungsprüfung Fette (Infrarotspektroskopie)	Schichtdicke (Ellipsometrie)
Beschichtungsprüfung Fette (Reflektanzerfassung)	Schichtdicke (Fluoreszenzspektroskopie)
Beschichtungsprüfung Fette (Röntgenfluoreszenzspektroskopie)	Schichtdicke (Kapazitive Verfahren)
Beschichtungsprüfung Öle (Ellipsometrie)	Schichtdicke (Wirbelstromverfahren)
Beschichtungsprüfung Öle (Fluoreszenzspektroskopie)	Schnitte (Deflektometrie)
Beschichtungsprüfung Öle (Infrarotspektroskopie)	Schweissnahtprüfung (Koordinatenmesstechnik)
Beschichtungsprüfung Öle (Röntgenfluoreszenzspektroskopie)	Spritzerdetektion (Konfokale Mikroskopie)
	Spritzerdetektion (Magnetpulver)
	Spritzerdetektion (Photogrammetrie)
	Welligkeit (Reflektanzerfassung)
	Winkel (2D Kamerasystem)
	Winkel (Computertomographie)
	Winkel (Konoskopische Holographie)
	Winkel (Koordinatenmesstechnik)
	Winkel (Laserinterferometrie)
	Winkel (Radioskopie)
	Winkel (Weisslichtinterferometrie)

---

## Datenaufbereitung

Die Tabellen der Messsysteme und Messaufgaben werden nun in RDF-Tripel transformiert. Da jede Spalte der Tabellen eine Relation der Ontologien repräsentiert, kann eine eindeutige Zuordnung vorgenommen werden. Für das sog. Mapping wird OntoRefine (basiert auf OpenRefine<sup>41</sup>) verwendet. In Abbildung 5-2 ist die Benutzeroberfläche dieser Software dargestellt. Nach dem Import der Excel-Tabelle kann jede Spalte der Tabelle in ein gewünschtes Tripel transformiert werden. Diese Zuordnung wird zeilenweise dargestellt. Die Ontologie wird ebenfalls in RDFS-Tripel transformiert. Es resultieren insgesamt 2597 Tripel, die die Ontologien und die Datenbasis beschreiben.

Diese werden anschließend in einer Graphdatenbank (entspricht Ebene  $M_0$ , vgl. Kapitel 2.4.2) gespeichert. In Abbildung 5-3 ist ein Screenshot der Benutzeroberfläche der verwendeten Software (GraphDB) für die Speicherung der RDF-Tripel gezeigt. Da die Datenbank über eine SPARQL- und REST API-Schnittstelle verfügt, wird die Benutzeroberfläche nur für etwaige Visualisierungen auf Datenbankebene benötigt. Für jeden in der Datenbank angelegten Graphen kann eine Liste der Tripel (als Subjekt, Prädikat, Objekt dargestellt) angezeigt werden. Zudem wird der Kontext angezeigt; dies ist eine eindeutige URL, unter der der jeweilige Graph abgerufen werden kann. Die Unterscheidung zwischen validiertem Expertenwissen und Tripeln aus Analogieschlüssen wird später anhand des Kontexts vorgenommen.

---

<sup>41</sup>OpenRefine ist ein kostenloses Open-Source-Tool für die Arbeit mit unübersichtlichen Daten: es ermöglicht die Transformation von tabellarisch vorliegenden Daten in RDF-Mappings in einer grafischen Benutzeroberfläche. (Unter: <https://github.com/OpenRefine/OpenRefine>, zuletzt aufgerufen am: 28.09.2023)

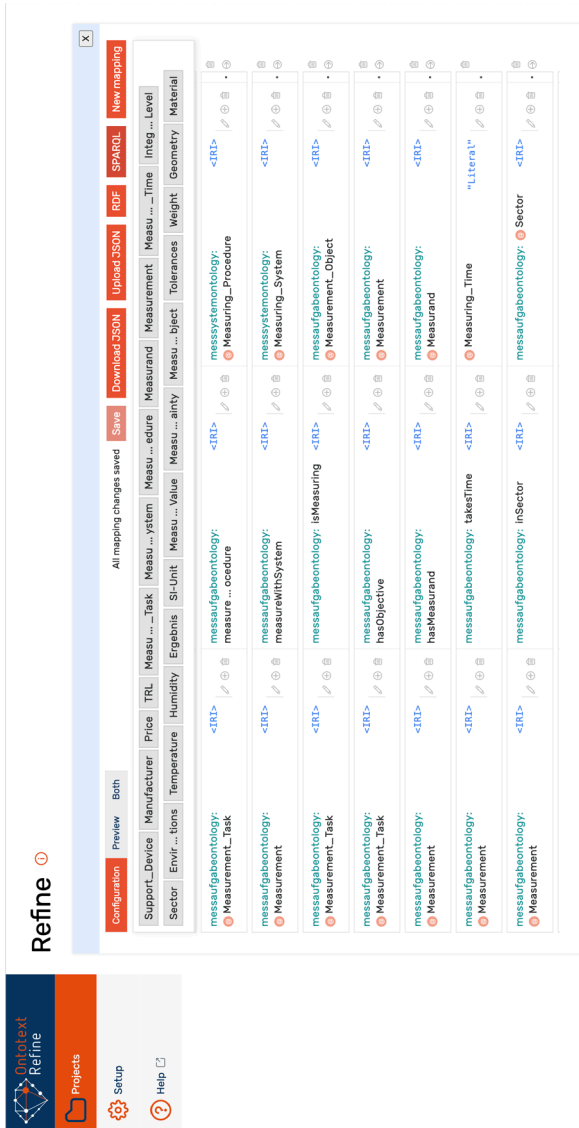



Abbildung 5-2: Screenshot der Benutzeroberfläche von OntoRefine zur Erstellung von RDF-Tripeln aus strukturierten Daten



- Import
- Explore
- Graphs overview
- Class hierarchy
- Class relationships
- Visual graph
- Similarity
- SPARQL
- Monitor
- Setup
- Help

## completion ✎

Source: <http://ontologies.metaphacts.com/completion>

Explicit only ▼ Show Blank Nodes Download as

metaphactory ▼

manager ▼

en ▼

	subject	predicate	object	context	all
	subject	predicate	object	context	all
1	messaufgabeontology/Abstand	messaufgabeontology/measureWithProcedure	messaufgabeontology/2D%20Kamerasytem	http://ontologies.metaphacts.com/completion	
2	messaufgabeontology/Abstand	messaufgabeontology/measureWithProcedure	messaufgabeontology/Absorptionsspektroskopie	http://ontologies.metaphacts.com/completion	
3	messaufgabeontology/Abstand	messaufgabeontology/measureWithProcedure	messaufgabeontology/Chromatisch-konfigale%20Abstandsmaessung	http://ontologies.metaphacts.com/completion	
4	messaufgabeontology/Abstand	messaufgabeontology/measureWithProcedure	messaufgabeontology/Farbänderingprüfung	http://ontologies.metaphacts.com/completion	
5	messaufgabeontology/Abstand	messaufgabeontology/measureWithProcedure	messaufgabeontology/KoroskopischeHolographi	http://ontologies.metaphacts.com/completion	
6	messaufgabeontology/Abstand	messaufgabeontology/measureWithProcedure	messaufgabeontology/Laserinterferometrie	http://ontologies.metaphacts.com/completion	
7	messaufgabeontology/Abstand	messaufgabeontology/measureWithProcedure	messaufgabeontology/Machne%20Vision	http://ontologies.metaphacts.com/completion	
8	messaufgabeontology/Abstand	messaufgabeontology/measureWithProcedure	messaufgabeontology/Magnetische_Streulfluss	http://ontologies.metaphacts.com/completion	
9	messaufgabeontology/Abstand	messaufgabeontology/measureWithProcedure	messaufgabeontology/Schalenmission	http://ontologies.metaphacts.com/completion	
10	messaufgabeontology/Abstand	messaufgabeontology/measureWithProcedure	messaufgabeontology/Schattenwurf	http://ontologies.metaphacts.com/completion	
11	messaufgabeontology/Abstand	messaufgabeontology/measureWithProcedure	messaufgabeontology/Streifenprojektion	http://ontologies.metaphacts.com/completion	
12	messaufgabeontology/Abstand	messaufgabeontology/measureWithProcedure	messaufgabeontology/Ultraschall	http://ontologies.metaphacts.com/completion	
13	messaufgabeontology/Elektrische_Isolationsgrue	messaufgabeontology/abMessung	messaufgabeontology/Elektroden	http://ontologies.metaphacts.com/completion	
14	messaufgabeontology/Fallen	messaufgabeontology/hasObjective	messaufgabeontology/Messung_3L_Leichtbau_Lite	http://ontologies.metaphacts.com/completion	

Abbildung 5-3: Screenshot der Benutzeroberfläche von GraphDB zur Speicherung der RDF-Tripel

## 5.1.2 Analogieschlüsse mit dem Wissensgraphen

### Ermittlung des besten Modells für das Embedding

Um die Analogieschlüsse aus der Wissensbasis zu generieren, wird zunächst das geeignetste Modell für das Embedding ermittelt. Es werden alle Modelle berücksichtigt, die in Tabelle 4-6 gelistet sind. Die Modellperformance wird mit den Metriken Hits@N und *MR* bewertet.

Zunächst werden alle Tripel des zuvor erstellten Wissensgraphen von der Graphdatenbank abgerufen. Der Datensatz wird zufällig in einen Trainings-, Validierungs- und Testdatensatz geteilt (Aufteilung: 80% / 10% / 10%). Für alle betrachteten Modelle werden die Embeddings mit Standardparametern (vgl. Kapitel 4.3.2) erstellt und die Metriken Hits@1, Hits@3, Hits@5 und Hits@10 und *MR* berechnet. In Abbildung 5-4 und Abbildung 5-5 sind die Ergebnisse dieses Schritts dargestellt.

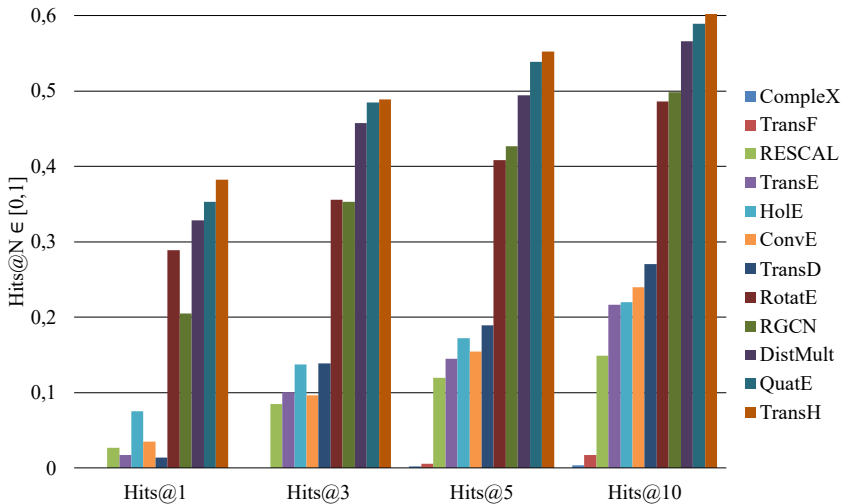


Abbildung 5-4: Vergleich der Modelle mit Hits@N

In Abbildung 5-4 ist die Metrik Hits@N, sortiert nach Hits@10, dargestellt. Ein höherer Wert spiegelt in diesem Fall eine bessere Performance wider. Die Modelle Complex, TransF, RESCAL, TransE, HoIE, ConvE und TransD bieten die schlechteste Performance und werden nicht weiter betrachtet. Die Modelle RotatE und RGCN bieten eine



mittlere Performance. Die Modelle DistMult, QuatE und TransH bieten die beste Performance, wobei TransH in allen Metriken jeweils am besten ist.

Dieses Ergebnis spiegelt sich auch im Median Rank in Abbildung 5-5 wider. Der Wert dieser Metrik sollte möglichst gering sein. Die Ordinate ist logarithmisch zur Basis 10 dargestellt. Die Modelle QuatE und TransH liefern die besten Ergebnisse.

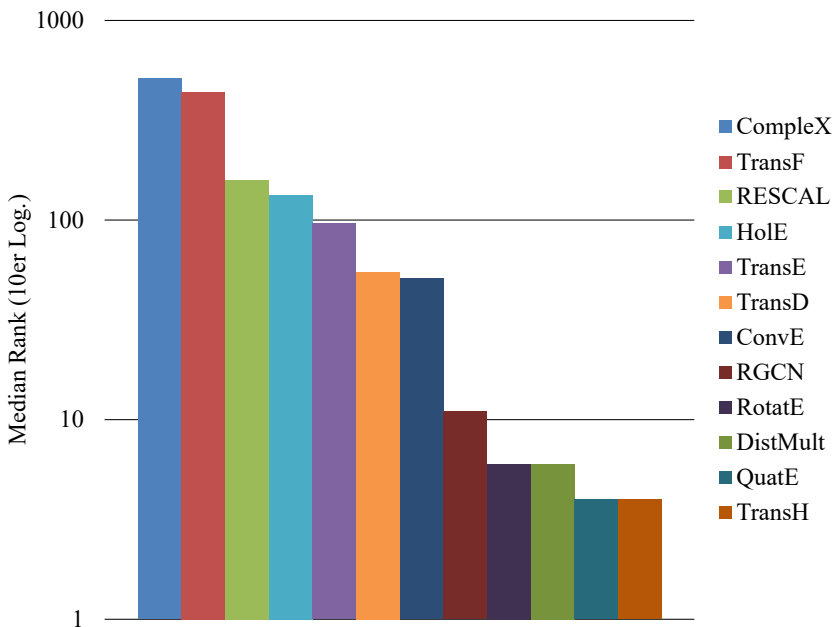


Abbildung 5-5: Vergleich der Modelle mit Median Rank (Darstellung in 10er Logarithmus)

In Abbildung 5-6 sind die Trainingszeiten in Minuten der verschiedenen Modelle dargestellt. Die Modelle RGCN und ConvE benötigen am meisten Zeit. Für alle anderen Modelle betragen die Trainingszeiten weniger als eine halbe Minute. Dies liegt im kleinen Datensatz begründet. Die Trainingszeiten der Modelle TransF und ComplexX sind am kürzesten, allerdings ist die Performance dieser Modelle am schlechtesten (vgl. Abbildung 5-4 und Abbildung 5-5). Die Trainingszeit des Modells TransH ist unwesentlich

länger, was in Verbindung mit der guten Modellperformance, für die Verwendung dieses Modells für die Generierung der Analogieschlüsse spricht.

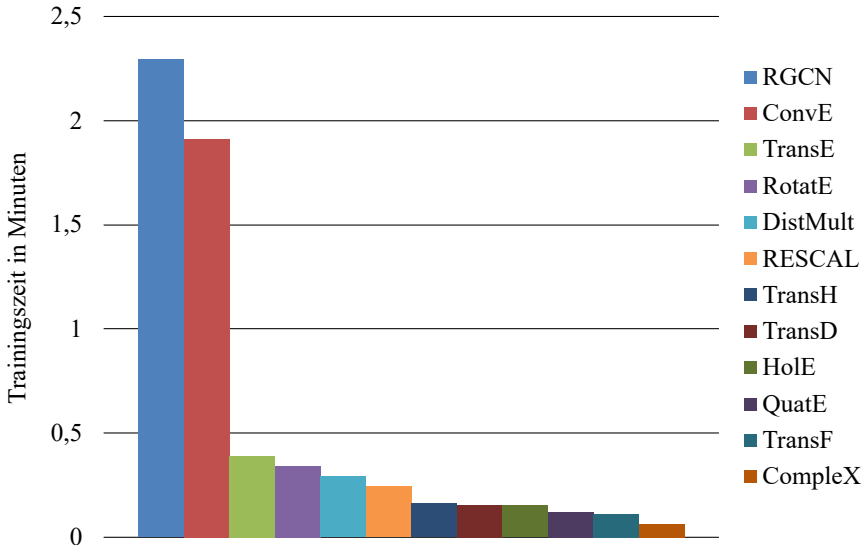


Abbildung 5-6: Vergleich der Trainingszeiten der Modelle in Minuten

### Hyperparameteroptimierung

Für das Modell TransH wird im Folgenden eine Gittersuche zur Optimierung der Hyperparameter durchgeführt. Die zu optimierenden Parameter sind in Tabelle 4-7 gelistet.

Die Verbesserungen durch das Modelltraining mit optimalen Parametern im Vergleich zu den Standardparametern für die einzelnen Metriken sind in Abbildung 5-7 dargestellt. Für alle Metriken wurde eine Verbesserung erzielt. Die Metrik Hits@10 verbessert sich am meisten um ca. 0,025.

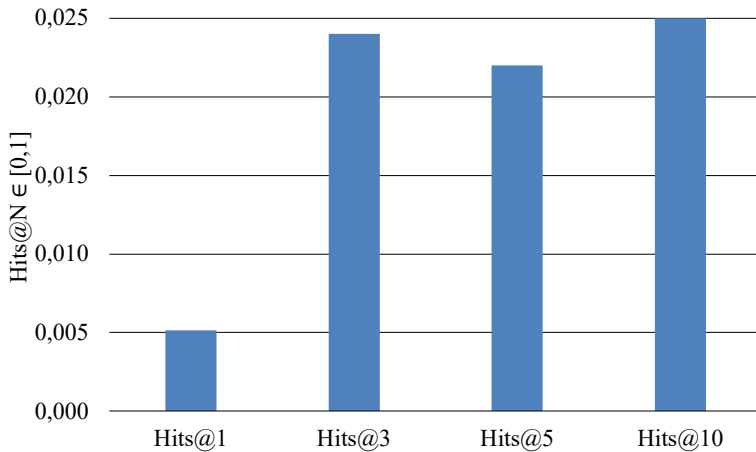


Abbildung 5-7: Vergleich der Verbesserung der Modellperformance (Hits@N) durch Hyperparameteroptimierung

In Abbildung 5-8 sind die absoluten Metriken nach der Hyperparameteroptimierung (HPO) dargestellt. Insgesamt zeigt sich, dass nur geringe Verbesserungen erzielt werden. Dies liegt nicht zuletzt darin begründet, dass für das Training bereits für jedes Modell geeignete Standardparameter verwendet wurden. Die größten Verbesserungen wurden für die Metrik *Hits@10* erzielt. Das Modell TransH erzielt mit optimierten Hyperparametern folgende Ergebnisse: *Hits@10* 0,65; *Hits@5* 0,57; *Hits@3* 0,51; *Hits@1* 0,39.

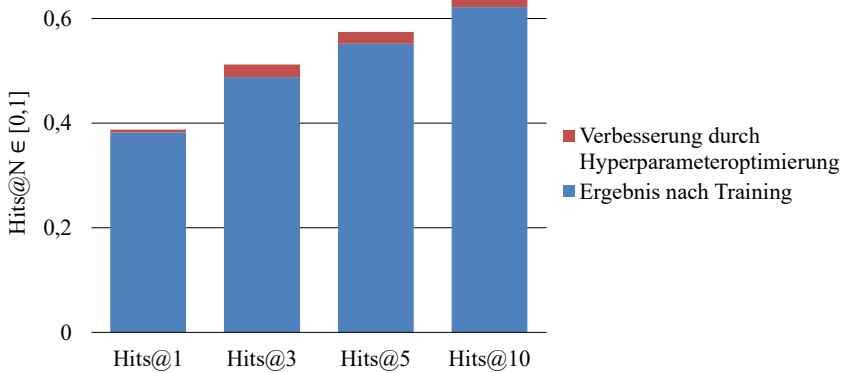


Abbildung 5-8: Modellperformance der besten drei Modelle mit Hits@N

Für die Generierung der Analogieschlüsse wird das Embedding mit dem Modell TransH und den optimierten Hyperparametern erstellt. Dieses Modell bietet die beste Modellperformance und kann für den vorliegenden Datensatz in weniger als einer halben Minute trainiert werden. Das Embedding mit dem Modell TransH kann somit effizient im Entscheidungsunterstützungssystem eingesetzt werden.

### Vorhersage von Tripeln

Das zuvor erstellte Embedding wird nun genutzt, um die neuen Tripel vorherzusagen. Es sollen insgesamt 6000 Tripel vorhergesagt werden. Dies entspricht etwas mehr als dem Doppelten des tatsächlichen Datensatzes. Es gilt zu beachten, dass vom Embedding auch bereits im Datensatz enthaltene Tripel vorhergesagt werden können. Aus diesem Grund werden die Tripel im nächsten Schritt um die bereits im Datensatz enthaltenen Tripel reduziert. Es verbleiben 4518 Tripel, d.h. 1482 Tripel waren bereits im Datensatz enthalten.

Jedes vorhergesagte Tripel wird mit einem sog. Score angegeben, der die Unsicherheit der Vorhersage bewertet (Vgl. Kapitel 2.5.3). Der Score kann nicht absolut bewertet werden, sondern muss ins Verhältnis zur besten und schlechtesten Vorhersage gesetzt werden. Es wird ein linearer Verlauf angenommen. Für die Analogieschlüsse werden die Tripel anhand des Scores bewertet und die oberen 50% ausgewählt.

Die Berechnung ist schematisch in Abbildung 5-9 dargestellt und erfolgt gemäß Formel 5-1: es wird die Grenze *limit* berechnet, die die besten und schlechtesten 50% der

Tripel anhand des Scores trennt. Als nächstes wird das Tripel  $n$  ermittelt, das als erstes Tripel einen schlechteren Score als  $limit$  hat. Die Tripel bis  $n - 1$  werden weiterhin betrachtet. Es verbleiben noch 263 Tripel, deren Score besser ist als  $limit$ .

$$\text{limit} = \min(\text{Score}) + 0,5 * [\max(\text{Score}) - \min(\text{Score})] \quad 5-1$$

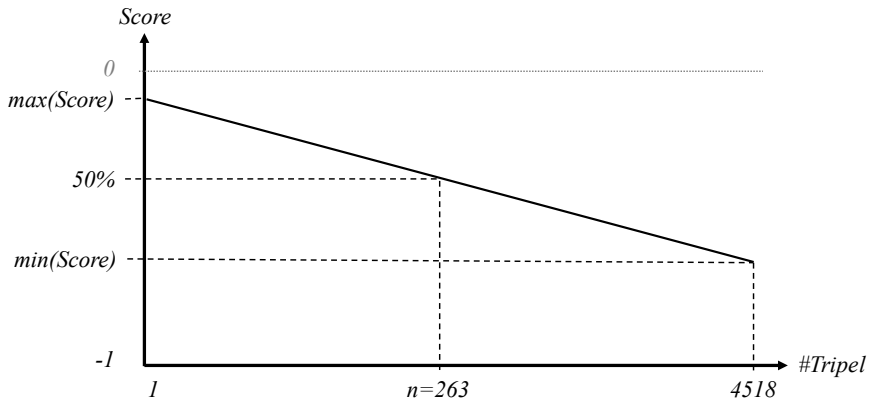


Abbildung 5-9: Schematische Darstellung der Berechnung der 50% besten Tripel

### 5.1.3 Validierung des Wissensgraphen

#### SHACL-Shapes

Für die verbleibenden Tripel wird abschließend geprüft, ob die Tripel zur Ontologie konform sind. Dafür werden SHACL-Shapes für die Ontologien *Messsysteme* und *Messaufgaben* definiert. Diese SHACL-Shapes sind in dem zu dieser Arbeit gehörenden Datensatz enthalten. Die Prüfung wird computergestützt durchgeführt. Tripel, die eine SHACL-Bedingung verletzen, also nicht Ontologie-konform sind, werden aus der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. In Tabelle 5-3 sind die Tripel gelistet, die eine SHACL-Bedingung verletzen. Beide Tripel ziehen eine Verbindung zwischen zwei Messgeräten, die so in der Ontologie nicht vorgesehen ist.

Tabelle 5-3: Liste der Tripel, die eine SHACL-Bedingung verletzt haben

Subjekt	Prädikat	Objekt
O-Inspect 322	consistsOfMeasuringInstrument	F25
Metrotom 800	consistsOfMeasuringInstrument	F25

Insgesamt wurden durch nur wenige nicht Ontologie-konforme Tripel durch das Embedding vorhergesagt, was u.a. auf den guten Datensatz zurückzuführen ist. Es verbleiben 261 Tripel, die besser sind als der geforderte Score und keine SHACL-Bedingung verletzen.

### Speicherung der Analogieschlüsse im Wissensgraphen

Nach der Überprüfung der Analogieschlüsse können die verbleibenden Tripel in der Graphdatenbank in einem gesonderten Graphen gespeichert werden. Diese Tripel stehen somit für zukünftige Abfragen zur Verfügung. Die um Analogieschlüsse erweiterte Wissensbasis enthält neben dem validierten Wissen (das Wissen, das im ersten Schritt durch Experten erarbeitet wurde) auch neues Wissen (das Wissen, das durch die Analogieschlüsse in Form von Tripeln nutzbar gemacht wurde).

In Tabelle 5-4 sind die 40 Tripel mit dem höchsten Score nach der Validierung gelistet. Es sind also nur Tripel genannt, die neues (aus Analogieschlüssen stammendes) und Ontologie-konformes Wissen enthalten. Die am häufigsten vorkommenden Relationen sind *measureWithProcedure*, *usesProcedure* und *isOfPrinciple*. Die Relation *measureWithProcedure* ordnet einer Messaufgabe ein Messverfahren zu; die Relation *usesProcedure* ordnet einem Messsystem ein Messverfahren zu; die Relation *isOfPrinciple* ordnet einem Messverfahren ein Messprinzip zu.

Insbesondere die Tripel mit der Relation *measureWithProcedure* und *usesProcedure* sind interessant, da diese die Analogieschlüsse, die für das fallbasierte Schließen wichtig sind, repräsentieren. Diese Tripel ordnen potenziell geeignete Messverfahren zu bekannten Messaufgaben zu. Diese Messverfahren und zugehörige Messsysteme können bei späteren Ähnlichkeitsvergleichen zwischen Messaufgaben als geeignete Lösung vorgeschlagen werden. Auf Grundlage dieser Erkenntnis kann bereits festgehalten werden, dass die Problemlösungsmethodik fallbasiertes Schließen durch Ontologie-basierte Wissensgraphen erfolgreich implementiert werden kann.

Tabelle 5-4: Ergebnis nach der Generierung der Analogieschlüsse (Beste 40 Tripel auf Basis des Scores)

Subjekt	Prädikat	Objekt
Machine Vision	isOfPrinciple	Visuelle Verfahren
Abstand	measureWithProcedure	Laserinterferometrie
Weisslichtinterferometrie	isOfPrinciple	Visuelle Verfahren
Winkel	measureWithProcedure	Photogrammetrie
Schichtdickenmessung Elektroden	measureWithProcedure	Radioskopie
Rissdetektion offen	measureWithProcedure	Radioskopie
Abstand	measureWithProcedure	KonoskopischeHolographie
Rissdetektion offen	measureWithProcedure	Weisslichtinterferometrie
Abstand	measureWithProcedure	Schattenwurf
Schichtdickenmessung Elektroden	measureWithProcedure	Computertomographie
Absorptionsspektroskopie	isOfPrinciple	Radiographische Verfahren
SYSTEM Type 8845A	hasInterface	Nicht-berührend
Ultraschall	isOfPrinciple	Visuelle Verfahren
Konfokale Mikroskopie	isOfPrinciple	Visuelle Verfahren
Abstand	measureWithProcedure	Ultraschall
Rissdetektion offen	measureWithProcedure	Laserinterferometrie
Abstand	measureWithProcedure	Farbeindringprüfung
Schichtdickenmessung Elektroden	measureWithProcedure	2D Kamerasystem
Absorptionsspektroskopie	isOfPrinciple	Visuelle Verfahren
SYSTEM Digitaler Messschieber 300 mm	hasInterface	Nicht-berührend
Radioskopie / Gammastrahlung	isOfPrinciple	Visuelle Verfahren
SYSTEM Type 8845A	usesProcedure	Längenmessung
SYSTEM Kamera Manta G-235B Mono	hasInterface	Berührend
Qualitätsprüfung Zelle	measureWithProcedure	2D Kamerasystem
SYSTEM ST 1288	hasInterface	Nicht-berührend
Radius	measureWithProcedure	Laserinterferometrie
Rissdetektion geschlossen	measureWithProcedure	Radioskopie
Schichtdickenmessung Elektroden	measureWithProcedure	Weisslichtinterferometrie
SYSTEM Wegaufnehmer W1T3	usesProcedure	Multimeter
SYSTEM Ace acA2500	usesProcedure	Machine Vision
Messung Batterie	hasMeasurand	Schnitte
Rissdetektion offen	measureWithProcedure	Koordinatenmesstechnik
SYSTEM Digitaler Messschieber 150 mm	hasInterface	Nicht-berührend
Farbeindringprüfung	isOfPrinciple	Durchstrahlungsprüfung
Lochtiefe	measureWithProcedure	Lasertriangulation
SYSTEM Federwaage Macro Line 20 kg	usesProcedure	Längenmessung
Länge	measureWithProcedure	KonoskopischeHolographie
Mikro-Raman-Spektroskopie	isOfPrinciple	Visuelle Verfahren
Koordinatenmesstechnik	isOfPrinciple	Radiographische Verfahren
Aktive Thermografie	isOfPrinciple	Visuelle Verfahren

Gleichzeitig ist festzuhalten, dass die Tripel aus Analogieschlüssen auch falsches Wissen enthalten. Dies liegt darin begründet, dass durch die Methode nur wahrscheinliche Tripel vorhergesagt werden können, das Domänenwissen zur Validierung dabei allerdings nicht berücksichtigt werden kann. Aus diesem Grund werden alle 261 Tripel, die zuletzt im Wissensgraph gespeichert wurden, nun nochmals durch einen Experten

gesichtet. In Tabelle 5-5 sind alle Tripel gelistet, die nach der Sichtung des Experten als falsch klassifiziert wurden (insgesamt 38 Tripel).

Es fällt auf, dass die meisten Fehler bei den Relationen *hasInterface* (12 Fehler) und *usesProcedure* (12 Fehler) gemacht werden. Die Relation *hasInterface* ordnet einem Messgerät die Eigenschaften *zerstörend* oder *nicht-zerstörend* und *berührend* oder *nicht-berührend* zu. Bei der Zuordnung von *berührend* oder *nicht-berührend* werden die meisten Fehler gemacht. Die Relation *usesProcedure* ordnet einem Messsystem ein Messverfahren zu.

Es fällt weiter auf, dass die meisten Fehler bei Tripeln gemacht werden, die einen schlechten Score haben. Werden nicht die oberen 50%, sondern nur die oberen 25% der Tripel ausgewählt, können die falschen Tripel um ca. 80% reduziert werden.

Tabelle 5-5: Liste der Tripel, die durch die Validierung des Experten ausgeschlossen wurden (38 Tripel)

Subjekt	Prädikat	Objekt
Digitaler Messschieber 300 mm	hasInterface	Nicht-beruehrend
Wegaufnehmer W1T3	usesProcedure	Multimeter
Digitaler Messschieber 150 mm	hasInterface	Nicht-beruehrend
Federwaage Macro Line 20 kg	usesProcedure	Laengenmessung
Farbeindringpruefung	isOfPrinciple	Thermische Verfahren
Messuhr 2 mm	hasInterface	Nicht-beruehrend
Digitaler Messschieber 150 mm	usesProcedure	Multimeter
Federwaage Macro Line 50 kg	usesProcedure	Laengenmessung
JSM-6010 PLUSLV	isMadeBy	Zeiss
Messuhr 2 mm	usesProcedure	Multimeter
Digitaler Messschieber 300 mm	usesProcedure	Multimeter
Federwaage Macro Line 20 kg	hasInterface	Nicht-beruehrend
Streifenprojektion	isOfPrinciple	Thermische Verfahren
Koordinatenmesstechnik	isOfPrinciple	Durchstrahlungspruefung
Kurbelzapfen-Wasserwaage	hasInterface	Nicht-beruehrend
Federwaage Macro Line 20 kg	usesProcedure	Multimeter
Digital-Buegelmessschraube Micromar 40	hasInterface	Nicht-beruehrend
Chronos 1.4	usesProcedure	Multimeter



---

Type 8628 B-50	usesProcedure	Multimeter
Schattenwurf	isOfPrinciple	Thermische Verfahren
Rissdetektion geschlossen	measureWithProcedure	Lasertriangulation
Stemi 508	hasInterface	Beruehrend
Federwaage Macro Line 50 kg	usesProcedure	Multimeter
Digitaler Messschieber 150 mm	isMadeBy	HHW
Rissdetektion geschlossen	measureWithProcedure	Koordinatenmesstechnik
Endmass 6mm	usesProcedure	Multimeter
Messuhr 50 mm	hasInterface	Nicht-beruehrend
Federwaage Macro Line 20 kg	isMadeBy	HHW
F25	hasInterface	Nicht-beruehrend
Streulichtverfahren	isOfPrinciple	Thermische Verfahren
Chronos 1.4	hasInterface	Beruehrend
Stemi SV 11	hasInterface	Beruehrend
2D Kamerasystem	isOfPrinciple	Thermische Verfahren
LumiScanX	usesProcedure	Multimeter
Absorptionsspektroskopie	isOfPrinciple	Taktile Verfahren
Streifenprojektion	isOfPrinciple	Taktile Verfahren
Type 45	hasInterface	Nicht-beruehrend

---

### 5.1.4 Bereitstellung des Wissensgraphen

Der Wissensgraph wird in Form eines Entscheidungsunterstützungssystems zur Verfügung gestellt, wobei einem Anwender für eine von ihm beschriebene Messaufgabe potenziell geeignete Messverfahren und Messsysteme vorgeschlagen werden. Die Beschreibung der Messaufgabe erfolgt anhand der Ontologie für Messaufgaben: für jede Klasse der Ontologie wird eine Filteroption bereitgestellt. Führt ein Anwender eine Auswahl durch, wird der in Quelltext 4-4 beschriebene Grundaufbau des SPARQL-Queries um die entsprechenden SPARQL-Bedingungen, die die Auswahl des Anwenders repräsentieren, erweitert. Diese Bedingungen entsprechen der Beschreibung der Messaufgabe. Auf diese Weise werden die in Frage kommenden Messaufgaben und somit potenziell geeignete Messverfahren und Messsysteme reduziert, bis eine Lösung für das Problem gefunden wurde.

## Systemarchitektur und softwareseitige Umsetzung

In Abbildung 5-10 ist die Systemarchitektur dargestellt, wie sie für dieses Vorhaben umgesetzt wurde. Diese besteht aus einem **Frontend** für die Nutzerinteraktion, einem **Backend**, das die Nutzeranfragen verarbeitet und die Methoden zur Generierung von Analogieschlüssen und zur Validierung des Wissensgraphen durchführt, einer **relationalen Datenbank** für infrastrukturelevante Aspekte (z.B. Nutzerverwaltung) und einer **Graphdatenbank**, in der die Wissensbasis in Form von RDF-Tripeln gespeichert ist.

Das Frontend wurde mittels Streamlit<sup>42</sup> erstellt. Im Backend werden die Python Packages PyKeen<sup>43</sup> und pySHACL<sup>44</sup> verwendet. Das Package PyKeen wird für die Erstellung der Embeddings, die Hyperparameteroptimierung und die Vorhersage wahrscheinlicher Tripel verwendet. Das Package pySHACL wird für die Validierung des Wissensgraphen mit SHACL-Shapes verwendet. Sämtliche weitere Logik und Schnittstellen im Backend wurden vom Verfasser dieser Arbeit entwickelt. Als Graphdatenbank kommt GraphDB<sup>45</sup> von der Fa. Ontotext zum Einsatz. Für die Erstellung der Tripel, aus dem initial in tabellarischer Form gesammeltem Wissen, wird OntoRefine<sup>46</sup> der Fa. Ontotext verwendet. OntoRefine wird ebenfalls für den Abgleich der eigenen Klassen mit wikidata verwendet (Funktion „*Reconciling*“). Bei diesem Abgleich werden die Instanzen von wikidata mit den eigenen Instanzen verglichen. Da wikidata kaum relevante Instanzen enthält, ergibt sich zum jetzigen Zeitpunkt kein Änderungsbedarf der eigenen Instanzen. In der Zukunft sollte über diese Schnittstelle jedoch regelmäßig überprüft werden, ob es nützliche Änderungen gibt. Das Frontend und das Backend sowie die Graphdatenbank wurden jeweils mittels Docker<sup>47</sup> containerisiert und auf einer Virtual Machine (VM) im KIT-Netz bereitgestellt.

---

<sup>42</sup> Streamlit ist ein Open-Source-App-Framework in der Sprache Python. (Unter: <https://streamlit.io/>, zuletzt aufgerufen am: 29.05.2023)

<sup>43</sup> PyKEEN ist ein Python-Paket für reproduzierbare, einfache Wissensgraph-Embeddings. (Unter: <https://github.com/pykeen/pykeen>, zuletzt aufgerufen am: 29.05.2023)

<sup>44</sup> Ein Python-Validator für SHACL. (Unter: <https://github.com/RDFLib/pySHACL>, zuletzt aufgerufen am: 29.05.2023)

<sup>45</sup> RDF-Datenbank für Wissensgraphen. (Unter: <https://www.ontotext.com/products/graphdb/>, zuletzt aufgerufen am: 29.05.2023)

<sup>46</sup> Ontotext Refine (OntoRefine) ist eine kostenlose Anwendung zur automatischen Umwandlung von unübersichtlichen Zeichenkettendaten in einen Wissensgraphen. <https://www.ontotext.com/products/ontotext-refine/> [29.05.2023]

<sup>47</sup> Docker ist eine Software zur Bereitstellung von Anwendungen durch Containerisierung. <https://www.docker.com/> [29.05.2023]

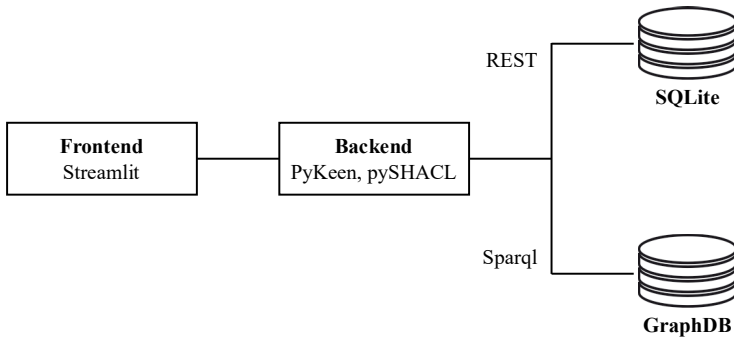


Abbildung 5-10: Exemplarische Systemarchitektur für das Vorhaben

### Entscheidungsunterstützungssystem

In Abbildung 5-11 ist ein Screenshot der Benutzeroberfläche des Entscheidungsunterstützungssystems gezeigt.

Auf der linken Seite kann die neue Messaufgabe, für die ein Messsystem gesucht wird, beschrieben werden. Die Klassen der Ontologie sind als Filtermöglichkeiten gelistet. Die jeweiligen Auswahlmöglichkeiten der Filter werden automatisiert zur Laufzeit aus der Graphdatenbank abgerufen.

Auf der rechten Seite werden die Ergebnisse dargestellt: in Tabs können die aufbereiteten Suchergebnisse, der zugrundeliegende SPARQL-Query oder die Rohdaten angezeigt werden. In den Suchergebnissen wird zwischen dem validierten Expertenwissen und den Ergebnissen aus den Analogieschlüssen unterschieden, damit der Nutzer die Qualität der Ergebnisse beurteilen kann. Für jedes einzelne Suchergebnis wird dargestellt, welche vergleichbare Messaufgabe dem Ergebnis zugrunde liegt, welches Messsystem und welches Messverfahren diesem zugehörig ist. Die Messverfahren und Messsysteme aus den Analogieschlüssen werden mit einer Wahrscheinlichkeit *prob* in Prozent dargestellt, die die potenzielle Eignung quantifiziert (Vgl. Kapitel 4.3.4, Formel 4-1).

Wird keine Auswahl bei den Filtermöglichkeiten der Messaufgabe getroffen (wie in Abbildung 5-11), werden alle in der Wissensbasis gespeicherten Messaufgaben mit zugehörigen Messsystemen und Messverfahren aus Expertenwissen und Analogieschlüssen zur Übersicht dargestellt.

**Beschreiben Sie hier Ihre Messaufgabe, für die Sie ein Messsystem suchen:**

Suchergebnisse: SPARQL Query Raw Data (JSON)

Measurement\_Time

Choose an option

Sector

Choose an option

Integration\_Level

Choose an option

Measurement\_Object

Choose an option

Material

Choose an option

Migrate\_State

Choose an option

Measurand

Choose an option

**Validiertes Expertenwissen**

Zugeh. Branche/Messaufgabe: Porendetektion  
Dabei genutztes Messsystem: Membranfreies optisches Mikroskop  
Dabei genutztes Messverfahren: Schallemission

Zugeh. Branche/Messaufgabe: Porendetektion  
Dabei genutztes Messsystem: Metrohm 800  
Dabei genutztes Messverfahren: Computertomographie

Zugeh. Branche/Messaufgabe: Delamination  
Dabei genutztes Messsystem: Metrohm 800  
Dabei genutztes Messverfahren: Computertomographie

Zugeh. Branche/Messaufgabe: Porendetektion  
Dabei genutztes Messsystem: ImageIR 5385 S  
Dabei genutztes Messverfahren: Aktive Thermografie

Zugeh. Branche/Messaufgabe: Delamination  
Dabei genutztes Messsystem: ImageIR 5385 S  
Dabei genutztes Messverfahren: Aktive Thermografie

**Ergebnisse aus Analogieschlüssen**

Zugeh. Branche/Messaufgabe: Porendetektion  
Dabei genutztes Messsystem: ImageIR 5385 S (44.18%)  
Dabei genutztes Messverfahren: Aktive Thermografie (50.00%)

Zugeh. Branche/Messaufgabe: Falten  
Dabei genutztes Messsystem: ImageIR 5385 S (44.18%)  
Dabei genutztes Messverfahren: Aktive Thermografie (50.00%)

Zugeh. Branche/Messaufgabe: Qualitätsprüfung Zelle  
Dabei genutztes Messsystem: ImageIR 5385 S (44.18%)  
Dabei genutztes Messverfahren: Aktive Thermografie (50.00%)

Zugeh. Branche/Messaufgabe: Porendetektion  
Dabei genutztes Messsystem: ImageIR 5385 S (44.18%)  
Dabei genutztes Messverfahren: Passive Thermografie (50.00%)

Zugeh. Branche/Messaufgabe: Falten  
Dabei genutztes Messsystem: ImageIR 5385 S (44.18%)  
Dabei genutztes Messverfahren: Passive Thermografie (50.00%)

Beschreibung der neuen Messaufgabe

Übersicht über Suchergebnisse:  
Validiertes Expertenwissen und Ergebnisse aus Analogieschlüssen

Abbildung 5-11: Screenshot der Benutzeroberfläche (Frontend) des Entscheidungsunterstützungssystems in Streamlit

## 5.2 Validierung am Beispiel der Brennstoffzellenfertigung

Die Brennstoffzellenindustrie hat derzeit, im Vergleich zur Batteriezellfertigung, einen geringeren industriellen Reifegrad, da hochproduktive Produktionsanlagen für Brennstoffzellen derzeit noch Gegenstand aktueller Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten sind (Beyer et al., 2022). Aus diesem Grund eignet sich diese Industrie, um das entwickelte Entscheidungsunterstützungssystem zu validieren. Es werden Messaufgaben aus dieser Branche gesammelt, um hierfür Empfehlungen für Messsysteme, durch Analogieschlüsse aus der Batteriezellfertigung, zu generieren. Zur Definition der Messaufgaben werden Vorarbeiten des wbk Institut für Produktionstechnik (z.B. Projekte *EM-SigBZ*, Förderkennzeichen: 03B11012C oder *KliMEA*, Förderkennzeichen: 3-4332.62-KIT/14) herangezogen.

Die empfohlenen Messsysteme werden dann durch Literaturrecherchen und experimentelle Versuche auf ihre Eignung für die zugrundeliegenden Messaufgaben untersucht. Die Erprobung umfasst die Reproduzierung der jeweiligen Messaufgabe im Laborumfeld und den dortigen Einsatz der jeweiligen Messsysteme.

### Aufbau eines Brennstoffzellenstacks

Der Aufbau eines Brennstoffzellenstacks ist in Abbildung 5-12 schematisch dargestellt. Dieser besteht aus einem Zellstapel und verschiedenen Peripheriekomponenten (engl. Balance-of-Plant, BoP), wie z.B. Stromschienen, Luftverdichter oder -befeuchter. Für den Zellstapel werden abwechselnd Bipolarplatten (BPP) und Membran-Elektroden-Einheiten (engl. Membrane-Electrode-Assembly, MEA) gestapelt. Je nach benötigter Leistung des Stackes variiert die Anzahl der Zellen; für Anwendungen im Nutzfahrzeugbereich werden i.d.R. zwischen 300 und 450 Zellen gestapelt. (Bürger et al., 2022; Groos et al., 2022)

Die BPP ist ein metallisches Bauteil, das aus zwei symmetrischen Halbschalen zusammengeschweißt wird und u.a. die Zufuhr der Medien, die Abfuhr des Reaktionswassers und die Stromleitung gewährleistet. Die MEA ist ein aus mehreren Lagen bestehendes Bauteil, das insbesondere die chemische Reaktion zwischen Wasserstoff und Sauerstoff in einer Brennstoffzelle ermöglicht. Der Aufbau einer sog. 7-Lagen-MEA variiert je nach Hersteller, besteht im Kern aber immer aus mind. vier verschiedenen Lagen: einem Dichtungselement zur Abdichtung nach außen und zwischen Zellen, einer Gasdiffusionslage (GDL) für eine gleichmäßige Medienverteilung, einer Katalysatorbeschichtung (bestehend aus Edelmetallen, u.a. Platin) zur Begünstigung der chemischen

Reaktion und einer Polymerelektrolytmembran (PEM). Die PEM ermöglicht eine gasdichte Trennung der Reaktionsgase Wasserstoff und Sauerstoff, lässt jedoch einen Protonenfluss zu. Um ein chemisches Gleichgewicht herzustellen, fließen Elektronen über die BPP. Auf diese Weise wird mit einer Brennstoffzelle elektrische Energie erzeugt. (Groos et al., 2022) Die mit Katalysator beschichtete PEM wird auch Catalyst Coated Membrane (CCM) genannt. Die PEM ist hydrophil und reagiert auf Änderungen der klimatischen Umgebungsbedingungen mit enormen geometrischen Veränderungen. (Wienk-Borgert, 2018)

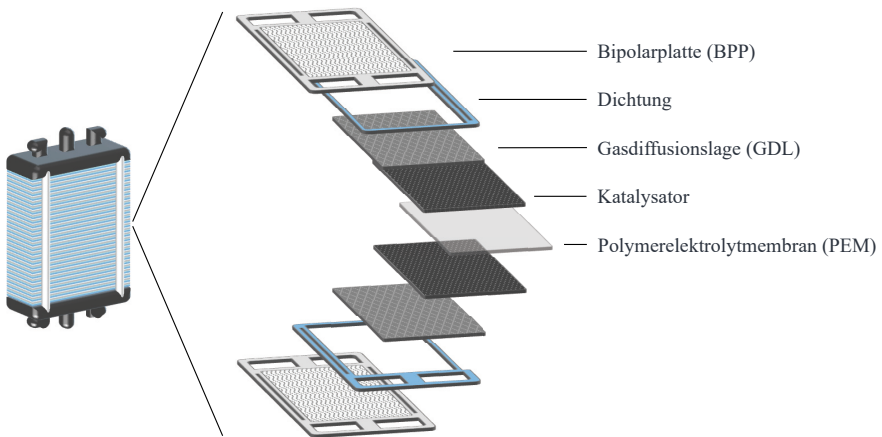


Abbildung 5-12: Aufbau eines Brennstoffzellenstacks (eigene Abbildung)

### Produktion eines Brennstoffzellenstacks

In Abbildung 5-13 sind die Produktionsschritte zur Herstellung eines Brennstoffzellenstacks mit Fokus auf die MEA schematisch dargestellt. Zunächst wird die CCM hergestellt. Dabei ist das sog. Decal-Verfahren industriell etabliert; Direktdruckverfahren sind Gegenstand aktueller Forschung. Beim Decal-Verfahren befindet sich die Katalysatorbeschichtung zunächst auf einer Trägerfolie (engl. Decal) und wird unter Einfluss von Druck und Temperatur auf die PEM gepresst. Dies vermeidet, im Vergleich zu Direktdruckverfahren, geometrische Veränderungen der hydrophilen PEM beim Kontakt mit flüssigen Katalysator-tinten. (Frölich, 2015) Gleichzeitig wird die GDL hergestellt: dabei wird zunächst ein Vlies aus Carbonfasern hergestellt, das anschließend zugeschnitten wird. Im nächsten Schritt werden CCM, GDL und Dichtungselemente zur MEA (meist

durch Kleben) gefügt. Die Herstellung der CCM, GDL und MEA findet in einem kontinuierlichen Bahnwareprozess (sog. Roll-to-Roll-Prozess, R2R) statt. (Beyer et al., 2022; Kampker, Ayvaz, Christoph, et al., 2020; Kampker, Ayvaz, Schön, et al., 2020)

Danach werden MEA und BPP abwechselnd zu einem Zellstapel mit gewünschter Zellanzahl gestapelt. Die Halbplatten der BPP (sog. Monopolarplatten) wurden vorab in einem diskreten Prozess aus Blechen gestanzt und mit einem Laserschweißverfahren zu BPP verbunden. Nach dem Stapelprozess wird der Brennstoffzellenstack verpresst und mit Spannbändern oder Zugstäben verspannt. Es folgt danach ein ausführlicher End-of-Line (EoL)-Test. (Beyer et al., 2022; Kampker, Ayvaz, Christoph, et al., 2020; Kampker, Ayvaz, Schön, et al., 2020)

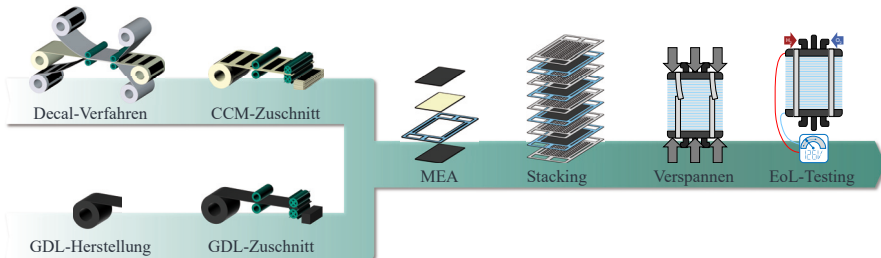


Abbildung 5-13: Schematische Darstellung der Brennstoffzellenproduktion (eigene Abbildung)

### Qualitätssicherung in der Brennstoffzellenfertigung

In Abbildung 5-14 ist die Kostenstruktur eines PEM-Brennstoffzellenstacks bei einem jährlichen Produktionsvolumen von 100.000 Stacks dargestellt (Wang et al., 2020). 64% der Kosten entfallen auf die MEA; stark getrieben durch die Kosten des Platins im Katalysator. Da der Produktionsprozess der MEA komplex und bislang nicht ausreichend industriell beherrscht ist, ist die prozessintegrierte Qualitätssicherung dieser Komponente zur frühzeitigen Fehlervermeidung / -entdeckung und Reduzierung von Kosten durch Ausschuss überaus wichtig. (Ulsh et al., 2019)

Bislang zum Einsatz kommende Messsysteme im Produktionsprozess eines Brennstoffzellenstacks sind v.a. Industriekameras zur Detektion von Oberflächenfehlern sowie zur Erfassung von Positionen und Geometrien, Röntgenfluoreszenzanalyse zur Bewertung der Beschichtungshomogenität und Partikelgröße sowie Systeme zur

Beurteilung der Leitfähigkeit und Dichtigkeit von BPP und des Stacks. (Kampker, Ayvaz, Schön, et al., 2020) Zwei besonders kritische Aspekte, für die es bislang keine ausreichend erprobten Messsysteme für den Einsatz im Produktionsprozess der MEA gibt, sind innenliegende Defekte (insbesondere sog. Pinholes) und die Feuchtigkeit der PEM.

Pinholes sind lokale Schädigungen der PEM, durch die eine gasdichte Trennung von Wasserstoff und Sauerstoff nicht mehr gewährleistet werden kann. Durch den Kontakt der Reaktionsgase kommt es im Betrieb zu lokalen Temperaturspitzen, die zunächst die Leistung einer Zelle reduzieren und im weiteren Verlauf zur Schädigung der Zelle oder des Stacks führen. Pinholes können u.a. während des gesamten Produktionsprozesses durch mechanische Beeinflussungen entstehen. Besonders kritisch sind Pinholes, die von der Katalysatorbeschichtung oder der GDL verdeckt und mit Kameras nicht detektiert werden können. Für innenliegende Defekte dieser Art gibt es bislang keine geeignete prozessintegrierte, industrielle Messtechnik.

Die Überwachung der Feuchtigkeit der PEM ist aufgrund ihrer ausgeprägten hydrophilen Eigenschaften wichtig. Bislang findet die Fertigung der MEA in klimatisierten Umgebungen statt, jedoch reichen bereits geringe Änderungen des Klimas aus, um Geometrie- und Materialveränderungen der PEM hervorzurufen. Aus diesem Grund ist die Überwachung des Feuchtigkeitsgehalts der PEM notwendig, um Materialveränderungen auszuschließen und gezielt auf klimatische Änderungen zu reagieren. Ein geeignetes Messsystem für den Einsatz im Produktionsprozess ist bislang nicht vorhanden.

Im Folgenden werden für beide Probleme die entsprechenden Messaufgaben definiert und als Anfrage an das Entscheidungsunterstützungssystem gestellt. Das Ziel ist es, durch Analogieschlüsse aus der Batteriezellfertigung ähnliche Messaufgaben zu finden und die dort eingesetzten Messsysteme auf ihre Eignung für die genannten Probleme in der Brennstoffzellenfertigung zu testen. Dies geschieht im Rahmen von experimentellen Versuchen unter Laborbedingungen. Anschließend wird die tatsächliche Eignung der Vorschläge kritisch bewertet.



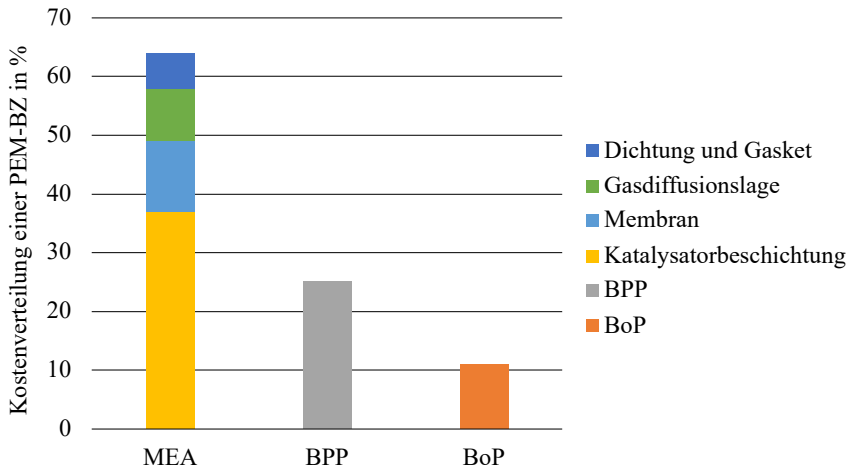


Abbildung 5-14: Kostenstruktur einer PEM-Brennstoffzelle nach Komponenten in Prozent, Annahme 100.000 Stacks p.a. (eigene Abbildung nach Wang et al., 2020)

### 5.2.1 Pinholes in der MEA-Fertigung

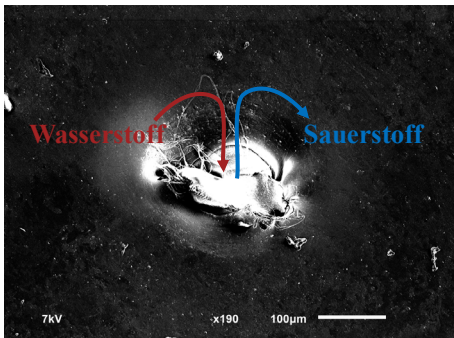
In Abbildung 5-19a ist eine Rasterelektronenmikroskop (REM) - Aufnahme einer CCM mit einem Pinhole dargestellt. Aufgrund des Pinholes werden die Reaktionsgase Wasserstoff und Sauerstoff nicht mehr voneinander getrennt. Es kommt zu einer Reaktion der beiden Gase und infolgedessen zu einer nachhaltigen Schädigung der PEM. In Abbildung 5-15b ist diese nachhaltige Schädigung zu sehen: eine zunächst intakte PEM (A) wird mechanisch beschädigt, sodass ein Pinhole entsteht (B). Im Betrieb brennt dieses immer weiter auf (C). Es kommt zum Versagen der Zelle oder des gesamten Stacks.

Pinholes können während des Produktionsprozesses einer Brennstoffzelle durch mechanische Beschädigungen oder während des Betriebs einer Brennstoffzelle durch chemische Degradation der PEM entstehen. Mechanische Beschädigungen während des Produktionsprozesses können z.B. durch abstehende GDL-Fasern, die beim Ablegen der GDL durch die PEM stechen, oder Fehler bei der Handhabung entstehen. Pinholes, die durch Fehlermechanismen dieser Art entstehen und aus Sicht der Fertigungsmesstechnik eine Herausforderung darstellen, haben meist Größen unter 500  $\mu\text{m}$  (Ulsh et al., 2019). Die messtechnische Erfassung dieser Pinholes ist darüber hinaus

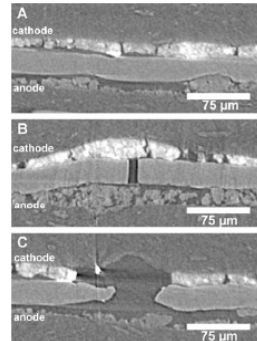
besonders herausfordernd, wenn der Defekt innenliegend, d.h. von darüberliegenden Schichten verdeckt, ist.

Die Messaufgabe, für die eine Anfrage an das Entscheidungsunterstützungssystem gestellt wird, lautet:

Detektion von innenliegenden Defekten (insbesondere Pinholes) in der MEA während des Produktionsprozesses der MEA (In-Line).



a) REM-Aufnahme eines Pinholes



b) Pinhole im Betrieb

Abbildung 5-15: REM-Aufnahme eines Pinholes (a, eigene Abbildung) und Entwicklung eines Pinholes im Betrieb (b, Kreitmeier et al., 2013)

### Anfrage an das Entscheidungsunterstützungssystem

Für die Anfrage an das Entscheidungsunterstützungssystem wird die Messaufgabe wie folgt beschrieben: es wird ein Messverfahren oder ein Messsystem gesucht, mit Hilfe dessen Luft einschließt oder Poren (Messgröße) in einem Kunststoff (Material) mit festem Aggregatzustand In-Line (Integrationsgrad) detektiert werden können. Der entsprechende SPARQL-Query, der diese Messaufgabe repräsentiert, ist in Quelltext 5-1 zu finden.

```

PREFIX messsystemontology: <http://ontologies.metaphacts.com/mess-messsystem/>
PREFIX messaufgabeontology: <http://ontologies.metaphacts.com/mess-messaufgabe/>

SELECT ?messaufgabe ?messverfahren ?messsystem
WHERE {
  {?messung messaufgabeontology:measureWithSystem ?messsystem .}
  {?messsystem messsystemontology:measureWithProcedure ?messverfahren .}
  {?messaufgabe messaufgabeontology:isMeasuring ?messobjekt .}
  {?messaufgabe messaufgabeontology:hasObjective ?messung .}

  {?messobjekt messaufgabeontology:isOfState messaufgabeontology:fest .}

  {?messobjekt messaufgabeontology:isOfMaterial messaufgabeontology:Kunststoffe .}

  {?messaufgabe messaufgabeontology:hasMeasurand messaufgabeontology:Lufteinschluesse .}

  {?messung messaufgabeontology:hasIntegrationLevel messaufgabeontology:In-Line .}

  {?messung messaufgabeontology:hasMeasurand messaufgabeontology:Poren_Groesse .}
UNION
  {?messung messaufgabeontology:hasMeasurand messaufgabeontology:Poren_Position .}
}
LIMIT 100

```

Quelltext 5-1: SPARQL-Query für die erste Messaufgabe in der Brennstoffzellenfertigung

### Ergebnis der Anfrage an das Entscheidungsunterstützungssystem

In Abbildung 5-16 ist das Ergebnis der Anfrage an das Entscheidungsunterstützungssystem dargestellt. Es wurden die Einschränkungen zu Material, Aggregatzustand, Integrationsgrad und Messgröße ausgewählt. Das Ergebnis ist auf der rechten Bildseite zu sehen. Es wurden keine Empfehlungen aus dem validierten Expertenwissen gezogen und vier Empfehlungen aus Analogieschlüssen.

Für die beschriebene Messaufgabe wurde eine vergleichbare Messaufgabe (Falten) gefunden. Diese beschreibt die Detektion von sich überlappenden Schichten in beschichteten Messobjekten in der Batteriezellfertigung. Bei Überlappungen dieser Art können Lufteinschlüsse entstehen, was der vorliegenden Messaufgabe ähnlich ist (Huber, 2017). Die zugehörigen Messverfahren sind aktive und passive Thermografie. Die entsprechenden Messsysteme sind InfraTec ImageIR 9400 und InfraTec ImageIR 5385S (aktive und passive Thermografie je nach Anregung). Da im Produktionsprozess der MEA keine Prozesswärme für passive Thermografie genutzt werden kann, wird im Folgenden die Detektion der Pinholes in der MEA mittels aktiver Thermografie (InfraTec ImageIR 5385S) näher untersucht.

### Beschreiben Sie hier Ihre Messaufgabe, für die Sie ein Messsystem suchen:

Measurement\_Time

Choose an option

Sector

Choose an option

Integration\_Level

In-Line x

Measurement\_Object

Choose an option

Material

Kunststoffe x

Aggregate\_State

fest x

Messrand

Poren\_Position x

Poren\_Groesse x

Luftfeuchtigkeit x

[Suchergebnisse](#) [SPARQL Query](#) [Raw Data \(JSON\)](#)

## Ergebnis der Suche auf dem Wissensgraphen

### Validiertes Expertenwissen (0 Ergebnisse)

Es wurde kein passendes Messsystem oder Messverfahren gefunden.

### Ergebnisse aus Analogieschlüssen (4 Ergebnisse)

Zugeh. Branche/Messaufgabe: DabeI genutztes Messsystem: DabeI genutztes Messverfahren:	Falten ImageIR 5385 S (44.18%) Aktive Thermografie (50.00%)
Zugeh. Branche/Messaufgabe: DabeI genutztes Messsystem: DabeI genutztes Messverfahren:	Falten ImageIR 5385 S (44.18%) Passive Thermografie (50.00%)
Zugeh. Branche/Messaufgabe: DabeI genutztes Messsystem: DabeI genutztes Messverfahren:	Falten ImageIR 9400 (41.26%) Aktive Thermografie (50.00%)
Zugeh. Branche/Messaufgabe: DabeI genutztes Messsystem: DabeI genutztes Messverfahren:	Falten ImageIR 9400 (41.26%) Passive Thermografie (50.00%)

Abbildung 5-16: Ergebnis der Anfrage für Messaufgabe 1

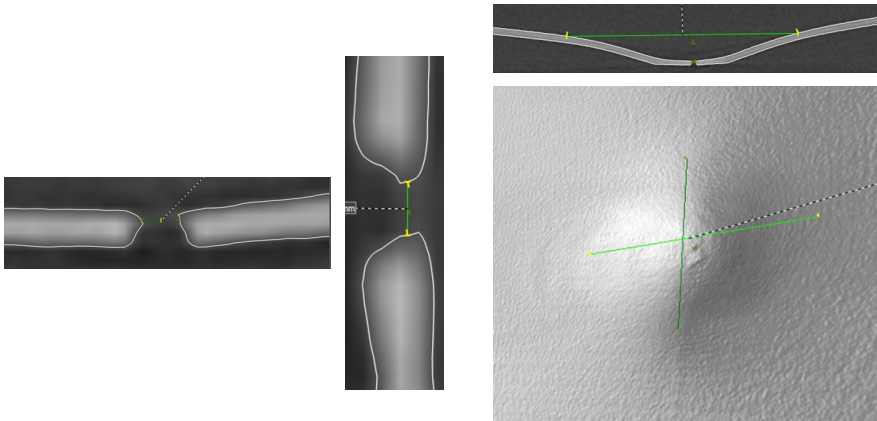
### **Erprobung des ausgewählten Messsystems**

Die Erprobung des Messsystems untergliedert sich in drei Teile:

1. Probenpräparation: für die Messungen werden Pinholes künstlich in eine CCM eingebracht. Dabei ist darauf zu achten, dass die künstlich erzeugten Pinholes möglichst ähnlich zu echten Defekten sind.
2. Referenzmessungen: Die künstlich erzeugten Pinholes werden mit einer Referenzmesstechnik vermessen, um deren Größe und Gestalt festzustellen.
3. Messungen mit aktiver Thermografie: das vorgeschlagene Messsystem wird auf seine Eignung für die vorliegende Messaufgabe überprüft.

Zur Probenpräparation wird zunächst die Möglichkeit untersucht mittels eines CW-Lasers Pinholes zu erzeugen. Dazu kommt ein CW-Laser mit einer Leistung von 200 W zum Einsatz. Es werden verschiedene Verweildauern an einer Stelle zwischen 0,1 ms und 8 ms getestet. Über die Verweildauer an einer Stelle wird der Energieeintrag in die Membran beeinflusst. Es soll die minimale Verweildauer gefunden werden, die möglichst kleine Pinholes erzeugt.

In Abbildung 5-17 ist das kleinste Pinhole zu sehen, das mit einer Verweildauer von 5 ms erzeugt wurde. Die Aufnahmen wurden mit einem Computertomographen (Zeiss Metrotom 800) erstellt. In Abbildung 5-17a ist die Lochgröße zwischen 30  $\mu\text{m}$  und 40  $\mu\text{m}$  zu sehen. Gleichzeitig ist in Abbildung 5-17b zu erkennen, dass ein Bereich zwischen 1,6 mm und 2,4 mm rund um das Pinhole einen Krater aufweist. An dieser Stelle ist die Membran aufgrund eines zu hohen lokalen Wärmeeintrags aufgeschmolzen. Auch wenn die erzeugten Pinholes sehr klein sind, eignet sich ein CW-Laser aufgrund der unerwünschten Randerscheinungen nicht zur Erzeugung künstlicher Pinholes.



a) Mit CW-Laser erzeugtes Pinhole im Detail

b) Umgebung des erzeugten Pinholes

Abbildung 5-17: Aufnahmen mit Computertomographie des mit einem CW-Lasers erzeugten Pinholes

Als nächstes wird die Möglichkeit untersucht mittels Mikronadeln Pinholes zu erzeugen. Es kommen verschiedene Mikronadeln mit Nadelgrößen zwischen  $500\ \mu\text{m}$  und  $25\ \mu\text{m}$  zum Einsatz. In Abbildung 5-18 ist eine Aufnahme mit dem gleichen Computertomographen von einem Pinhole, das mit einer Mikronadeln mit Durchmesser  $120\ \mu\text{m}$  erstellt wurde, zu sehen. Der Lochdurchmesser beträgt ca.  $80 - 90\ \mu\text{m}$ . Es wurde ein leichter Krater mit einem Durchmesser von ca.  $250\ \mu\text{m}$  gebildet. Außerdem ist an den Überständen deutlich zu erkennen, dass das Material der Membran verdrängt wurde.

Mikronadeln haben sich als geeignete Möglichkeit erwiesen, Pinholes verschiedener Größen zu erstellen und werden daher für die Probenpräparation verwendet.

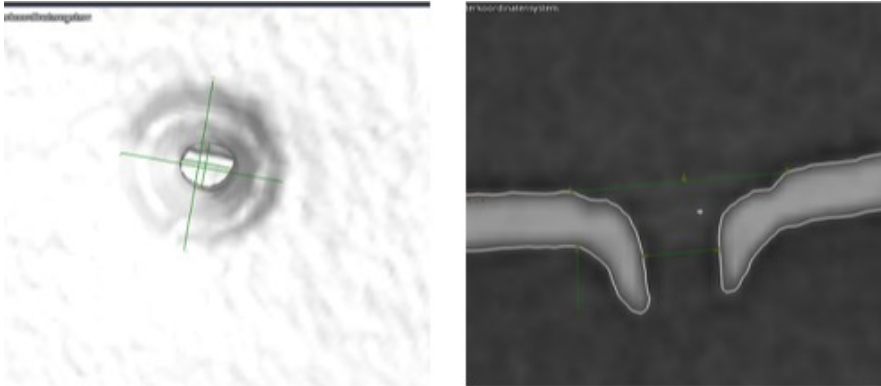
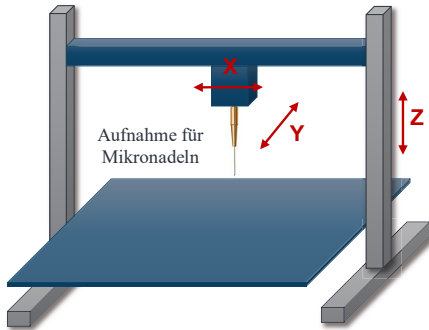
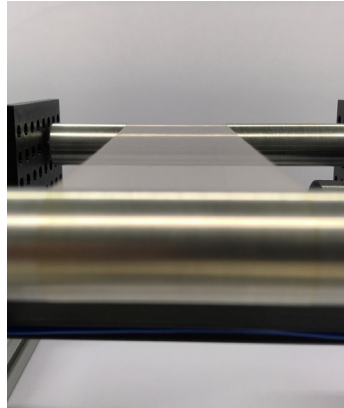


Abbildung 5-18: Aufnahmen mit Computertomographie des mit einer Mikronadel erzeugten Pinholes

In den Vorversuchen wurde festgestellt, dass der Durchmesser der Mikronadeln und die Einstichtiefe die Größe und Gestalt des erzeugten Pinholes bestimmen. Dies liegt darin begründet, dass selbst kleinste Mikronadeln eine konische Spitze haben, die je nach Einstichtiefe mehr oder weniger Material verdrängt. Um die Position und Einstichtiefe präzise zu steuern, wird ein CNC-gesteuerter Aufbau verwendet, der in Abbildung 5-19a zu sehen ist. Mit diesem Aufbau kann sowohl die Position des zu erzeugenden Pinholes in x- und y-Richtung als auch die Einstichtiefe in z-Richtung präzise und wiederholbar gesteuert werden. Es werden vier Löcher unterschiedlicher Größe in einem Quadrat mit einem Abstand von ca. 3 mm erzeugt. Diese Anordnung ist so gewählt, dass alle Löcher im Bildbereich der Thermografiekamera liegen. In Abbildung 5-19b ist ein speziell konstruierter Probenhalter zu sehen, in dem eine PEM oder CCM möglichst ähnlich zum realen R2R-Prozess aufgespannt werden kann. Die Probe wird an beiden Enden eingespannt und über zwei geschliffene Edelstahlrollen geführt, sodass der zu messende Bildbereich frei von Falten oder Unebenheiten ist. Außerdem schwebt die Probe frei in der Luft, sodass sich die Temperaturänderung durch die thermische Anregung analog zum realen Prozess im Material verhält.



a) Aufbau zur Locheinbringung

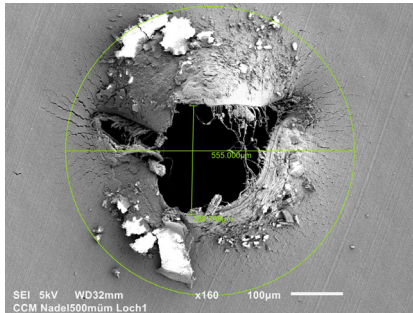


b) Membranaufspannung

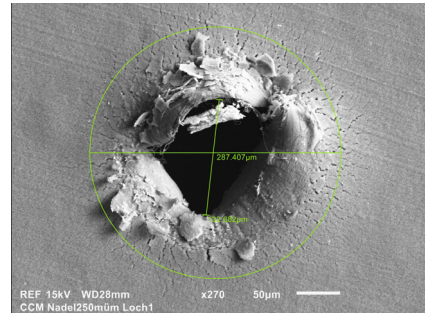
Abbildung 5-19: Versuchsaufbau zur Locheinbringung (a) und Versuchsaufbau zur Membranaufspannung (b) (eigene Abbildungen)

Die erzeugten Pinholes werden anschließend mit einem REM (Jeol JSM-6010PLUSLV) im Labor vermessen. Auch die Gestalt hängt vom Nadeldurchmesser ab: in Abbildung 5-20a ist das größte Pinhole zu sehen, das mit einem Nadeldurchmesser von 500  $\mu\text{m}$  erzeugt wurde. Es ist zu erkennen, dass der Defekt eher einem Riss als einem Loch gleicht. In Abbildung 5-20b ist ein kleineres Pinhole zu sehen, das mit einem Nadeldurchmesser von 250  $\mu\text{m}$  erzeugt wurde. Dabei ist die Membran weniger gerissen und die Katalysatorbeschichtung weist weniger Risse und Ausbrüche auf. Es ist zu erwarten, dass kleinere Pinholes eine größere Herausforderung für das Messsystem darstellen, da die Auflösung des Messsystems begrenzt ist und der thermische Einfluss bei kleineren Änderungen im Materialgefüge geringer ausfällt.





**a) Mikronadel, 500µm**  
Defektgröße ca. 220 – 560 µm  
Rissförmig, Kraterbildung



**b) Mikronadel, 250µm**  
Defektgröße ca. 130 – 280 µm  
Lochförmig, Kraterbildung

Abbildung 5-20: REM-Aufnahmen der erstellten Pinholes in der CCM mit Nadeldurchmesser 0,5 mm (a) und 0,25 mm (b) (eigene Abbildungen)

Als nächstes wird eine geeignete Wärmequelle zur thermischen Anregung des Materials benötigt. Dabei ist darauf zu achten, dass die Membran eine Temperatur von 30°C nicht übersteigt, da sonst Materialschädigungen riskiert werden. In Tabelle 5-6 sind verschiedene Anregungsquellen nach DIN EN 17119:2018-10 (2018) gelistet. Es wird zwischen inneren und äußeren Wärmequellen unterschieden. Innere Wärmequellen werden aufgrund der komplexeren Umsetzung zur Überprüfung der grundsätzlichen Eignung des Messsystems zunächst nicht betrachtet. Wärmeleitung kann nicht eingesetzt werden, da die PEM / CCM nicht berührt werden soll, um keine Beschädigungen zu riskieren. Konvektion geht immer mit einem Austausch von Teilchen einher, was zunächst vermieden werden soll. Laser und Mikrowellen werden aufgrund aufwändiger Anforderungen an den Arbeitsschutz in der Laborumgebung zunächst auch nicht weiter betrachtet. Im Folgenden werden daher eine Halogenlampe, eine Blitzlampe und ein LED-Array auf ihre Eignung zur thermischen Anregung der PEM / CCM überprüft.

Tabelle 5-6: Anregungsquellen für aktive Thermografie nach DIN EN 17119:2018-10 (2018)

Quelle	Wirkprinzip	Beispiel
Innere Wärmequelle	Mechanische Anregung	Ultraschall
	Elektrische Anregung	Gleichstrom
	Chemische Anregung	Exotherme Reaktion
	Induktive Erwärmung	Antenne, Spulen
Äußere Wärmequelle	Wärmeleitung	Heizplatten
	Konvektion	Heizstrahler
	Strahlung	Laser
		Halogen
	Blitzlampe	
	LED	
Mikrowellen		

In Abbildung 5-21 ist der Verlauf der Oberflächentemperatur einer CCM-Probe für die drei verschiedenen Anregungsquellen dargestellt. Auf der Ordinate ist die Temperaturdifferenz in °C von der Umgebungstemperatur, die bei 25 °C lag, dargestellt. Um die Probe nicht zu beschädigen, darf eine kritische Temperatur (rot) von 5 °C nicht überschritten werden. Auf der Abszisse ist die Zeit dargestellt; der Temperaturverlauf wurde für ca. zwei Minuten beobachtet. Jede Kurve wurde mit einer eigenen Probe erstellt.

Die thermische Anregung durch die Blitzlampe (blau) erfolgte nach ca. 42 Sekunden. Die Oberflächentemperatur ist unmittelbar um ca. 11 °C gestiegen. Die Blitzlampe ist daher ungeeignet, da eine Beschädigung der Probe nicht ausgeschlossen werden kann.

Die thermische Anregung durch die Halogenlampe (orange) erfolgte ca. 62 Sekunden lang ab Sekunde 0. Die Oberflächentemperatur steigt während der thermischen Anregung stetig an. Nachdem die Halogenlampe ausgeschaltet wurde, sinkt die Oberflächentemperatur wieder. Die kritische Temperaturerhöhung wird nach ca. 20 Sekunden thermischer Anregung erreicht.

Die thermische Anregung durch das LED-Array (grün) erfolgte ca. 20 Sekunden lang ab Sekunde 15. Die Oberflächentemperatur steigt nur leicht um knapp 1,5 °C. Die Veränderung der Oberflächentemperatur ist weniger genau zu steuern als mit der Halogenlampe.

Für die Erprobung des Messsystems wird eine Halogenlampe eingesetzt. Der Temperatureintrag lässt sich mit dieser Form der thermischen Anregung am besten manuell

steuern. Um die kritische Temperatur nicht zu überschreiten, wird für höchstens 10 Sekunden lang thermisch angeregt. Dabei ist mit einer Erhöhung der Oberflächentemperatur von ca. 3-4 °C zu rechnen.

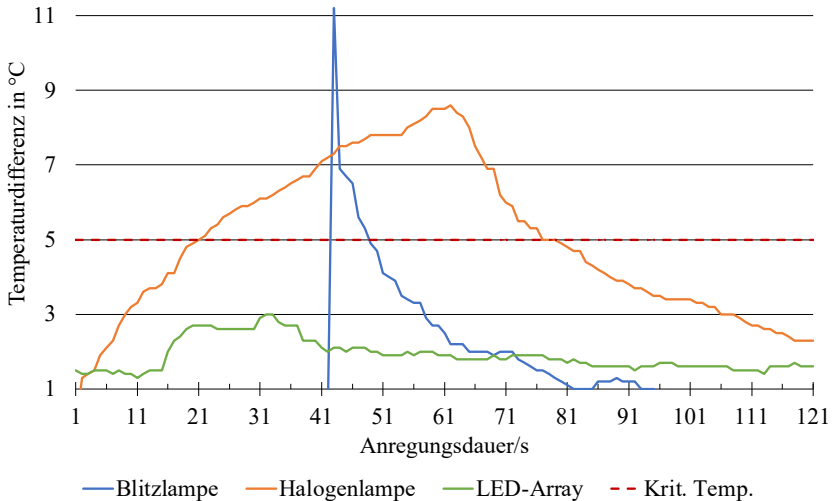
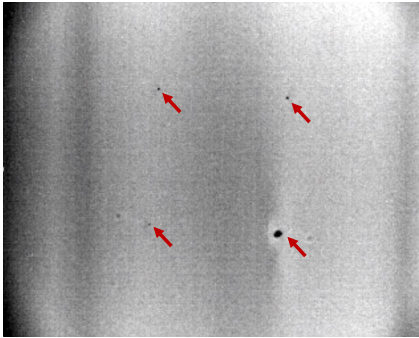


Abbildung 5-21: Verlauf der Oberflächentemperaturen der Membran nach thermischer Anregung mit verschiedenen Quellen, Temperaturdifferenz in °C vor 25°C Ausgangstemperatur (eigene Abbildung nach A\_Maelger, 2021)

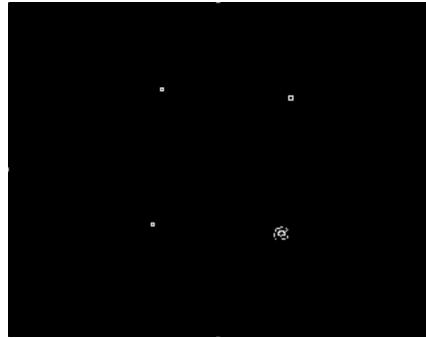
Abschließend erfolgt nun der Einsatz des Messsystems, um die Pinholes zu detektieren. Es wird die Thermografiekamera der Fa. InfraTec, Modell ImageIR 5385 S, mit einem Mikroskopobjektiv verwendet. Der mit diesem Objektiv erfasste Bildbereich beträgt ca. 5 x 5 mm. Die Messung findet stationär statt. Die CCM wird mit einer Halogenlampe für ca. 10 Sekunden angeregt. Die Messung startet zu Beginn der Anregung und dauert ca. 60 Sekunden, um den gesamten Verlauf des Wärmeeintrags und des Abkühlens beobachten zu können. Nach ca. 15 Sekunden stellt sich das in Abbildung 5-22 gezeigte Bild ein.

In Abbildung 5-22a ist die unbearbeitete Aufnahme zu sehen. Die vier Pinholes in quadratischer Anordnung sind in Form von schwarzen Punkten zu erkennen. Da es sich bei der Farbcodierung um Temperaturwerte handelt, sind schwarze Stellen als Bereiche geringerer Temperatur zu deuten. Da im Bereich der Pinholes kein Material vorliegt,

das die Wärmestrahlung aufnehmen kann, bleiben diese Bereiche kälter. Alle Pinholes können folglich mit aktiver Thermografie detektiert werden. In Abbildung 5-22b wurden auf die Originalaufnahme einfache Bildverarbeitungsoperationen, wie Erosion<sup>48</sup>, Hochpass<sup>49</sup> und Canny<sup>50</sup>, angewandt. Die Pinholes konnten dabei gezielt isoliert werden; die Kanten der Pinholes sind in Form von weißen Kreisen zu erkennen. Dies verdeutlicht die Eignung von aktiver Thermografie zur Detektion von Pinholes.



a) Unbearbeitete IR-Aufnahme



b) Mit Bildverarbeitung  
(Erosion, Hochpass, Canny)

Abbildung 5-22: Momentaufnahmen der Messungen an der CCM mit der IR-Kamera  
(a: unbearbeitet, b: mit Bildverarbeitungsoperatoren, eigene Abbildungen)

Um den Transfer in einen bewegten Bahnwareprozess, wie er im Realbetrieb vorliegt, vornehmen zu können, ist insbesondere der korrekte Abstand zwischen Anregung und Kamera notwendig. Ziel ist es, am Ort der Kamera die gleiche Temperatur wie in Abbildung 5-22 einzustellen. Liegt die Temperatur darüber oder darunter, kann die Detektion von Pinholes aufgrund von Bildrauschen nicht sichergestellt werden. Der korrekte Abstand zwischen Anregung und Kamera ergibt sich aus der Bahngeschwindigkeit und dem Abkühlverhalten der CCM oder MEA. Durch weitere Versuche, bspw. in Form eines statistischen Versuchsplans, können diese komponenten- und prozessspezifischen Parameter ermittelt werden.

---

<sup>48</sup> Ein Erosionsfilter erweitert dunkle Bereiche.

<sup>49</sup> Ein Hochpass-Filter hebt Strukturen hervor.

<sup>50</sup> Ein Canny-Filter wird zur Detektion von Kanten verwendet.

### Kritische Bewertung der Eignung des Messsystems

Durch die Versuche in der Laborumgebung wurde prinzipiell gezeigt, dass mittels aktiver Thermografie Pinholes detektiert werden können. Das fallbasierte Schließen von einer Messaufgabe aus der Batteriezellfertigung auf die vorliegende Messaufgabe aus der Brennstoffzellenfertigung war unter den gegebenen Bedingungen erfolgreich.

Für eine tatsächliche Integration des Messsystems in einen realen Produktionsprozess sind allerdings noch weitere Faktoren zu berücksichtigen:

- **Auflösung des Messsystems:** eine High-end Thermografiekamera besitzt nach aktuellem Stand der Technik eine Auflösung von ca. 1920 x 1536 Pixel<sup>51</sup>. Unter Annahme einer MEA-Bahnbreite von 300 mm im realen Produktionsprozess und dem Einsatz einer Thermografiekamera müssen ca.  $\frac{300 \text{ mm}}{1920 \text{ Pixel}} = 156 \mu\text{m}$  von einem Pixel erfasst werden (Kampker, Ayvaz, Schön, et al., 2020). Zur sicheren Detektion eines Defekts sind in der Bildverarbeitung erfahrungsgemäß ca. drei Pixel notwendig (Keferstein et al., 2018). Die daraus resultierende, minimale detektierende Defektgröße beträgt ca.  $156 \mu\text{m} * 3 = 468 \mu\text{m}$ . Sollen kleinere Defekte detektiert werden können, müssen mehrere Messsysteme eingesetzt werden. Dabei sind nicht zuletzt die Investitionskosten i.H.v. mehreren Hunderttausend Euro zu beachten.
- **Prozessgeschwindigkeit:** die Bahngeschwindigkeit beträgt im realen Produktionsprozess ca. 30 m/min (Kampker, Ayvaz, Schön, et al., 2020). Eine High-end Thermografiekamera besitzt nach aktuellem Stand der Technik (s.o.) eine Bildrate von ca. 1915 Hz. Dies entspricht 0,5 ms pro Bild. In 0,5 ms bewegt sich die Bahn unter Annahme der o.g. Prozessparameter ca. 250  $\mu\text{m}$  weit. Der kleinste detektierbare Defekt ist folglich unter Berücksichtigung der Bahngeschwindigkeit 250  $\mu\text{m}$ <sup>52</sup>.

Zusammenfassend ist aktive Thermografie auch nach diesen Überlegungen noch immer ein geeignetes Messsystem, um Pinholes im MEA-Produktionsprozess zu detektieren. Es müssen jedoch die aktuellen, technologischen und individuellen,

---

<sup>51</sup> Z.B. InfraTec ImageIR 10300 (Unter: <https://www.infratec.eu/thermography/infrared-camera/imageir-10300/>, zuletzt abgerufen am: 30.09.2023)

<sup>52</sup> Annahme: die Integrationszeit der Kamera kann ausreichend niedrig eingestellt werden, sodass eine Bewegungsunschärfe vermieden werden kann und dennoch ausreichend Temperaturinformationen im Bild gesammelt werden können.

wirtschaftlichen Grenzen berücksichtigt werden. Da die Klassen *Auflösung* und *Frequenz* in der Ontologie *Messsysteme* bereits berücksichtigt wurden, können Überlegungen dieser Art in Weiterentwicklungen des Entscheidungsunterstützungssystems auch automatisiert stattfinden.

### 5.2.2 Feuchtigkeit der Polymerelektrolytmembran

Eine PEM nimmt aufgrund ihrer ausgeprägten hydrophilen Eigenschaften schnell Wasser aus der Umgebung auf und gibt dieses ebenso schnell ab. Daraus resultieren sowohl geometrische Änderungen der PEM, die den Produktionsprozess stören, als auch Materialveränderungen, aufgrund derer die Qualität nicht mehr sichergestellt werden kann, wenn sich die Feuchtigkeit außerhalb der Toleranz befindet. In derzeitigen Produktionsanlagen werden gesamte Produktionsumgebungen klimatisiert (Wienk-Borger, 2018). Dies ist zum einen unpräzise, da der exakte Feuchtigkeitsgehalt der PEM nicht bekannt ist, und zum anderen unwirtschaftlich, da die Klimatisierung eines großen Bereichs energieintensiv ist. Mittels eines Messsystems, das den Feuchtigkeitsgehalt der PEM zur Prozesslaufzeit ermittelt, kann die Qualität der PEM hinsichtlich der klimatischen Einflüsse sichergestellt werden und durch lokale, kleinere Mikro-Environments gezielte Bedingungen in der Produktionsumgebung eingestellt werden.

Die Messaufgabe, für die eine Anfrage an das Entscheidungsunterstützungssystem gestellt wird, lautet:

Messung des Feuchtigkeitsgehalts der PEM während des Produktionsprozesses der MEA im R2R-Prozess.

#### Anfrage an das Entscheidungsunterstützungssystem

Für die Anfrage an das Entscheidungsunterstützungssystem wird die Messaufgabe wie folgt beschrieben: es wird ein Messverfahren oder ein Messsystem gesucht, mit Hilfe dessen die Feuchtigkeit (Messgröße) in einem Kunststoff (Material) mit festem Aggregatzustand In-Line (Integrationsgrad) detektiert werden kann. Der entsprechende SPARQL-Query, der diese Messaufgabe repräsentiert, ist in Quelltext 5-2 zu finden.

```

PREFIX messsystemontology: <http://ontologies.metaphacts.com/mess-messsystem/>
PREFIX messaufgabeontology: <http://ontologies.metaphacts.com/mess-messaufgabe/>

SELECT ?messaufgabe ?messverfahren ?messsystem
WHERE {
  {?messung messaufgabeontology:measureWithSystem ?messsystem .}
  {?messsystem messsystemontology:measureWithProcedure ?messverfahren .}
  {?messaufgabe messaufgabeontology:isMeasuring ?messobjekt .}
  {?messaufgabe messaufgabeontology:hasObjective ?messung .}

  {?messobjekt messaufgabeontology:isOfState messaufgabeontology:fest .}

  {?messobjekt messaufgabeontology:isOfMaterial messaufgabeontology:Kunststoffe .}

  {?messaufgabe messaufgabeontology:hasMeasurand messaufgabeontology:Feuchtigkeit .}

  {?messung messaufgabeontology:hasIntegrationLevel messaufgabeontology:In-Line .}
}
LIMIT 100

```

Quelltext 5-2: SPARQL-Query für die zweite Messaufgabe in der Brennstoffzellenfertigung

### Ergebnis der Anfrage an das Entscheidungsunterstützungssystem

In Abbildung 5-23 ist das Ergebnis der Anfrage an das Entscheidungsunterstützungssystem dargestellt. Es wurden die Einschränkungen zu Material, Aggregatzustand, Messgröße und Integrationsgrad ausgewählt. Es wurden keine Empfehlungen aus dem validierten Expertenwissen gezogen und zwei Empfehlungen aus Analogieschlüssen.

Für die beschriebene Messaufgabe wurde eine vergleichbare Messaufgabe (Feuchtigkeitsmessung) gefunden. Diese beschreibt die Messung der Feuchtigkeit in beschichteten Messobjekten in der Batteriezellfertigung. (Huber, 2017)

Das zugehörige Messverfahren ist Terahertz (THz)-Strahlung. Es liegt dabei das physikalische Prinzip zu Grunde, dass THz-Strahlung dielektrische Materialien, wie z.B. Papier oder Kunststoff, durchdringt, von Wasser oder anderen polaren Stoffen aber absorbiert wird. Ein Messobjekt mit einem höheren Feuchtigkeitsgehalt würde demnach mehr THz-Strahlung absorbieren; auf diese Weise kann auf den Feuchtigkeitsgehalt geschlossen werden.

Die vom Entscheidungsunterstützungssystem vorgeschlagenen Messsysteme sind das Menlo Systems Tera K15 und die Kamera Ino Microxcam 384i. Das System K15 ist für Messungen diskreter Punkte geeignet, während das bildgebende System Microxcam 384i auch Bereiche erfassen kann. Da bildgebende Verfahren i.d.R. einfacher zu interpretieren sind, wird dieses System für die Versuche verwendet.

**Ergebnis der Suche auf dem Wissensgraphen**

Suchergebnisse SPARQL Query Raw Data (JSON)

**Beschreiben Sie hier Ihre Messaufgabe, für die Sie ein Messsystem suchen:**

Measurement\_Time

Sector

Integration\_Level

Measurement\_Object

Material

Aggregate\_State

Messrand

**Validiertes Expertenwissen (0 Ergebnisse)**

Es wurde kein passendes Messsystem oder Messverfahren gefunden.

**Ergebnisse aus Analogieschlüssen (2 Ergebnisse)**

Zugeh. Branche/Messaufgabe: Feuchtigkeitsmessung  
 Dabei genutztes Messsystem: MICROCAM-384  
 Dabei genutztes Messverfahren: Terahertzstrahlung

Zugeh. Branche/Messaufgabe: Feuchtigkeitsmessung  
 Dabei genutztes Messsystem: K15  
 Dabei genutztes Messverfahren: Terahertzstrahlung

Abbildung 5-23: Ergebnis der Anfrage für Messaufgabe 2



## Erprobung des ausgewählten Messsystems

Die Erprobung des Messsystems untergliedert sich in drei Teile:

1. Probenpräparation: es werden zwei Proben mit unterschiedlichem Feuchtigkeitsgehalt vorbereitet. Dabei dient eine Probe als Referenzmessung, deren Feuchtigkeitsgehalt vorab den Umgebungsbedingungen angepasst wird.
2. Referenzmessungen: um eine Referenz zur Auswertung des THz-Signals zu erhalten, werden gravimetrische Referenzmessungen durchgeführt.
3. Messungen mit THz-Kamera: das vorgeschlagene Messsystem wird auf seine Eignung für die vorliegende Messaufgabe überprüft, indem der Trocknungsverlauf der Membran von der THz-Kamera aufgenommen wird. Ein Zusammenhang zwischen dem Feuchtigkeitsgehalt und dem THz-Signal würde sich in einer Veränderung der Grauwerte äußern.

Es werden zunächst zwei verschiedene Membranausschnitte vorbereitet. Die erste Probe wird für 24 Stunden in einem demineralisierten Wasserbad in einen gesättigten Zustand gebracht. Die Probe wird erst unmittelbar vor der Messung aus dem Wasserbad genommen. Die zweite Probe wird 24 Stunden vor der Messung im Labor platziert, um sich an die dortigen Umgebungsbedingungen anzugleichen. Die Umgebungsbedingungen im klimatisierten Messraum liegen bei ca. 22,5°C und 55% rel. Luftfeuchte.

Als Referenzmessung werden gravimetrische Messungen durchgeführt, d.h. die während der Messung trocknende Membran wird gewogen. Es wird die Waage ABT 220-5DNM der Fa. Kern verwendet. In Abbildung 5-24 ist ein typischer Trocknungsverlauf einer PEM über einen Zeitraum von ca. 40 Minuten zu sehen. Zu Beginn trocknet die PEM noch schnell. Danach verliert sie zunehmend weniger Wasser. Nach ca. 30 Minuten nähert sich der Zustand einem Gleichgewicht an.

Der Versuchsaufbau zur Erprobung des Messsystems ist in Abbildung 5-25 dargestellt. Beide Membranstücke werden vor einer THz-Quelle positioniert und von einer THz-Kamera aufgenommen. Die THz-Quelle emittiert eine THz-Strahlung in Richtung der THz-Kamera. Die THz-Strahlung durchstrahlt dabei die beiden Membranstücke. Diese absorbieren einen Teil der THz-Strahlung. Die THz-Kamera erfasst dementsprechend die transmittierte Strahlung. Die Messdauer beträgt ca. 30 Minuten, um den gesamten Trocknungsverlauf zu analysieren. Die Membranausschnitte werden in einem 3D-gedruckten Werkstückhalter eingespannt.

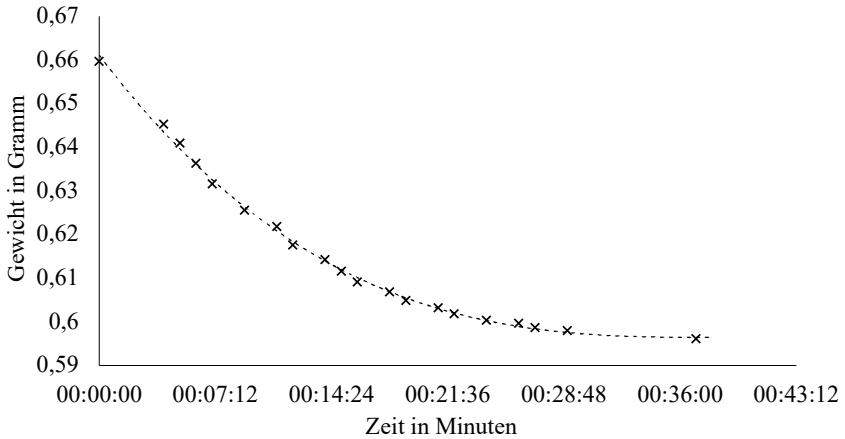


Abbildung 5-24: Gravimetrische Referenzmessung des Trocknungsverhaltens einer PEM

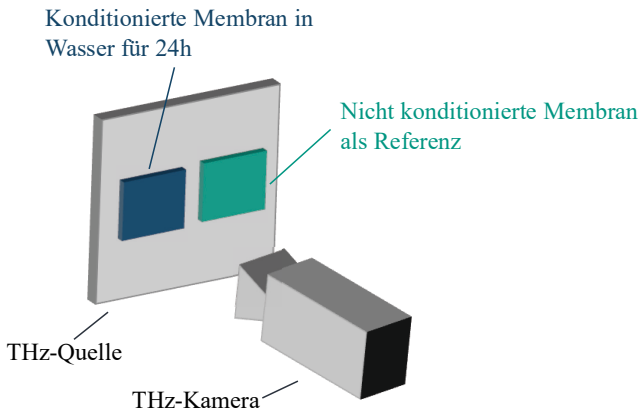


Abbildung 5-25: Versuchsaufbau zur Messung der Membranfeuchtigkeit mit einer THz-Kamera (eigene Abbildung)

In Abbildung 5-26 sind Ausschnitte aus der Aufnahme (links: zu Beginn der Messung in Minute 1, rechts: am Ende der Messung in Minute 30) dargestellt.

In Abbildung 5-26a ist auf den Bildern der dunkle Umriss der beiden Werkstückhalter zu erkennen. An diesen Stellen wird das THz-Signal stark abgeschirmt, d.h. die THz-Strahlung wird fast vollständig vom Werkstückhalter absorbiert. Innerhalb der Werkstückhalter sind die beiden Membranausschnitte zu sehen. Links wurde die befeuchtete Membran, rechts die Membran zur Referenz positioniert. Das rechte Bild in Abbildung 5-26a ist im Vergleich zum linken Bild insgesamt heller, allerdings lassen sich auf diese Weise noch keine konkreten Aussagen zum Feuchtigkeitsgehalt treffen.

In Abbildung 5-26b sind die gleichen Zeitpunkte dargestellt, allerdings wird jeweils die Differenz der Grauwerte zum Bild in Minute 0 dargestellt. Im Bereich der nicht-konditionierten Membran (rechter Teil des Bilds) ist, neben dem insgesamt heller werdenden Bild, keine nennenswerte Änderung zu erkennen. Das heißt, dass die nicht-konditionierte Membran über den Zeitraum der Messung einen nahezu konstanten Anteil der THz-Strahlung absorbiert hat. Im Bereich der konditionierten Membran (linker Teil des Bilds) ist ein heller Fleck zu erkennen; die konditionierte Membran hat demnach zum Ende der Messung deutlich weniger THz-Strahlung absorbiert als zu Beginn der Messung. Dies ist das Resultat des Trocknungsprozesses der Membran.

Die bestätigt bereits die grundlegende Hypothese. Im Folgenden sollen nun nicht mehr nur zwei Messzeitpunkte (Minute 1 und Minute 30), sondern die gesamte Dauer der Messung analysiert werden, um den Zusammenhang weiter zu belegen.

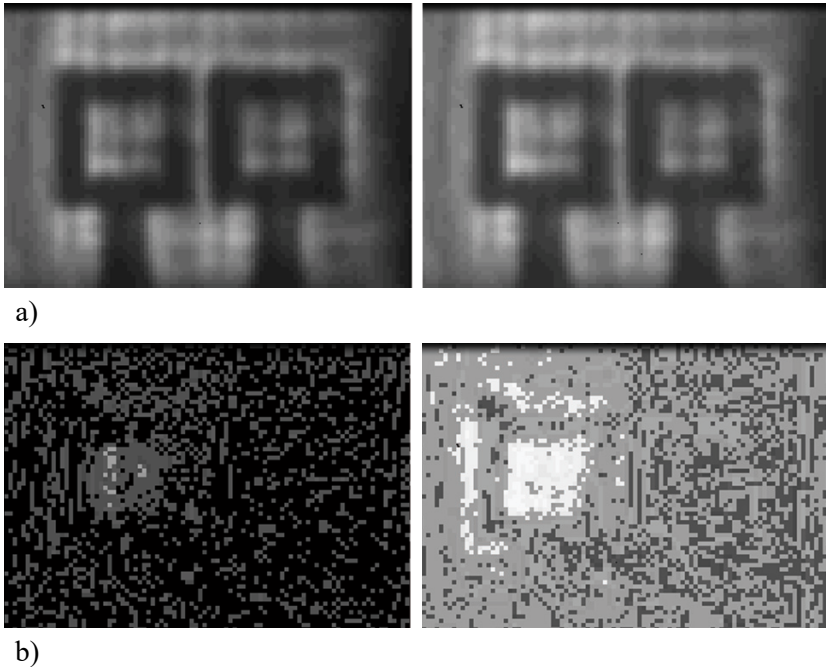


Abbildung 5-26: a) Unbearbeitete Aufnahme des bildgebenden THZ-Verfahrens b) Differenz des jeweils aktuellen Bilds zu Minute 0 (links: Minute 1, rechts: Minute 30)

In Abbildung 5-27 ist die Auswertung der Grauwertdifferenzen zwischen den beiden Membranausschnitten zu sehen. Es ist die Grauwertdifferenz über dem Gewicht der befeuchteten Membran in Gramm dargestellt. Aus Abbildung 5-24 geht hervor, dass das Gewicht der konditionierten Membran mit der Zeit korreliert: das Gewicht der konditionierten Membran nimmt über die Zeit ab, da das Wasser aus der Membran entweicht. Für die Grauwertdifferenz wurden zunächst die durchschnittlichen Grauwerte der Bildbereiche der beiden Membranausschnitte gebildet und diese anschließend voneinander abgezogen. Auf diese Weise wird der Unterschied der Feuchtigkeitszustände und allgemeine Trends (wie z.B. ein insgesamt heller werdendes Bild) berücksichtigt. Die Grauwertdifferenz besitzt keine Einheit.

Der Verlauf in Abbildung 5-27 zeigt einen nahezu linearen Zusammenhang zwischen dem Grauwert des THZ-Bilds und dem Gewicht, also dem Feuchtigkeitsgehalt der

Membran. Je geringer das Gewicht der Membran wird, d.h. je mehr Wasser aus der Membran entweicht, desto geringer ist die Grauwertdifferenz zwischen den Membranstücken. Während sich also die Feuchtigkeitszustände der Membranstücke angleichen, gleicht sich auch der Anteil der THz-Strahlung, der von den Membranstücken absorbiert wird, an.

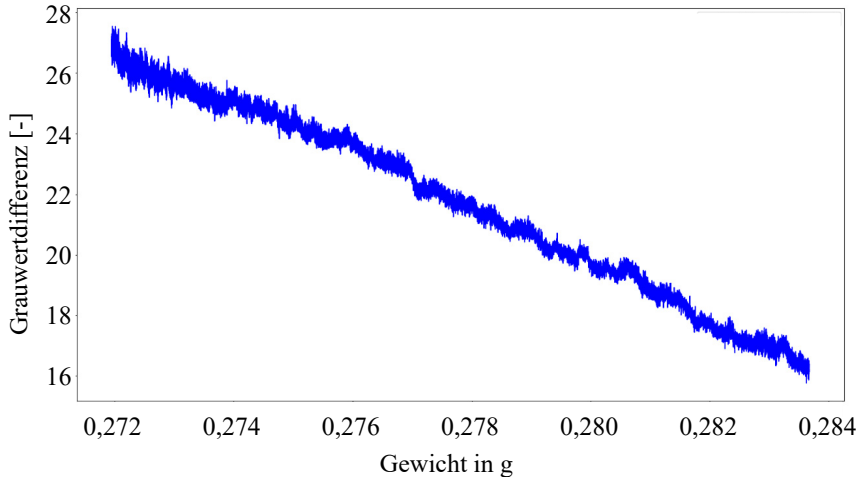


Abbildung 5-27: Ergebnis der THz-Messung als Grauwertdifferenz [o.E.] über dem Gewicht der Membran [in Gramm] (eigene Abbildung)

### Kritische Bewertung der Eignung des Messsystems

Durch die Versuche in der Laborumgebung wurde prinzipiell gezeigt, dass mittels THz-Strahlung der Feuchtigkeitsgehalt der PEM gemessen werden kann. Das fallbasierte Schließen von einer Messaufgabe aus der Batteriezellfertigung auf die vorliegende Messaufgabe aus der Brennstoffzellenfertigung war unter den gegebenen Bedingungen erfolgreich.

Es bleibt jedoch zu prüfen, ob die Feuchtigkeitsunterschiede in einer realen Produktionsumgebung trotz des starken Rauschens der Messung präzise gemessen werden können.

Das Gewicht der Membran aus den zuvor gezeigten Experimenten wurde vor der Konditionierung gewogen, um die Gewichtsänderung durch die Wasseraufnahme

quantifizieren zu können. In 24 Stunden hat die Membran ca. 15 % ihres Ausgangsgewichts an Wasser aufgenommen. Während der ca. 30-minütigen Messung hat die Membran ca. 72 % des aufgenommenen Wassers an die Umgebung abgegeben. Dies entspricht einer Änderung des Feuchtigkeitsgehalts der Membran um ca. 11 Masse-%. Derartige Änderungen der Membranfeuchtigkeit sind im realen Produktionsumfeld unwahrscheinlich. Die Messung kleinerer Feuchtigkeitsschwankungen wird herausfordernd.

Eine weitere Herausforderung dieses Versuchsaufbaus ist, dass die Messung eine Referenz der Grauwerte der THz-Kamera zu Beginn und zum Ende der Messung benötigt. Diese Referenz wurde in den gezeigten Versuchen über gravimetrische Messungen dargestellt. Gravimetrische Referenzmessungen sind im realen Produktionsprozess (R2R-Prozess) allerdings nicht möglich. Es müssten dafür regelmäßige Kalibrierungen durchgeführt werden oder Referenzproben eingesetzt werden.

### Alternative Suchanfrage

Das vorliegende Beispiel verdeutlicht, dass das Entscheidungsunterstützungssystem auf unterschiedliche Arten nützliche Empfehlungen treffen kann. Statt der eingangs definierten Suchanfrage in Form der Beschreibung der Messaufgabe ist auch die Suche über ein konkretes Messverfahren möglich.

Ist das physikalische Phänomen, dass THz-Strahlung von Wasser absorbiert wird, bekannt, kann gezielt nach Messsystemen gesucht werden, die eine Verbindung zum Messverfahren *Terahertzstrahlung* haben. Der entsprechende SPARQL-Query ist in Quelltext 5-3 gezeigt. Das Ergebnis sind ebenfalls das Tera K15 der Fa. Menlo Systems und die Kamera Microxcam 384i der Fa. Ino.

```

PREFIX messsystemontology: <http://ontologies.metaphacts.com/mess-messsystem/>
PREFIX messaufgabeontology: <http://ontologies.metaphacts.com/mess-messaufgabe/>

SELECT ?messsystem
WHERE {

  ?messsystem messsystemontology:usesProcedure messaufgabeontology:Terahertzstrahlung
  .
}
LIMIT 100

```

Quelltext 5-3: SPARQL-Query für eine alternative Anfrage der zweiten Messaufgabe

## 6 Diskussion und Ausblick

### 6.1 Evaluation der Anforderungserfüllung

In Kapitel 4.1 wurde der Lösungsansatz dieser Arbeit als Umsetzung der in Kapitel 3.1 genannten Anforderungen an Entscheidungsunterstützungssysteme für die Auswahl von Messsystemen formuliert. Die Umsetzung dieser Anforderungen wird im Folgenden diskutiert.

#### Ontologie

Zunächst wurde eine Ontologie für die Konzepte *Messsysteme* und *Messaufgabe* entwickelt, um Wissen eindeutig zu modellieren und Interoperabilität zwischen Anwendern und Domänen sicherzustellen. In Kapitel 2.4.1 wurden Eigenschaften einer Ontologie genannt, die zur Überprüfung der „Richtigkeit“ der Ontologie geprüft werden. Diese werden nachfolgend evaluiert, wobei zu beachten gilt, dass die Evaluation der Eigenschaften teilweise auf subjektiven Einschätzungen beruhen.

Die Eigenschaft der **Genauigkeit** ist erfüllt, da für die Erstellung der Ontologie sowohl bereits anerkannte Basis- und Domänenontologien (z.B. Pfrommer et al. (2022), Ahmad et al. (2018), Hippolyte et al. (2021) oder Bharti et al. (2021)) und Normen der Messtechnik (v.a. DIN 1319-1:1995-01, 1995) als Domänenwissen berücksichtigt wurden. Die Ontologie spiegelt somit das Fachwissen der Domäne wider.

Die Eigenschaft der **Anpassungsfähigkeit** wurde gezeigt, indem der Problemlösungszyklus fallbasiertes Schließen erfolgreich auf Basis der Ontologie umgesetzt wurde. Die Ontologie wurde für diesen Zweck optimiert, indem die Ontologien für *Messsysteme* und *Messaufgaben* mit Relationen verbunden sind, die für den Analogieschluss verwendet werden.

Die Eigenschaft der **Übersichtlichkeit** ist erfüllt, da die Beschreibung der Klassen in mehreren Sprachen (deutsch und englisch) verfügbar ist und die Relationen eindeutige Bezeichnungen haben. Unter Berücksichtigung der verwendeten Definitionen, insbesondere aus der Messtechnik, ist der Kontext verständlich und ausreichend dokumentiert.

Die Eigenschaft der **Vollständigkeit** ist erfüllt, da alle Aspekte in der Ontologie abgebildet sind, die für die Entwicklung des Entscheidungsunterstützungssystems in dieser Arbeit notwendig waren. Gleichwohl muss die Ontologie für neue Anwendungen ggf.

erweitert werden, was durch die Eigenschaft der Anpassungsfähigkeit jedoch möglich ist.

Die Eigenschaft der **Berechnungseffizienz** ist gegeben, da die Schlussfolgerungen im Entscheidungsunterstützungssystem zur Laufzeit durchgeführt werden. Zu beachten gilt jedoch die kleine Wissensbasis des Validierungsbeispiels. Die Berechnungseffizienz muss bei einer größeren Wissensbasis ggf. erneuert bewertet werden.

Die Eigenschaft der **Prägnanz** ist mit Einschränkungen erfüllt. Da das Ziel die Entwicklung einer umfangreichen Domänenontologie war, enthält die Ontologie keine für die Domäne irrelevanten Aussagen. Für das entwickelte Entscheidungsunterstützungssystem werden allerdings nicht alle Aussagen benötigt. Um die langfristige Nutzbarkeit und Vollständigkeit zu gewährleisten, wurde die Ontologie dennoch über das Entscheidungsunterstützungssystem hinausgehend modelliert.

Die Eigenschaft der **Konsistenz** ist teilweise erfüllt, da die Aussagen der Ontologie nicht zu Widersprüchen führen. Bei der Generierung der Analogieschlüsse wurden jedoch teilweise Widersprüche generiert; bspw. wurde in Kapitel 5.1.2 gezeigt, dass Messsystemen sowohl die Eigenschaft *berührend* als auch *nicht-berührend* zugeordnet wurde.

Die Eigenschaft der **Erreichbarkeit** ist erfüllt, da durch die Berücksichtigung der Ontologie nach Pfrommer et al. (2022) auf eine leichte Integrierbarkeit der Ontologie geachtet wurde.

### **Analogieschlüsse**

Die Methoden zur Generierung von Analogieschlüssen mittels Embeddings wurden erfolgreich angewandt. Es wurden insbesondere Tripel vorhergesagt, die eine Verbindung zwischen Messaufgaben und Messverfahren oder Messsystemen repräsentieren. Zugleich ist jedoch festzuhalten, dass auch widersprüchliche Tripel generiert wurden (s. Eigenschaft *Konsistenz* bei der Bewertung *Ontologie*). Ebenso werden im Entscheidungsunterstützungssystem Analogieschlüsse gezogen, die ein Domänenexperte ausschließen würde (Vgl. Tabelle 5-5).

### **Automatisierung**

Die Automatisierung des Entscheidungsunterstützungssystems ist für die Erstellung der Wissensbasis und die Implementierung des fallbasierten Schließens getrennt zu



bewerten. Die Anwendung des Problemlösungszyklus fallbasiertes Schließen, also die Suche nach Messsystemen für neue Messaufgaben, ist vollständig automatisiert und bedarf keines Expertenwissens. Insbesondere die Generierung und Berücksichtigung von Analogieschlüssen bei der Suche wurde automatisiert. Das Entscheidungsunterstützungssystem bietet damit eine hohe Bedienerfreundlichkeit. Die Erstellung und Bewertung der Analogieschlüsse ist hingegen mit manuellen Aufwänden verbunden. Dies hat den Vorteil, dass die Qualität der erstellten Wissensbasis hoch ist. Allerdings ist die Größe der initialen Wissensbasis eher gering (ca. 2500 Tripel). Ohne eine automatisierte Erstellung der Wissensbasis ist nicht mit einer größeren Wissensbasis zu rechnen, wie sie bei Anwendungen mit Wissensgraphen üblich ist.

### **Lernfähigkeit**

Der Problemlösungszyklus fallbasiertes Schließen sieht vor, gelernte Fälle im letzten Schritt in der Fallbasis zu speichern, um sie für zukünftige Anfragen zu nutzen. In Kapitel 5.2 wurde dieses Vorgehen gezeigt. Das Entscheidungsunterstützungssystem ist daher grundsätzlich lernfähig. Die Benutzeroberfläche muss hingegen noch um entsprechende Funktionen erweitert werden, um gelernte Fälle in der Wissensbasis zu speichern.

### **Nachvollziehbarkeit**

Der Problemlösungsprozess des Entscheidungsunterstützungssystems ist nachvollziehbar gestaltet, da sowohl die zum Vergleich herangezogenen, ähnlichen Messaufgaben als auch eine Wahrscheinlichkeit für die Eignung der Vorschläge aus Analogieschlüssen angezeigt werden. Dem Nutzer wird darüber hinaus angezeigt, welche Vorschläge aus validiertem Expertenwissen stammen und welche Vorschläge Ergebnis der automatisierten Analogieschlüsse, die u.U. falsch sein können, sind.

## **6.2 Ausblick**

Die grundsätzliche Eignung eines Ontologie-basierten Ansatzes mittels Wissensgraphen zur Entwicklung eines fallbasierten Entscheidungsunterstützungssystems wurde in dieser Arbeit erfolgreich gezeigt. Die Ergebnisse zeigen das Potential auf, den gewählten Ansatz zu verbessern oder auf Basis der Ontologie weitere nützliche Anwendungen zu entwickeln.

Zur Verbesserung des gewählten Ansatzes ist insbesondere die Vergrößerung der Wissensbasis wichtig. Da die Wissensbasis in dieser Arbeit manuell erstellt wurde, sind die

späteren Möglichkeiten aufgrund der kleinen Datenbasis begrenzt. Weiterführende Arbeiten könnten sich mit einer automatisierten Erstellung der Wissensbasis befassen. Dazu könnten bspw. wissenschaftliche Veröffentlichungen mit Methoden des Natural Language Processings (NLP) nach Messaufgaben und zugehörigen Messsystemen durchsucht werden, um die Wissensbasis automatisiert zu erweitern. Dabei muss aber damit gerechnet werden, dass die Qualität der Wissensbasis sinken wird.

Des Weiteren kann der Ontologie-basierte Ansatz um Regeln erweitert werden, die nicht nur bei der Erstellung der Wissensbasis, sondern auch bei der Suche unterstützen können. Durch die Kombination der Ontologie mit Regeln kann das Domänenwissen deutlich präziser abgebildet werden. Bei der Erstellung der Wissensbasis könnte eine nützliche Regel sein, dass ein Messsystem, dem durch einen Experten bereits die Messobjektschnittstelle *berührend* oder *nicht-berührend* zugeordnet wurde, keine weitere Messobjektschnittstelle durch einen Analogieschluss zugeordnet wird. Bei der Suche würden einfache Abschätzungen zur Auflösung oder Frequenz, wie sie in Kapitel 5.2.1 und 5.2.2 manuell durchgeführt wurden, helfen, um die Eignung eines vorgeschlagenen Messsystems schneller bewerten zu können.

Außerdem kann die Suche zu einem multikriteriellen Ansatz erweitert werden, bei dem mehrere Auswahlprozesse gleichzeitig betrachtet werden. So ist es neben dem fallbasierten Schließen bspw. möglich, Messsysteme auf Basis der Toleranzen des Messobjekts und der Messunsicherheit des Messsystems auszuwählen. Um das System möglichst generalisierbar zu gestalten, sollte nicht nur ein Ansatz, sondern die Kombination verschiedenster Ansätze implementiert werden. Über Gewichtungsfaktoren kann dann gesteuert werden, wie groß der Einfluss der verschiedenen Auswahlprozesse auf das finale Ergebnis ist.

Vor dem Hintergrund der sich zunehmend etablierenden, autonomen Messtechnik und dem funktionsorientierten Messen kann die Ontologie *Messaufgaben* um die Funktion eines Produkts (des Messobjekts) erweitert werden. Eine Funktion sollte dann mit konkreten Messaufgaben verbunden werden. Auf diese Weise kann über die Funktion eines Produkts, über die Messaufgabe, direkt auf geeignete Messsysteme geschlossen werden, mit der eine Aussage über den Produktzustand getroffen werden kann.

## 7 Zusammenfassung

Die Auswahl von Messsystemen in unreifen Produktionsprozessen setzt Erfahrung und Wissen aus verschiedenen Domänen voraus: zum einen ist die Definition der Anforderungen einer zu lösenden Messaufgabe sowie des Produktionsprozesses notwendig und zum anderen sind diese Anforderungen einem breiten Angebot an Messsystemen gegenüberzustellen. Dieser Auswahlprozess wird derzeit von Experten durchgeführt, die sowohl über Wissen über den Produktionsprozess als auch über Messsysteme verfügen müssen. In unreifen Produktionsprozessen ist das Wissen über den Produktionsprozess oftmals noch nicht ausreichend vorhanden. Außerdem werden in unreifen Produktionsprozessen zunehmend mehr Messsysteme verbaut, da diese günstiger werden und moderne Datenanalyseverfahren die Verarbeitung größerer Datenmengen erlauben.

Daraus resultiert die Notwendigkeit, Erfahrungswissen aus verschiedenen Branchen und Anwendungen zu zentralisieren und auch für Anwender ohne Expertenwissen zugänglich zu machen. Die Auswahl von Messsystemen in unreifen Produktionsprozessen wird dadurch erleichtert.

Das Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems für die Auswahl von Messsystemen in unreifen Produktionsprozessen. Der Auswahlprozess nutzt die Problemlösungsmethodik fallbasiertes Schließen nach Aamodt & Plaza (1994). Dabei wird eine neue, zu lösende Messaufgabe als Fall betrachtet und mit einer sog. Fallbasis (d.h. in der Vergangenheit bereits durchgeführte Messaufgaben) verglichen. Die ähnlichsten Messaufgaben werden ausgewählt, um für die zu lösende Messaufgabe dieselben Messverfahren oder Messsysteme vorzuschlagen. Dieser Problemlösungsmethodik liegt die Annahme zu Grunde, dass Messaufgaben oftmals bereits in ähnlicher Form in anderen Branchen oder Anwendungen gelöst wurden.

Für dieses Ziel wird zunächst eine Ontologie entwickelt, um die Interoperabilität zwischen verschiedenen Branchen, Anwendungen und Nutzern zu ermöglichen. Die Ontologie modelliert insbesondere die Konzepte *Messsysteme* und *Messaufgabe*. Diese Konzepte werden in der Modellierung miteinander verbunden, sodass der eingangs beschriebene Analogieschluss möglich ist. Bei der Modellierung werden bereits bekannte Ontologien zur Strukturierung und Konkretisierung betrachtet. Die Ontologie wurde als RDF/XML-Beschreibung veröffentlicht (s. Kapitel 5).

Anschließend wird eine Wissensbasis erstellt, die in Form eines Wissensgraphen gespeichert wird. Die Wissensbasis enthält in der Vergangenheit durchgeführte, von Experten validierte, Messaufgaben und dabei eingesetzte Messsysteme. Um neben den bereits validierten Messsystemen auch neue, bislang nicht validierte Messsysteme vorschlagen zu können, werden Analogieschlüsse zwischen Messaufgaben und Messsystemen generiert. Diese Analogieschlüsse stellen Alternativen dar, wie eine Messaufgabe zu lösen sein kann. Dazu werden sog. Embeddings für den Wissensgraphen, d.h. die Abbildung des Wissens in einem Vektorraum, erstellt. Mit diesen Embeddings wird wahrscheinliches, neues Wissen erzeugt, das anschließend in der Wissensbasis gespeichert wird. Um optimale Ergebnisse zu erzielen, werden verschiedene Modelle für das Embedding verglichen; in der Validierung wird *TransH* mit einem Wert für *Hits@10* von 0,65 verwendet. Da die Analogieschlüsse zwar nützlich, aber oft falsch sein können, werden diese anschließend von einem Experten auf ihre Richtigkeit bewertet. Der Wissensgraph wird abschließend mit SHACL-Shapes validiert, um die Konformität zur Ontologie sicherzustellen.

Im nächsten Schritt wird ein fallbasiertes Entscheidungsunterstützungssystem entwickelt, das einem Anwender ohne Expertenwissen zur Verfügung gestellt werden kann. Das System ermöglicht die Beschreibung einer Messaufgabe, ohne dabei Kenntnis über potenziell geeignete Messsysteme zu besitzen. Auf Basis der Nutzereingabe werden Suchen auf dem Wissensgraphen durchgeführt. Das Ergebnis der Suche sind sowohl die bereits validierten Messsysteme als auch neue, noch nicht validierte Messsysteme. Zur besseren Nachvollziehbarkeit wird kenntlich gemacht, woher die vorgeschlagenen Messsysteme jeweils stammen.

Abschließend wird das Vorgehen anhand der Batterie- und Brennstoffzellenfertigung validiert. Die Batteriezellfertigung dient als Beispiel für eine Branche, in der viel Erfahrungswissen zu Messaufgaben und Messsystemen in aktuellen Forschungsprojekten vorliegt. Es wird hierfür eine Wissensbasis, bestehend aus 86 Messsystemen und 170 Messaufgaben, erstellt. Die Brennstoffzellenfertigung dient als Beispiel eines unreifen Produktionsprozesses, für den Messaufgaben definiert und geeignete Messsysteme gesucht werden. Die exemplarischen Messaufgaben sind die Detektion von Pinholes in der MEA und die Messung des Feuchtigkeitsgehalts der PEM. Für beide Messaufgaben wird eine Anfrage an das Entscheidungsunterstützungssystem gestellt und die vorgeschlagenen Messsysteme experimentell erprobt. Die Vorschläge erweisen sich als geeignet für die definierten Messaufgaben.



---

## Liste der eigenen Publikationen

Sasse et al. 2022

Sasse, F., Fischer, G., Eschner, N., & Lanza, G. (2022). „Improving End-of-Line Quality Control of Fuel Cell Manufacturing through Machine Learning enabled Data Analysis”. Fuel Cell Conference Chemnitz. 27.05.2022. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa2-764496>.

Schild et al. 2022

Schild, L., Sasse, F., Kaiser, J.-P., & Lanza, G. (2022). „Assessing the optical configuration of a structured light scanner in metrological use”. *Measurement Science and Technology*, 33(8), 085018, S. 1-16. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ac6e2f>.

## Literaturverzeichnis

Literaturangaben nach dem Schema (A\_<Nachname> <Jahr>) beziehen sich auf studentische Abschlussarbeiten, die vom Verfasser dieser Arbeit inhaltlich und organisatorisch angeleitet wurden.

Aamodt, A., & Plaza, E. (1994). Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches. *AI Communications*, 7(1), S. 39–59. <https://doi.org/10.3233/AIC-1994-7104>.

Abdelghany, A. S., Darwish, N. R., & Hefni, H. A. (2019). An agile methodology for ontology development. *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, 12(2), S. 170–181. <https://doi.org/10.22266/IJIES2019.0430.17>.

Abecker, A., & van Elst, L. (2009). Ontologies for Knowledge Management. In *Handbook on Ontologies* (S. 713–734). Springer. Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-92673-3\\_32](https://doi.org/10.1007/978-3-540-92673-3_32).

Aggarwal, C. C. (2016). *Recommender Systems*. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-29659-3>.

Aha, D. W. (1998). The omnipresence of case-based reasoning in science and application. *Knowledge-Based Systems*, 11(5–6), S. 261–273. [https://doi.org/10.1016/S0950-7051\(98\)00066-5](https://doi.org/10.1016/S0950-7051(98)00066-5).

Aha, D. W., Kibler, D., & Albert, M. K. (1991). Instance-based learning algorithms. *Machine Learning*, 6(1), S. 37–66. <https://doi.org/10.1007/BF00153759>.

Ahmad, M., Ferrer, B. R., Ahmad, B., Vera, D., Martinez Lastra, J. L., & Harrison, R. (2018). Knowledge-based PPR modelling for assembly automation. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 21, S. 33–46. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2018.01.001>.

A\_Maelger, J. (2021). *Systematischer Vergleich thermografischer Messmethoden zur Qualitätssicherung in der PEM-Brennstoffzellenfertigung* [Bachelorarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

Ameri, F., & Dutta, D. (2006). An Upper Ontology for Manufacturing Service Description. *Volume 3: 26th Computers and Information in Engineering Conference, 2006*, S. 651–661. <https://doi.org/10.1115/DETC2006-99600>.

- Angles, R., & Gutierrez, C. (2008). Survey of graph database models. *ACM Computing Surveys*, 40(1), S. 1–39. <https://doi.org/10.1145/1322432.1322433>.
- Antoniou, G., & Harmelen, F. van. (2009). Web Ontology Language: OWL. In *Handbook on Ontologies* (S. 91–110). Springer. Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-92673-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-540-92673-3_4).
- Aßmann, U., Zschaler, S., & Wagner, G. (2006). Ontologies, Meta-models, and the Model-Driven Paradigm. In *Ontologies for Software Engineering and Software Technology* (S. 249–273). Springer. Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/3-540-34518-3\\_9](https://doi.org/10.1007/3-540-34518-3_9).
- Atkinson, C., Gutheil, M., & Kiko, K. (2006). On the Relationship of Ontologies and Models. In S. Brockmans, J. Jung, & Y. Sure (Hrsg.), *Meta-modelling and ontologies – Proceedings of the 2nd Workshop on Meta-Modelling*. Gesellschaft für Informatik e. V. Bonn.
- Atkinson, C., & Kuhne, T. (2003). Model-driven development: a metamodeling foundation. *IEEE Software*, 20(5), S. 36–41. <https://doi.org/10.1109/MS.2003.1231149>.
- Baader, F., Horrocks, I., & Sattler, U. (2009). Description Logics. In *Handbook on Ontologies* (S. 21–43). Springer. Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-92673-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-540-92673-3_1).
- Barrasa, J., Hodler, A. E., & Webber, J. (2021). *Knowledge Graphs Data in Context for Responsive Businesses* (First Edition). O'Reilly Media, Inc. <https://neo4j.com/knowledge-graphs-data-in-context-for-responsive-businesses/>
- Bauckhage, C., Hübner, W., Hug, R., Paaß, G., & Rüping, S. (2020). 11 Grundlagen des Maschinellen Lernens. In G. Görz, U. Schmid, & T. Braun (Hrsg.), *Handbuch der Künstlichen Intelligenz* (S. 429–508). De Gruyter. Oldenburg. <https://doi.org/10.1515/9783110659948-011>.
- Beißel, S. (2020). 18 Semantic Web. In G. Görz, U. Schmid, & T. Braun (Hrsg.), *Handbuch der Künstlichen Intelligenz* (S. 783–816). De Gruyter. Oldenburg. <https://doi.org/10.1515/9783110659948-018>.
- Bergmann, R. (2002). *Experience Management* (J. Van Leeuwen, J. Hartmanis, & G. Goos, Hrsg.; Bd. 2432). Springer. Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/3-540-45759-3>.



- Bergmann, R., Minor, M., Bach, K., Althoff, K.-D., & Munoz-Avila, H. (2020). 9 Fallbasiertes Schließen. In *Handbuch der Künstlichen Intelligenz* (S. 343–394). De Gruyter. Oldenburg. <https://doi.org/10.1515/9783110659948-009>.
- Bergmann, R., & Schaaf, M. (2003). Structural Case-Based Reasoning and Ontology-Based Knowledge Management: A Perfect Match? *JUCS - Journal of Universal Computer Science*, 9(7), S. 608–626. <https://doi.org/https://doi.org/10.3217/jucs-009-07-0608>.
- Beyer, U., Porstmann, S., Baum, C., & Müller, C. (2022). Produktion der PEM-Systeme, Hochskalierung, Rollout-Konzept. In R. Neugebauer (Hrsg.), *Wasserstofftechnologien* (S. 297–330). Springer. Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-64939-8\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-662-64939-8_11).
- Bharti, P., Yang, Q. P., Forbes, A., Romanchikova, M., & Hippolyte, J. L. (2021). Ontology development for measurement process and uncertainty of results. *Measurement: Sensors*, 18, S. 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2021.100325>.
- Blomqvist, E., & Öhgren, A. (2008). Constructing an enterprise ontology for an automotive supplier. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 21(3), S. 386–397. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2007.09.004>.
- Bordes, A., Usunier, N., Garcia-Durán, A., Weston, J., & Yakhnenko, O. (2013). Translating Embeddings for Modeling Multi-relational Data. *NIPS'13: Proceedings of the 26th International Conference on Neural Information Processing Systems*, S. 2787–2795.
- Borgo, S., & Leitão, P. (2007). Foundations for a Core Ontology of Manufacturing. In R. Sharda & S. Voß (Hrsg.), *Integrated Series in Information Systems* (S. 751–775). Springer. Boston. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-37022-4\\_27](https://doi.org/10.1007/978-0-387-37022-4_27).
- Brinkmann, B. (2012). *Internationales Wörterbuch der Metrologie - Grundlegende und allgemeine Begriffe und zugeordnete Benennungen (VIM)* (4. Aufl.). DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Berlin, Wien, Zürich.
- Bürger, S., Horch, F., Geiling, J., Öchsner, R., Kolb, G., Groos, U., Semmel, M., Schaadt, A., & Köhler, J. (2022). Einsatz von Wasserstofftechnologien in Mobilität und Transport. In R. Neugebauer (Hrsg.), *Wasserstofftechnologien* (S. 123–153). Springer. Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-64939-8\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-662-64939-8_6).

- Cao, Q., Zanni-Merk, C., & Reich, C. (2019). Ontologies for manufacturing process modeling: A survey. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 130, S. 61–70. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-04290-5\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-04290-5_7).
- Chakraborty, S., & Boral, S. (2017). A developed case-based reasoning system for machine tool selection. *Benchmarking*, 24(5), S. 1364–1385. <https://doi.org/10.1108/BIJ-07-2016-0103>.
- Chen, Z., Wang, Y., Zhao, B., Cheng, J., Zhao, X., & Duan, Z. (2020). Knowledge graph completion: A review. In *IEEE Access* (Bd. 8, S. 192435–192456). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3030076>.
- Dettmers, T., Minervini, P., Stenetorp, P., & Riedel, S. (2018). Convolutional 2D Knowledge Graph Embeddings. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 32(1). <https://doi.org/10.1609/aaai.v32i1.11573>.
- DIN 1319-1:1995-01. (1995). *Grundlagen der Messtechnik. Teil 1: Grundbegriffe* (DIN e.V., Hrsg.). Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN 1319-2:2005-10. (2005). *Grundlagen der Messtechnik. Teil 2: Begriffe für Messmittel* (DIN e.V., Hrsg.). Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN EN 17119:2018-10. (2018). *Zerstörungsfreie Prüfung - Thermografische Prüfung - Aktive Thermografie* (DIN e.V., Hrsg.). Beuth-Verlag, Berlin.
- Färber, M., & Rettinger, A. (2018). *Which Knowledge Graph Is Best for Me?* <https://doi.org/https://doi.org/10.48550/arXiv.1809.11099>.
- Feng, S. C., Kramer, T. R., Horst, J. A., Hedberg, T. D., & Barnard Feeney, A. (2017, August 6). Developing an Activity Model for Selecting Dimensional-Metrology Systems in Inspection Planning. *Volume 1: 37th Computers and Information in Engineering Conference*. <https://doi.org/10.1115/DETC2017-68013>.
- Fleischer, J., Klee, B., Spohrer, A., & Merz, S. (2018). *Leitfaden Sensorik für Industrie 4.0 - Wege zu kostengünstigen Sensorsystemen* (H. Rauen & J. Binzer, Hrsg.). VDMA, Karlsruhe. <https://doi.org/https://doi.org/10.48550/arXiv.1809.11099>.
- Frölich, K. (2015). *Der Decal-Prozess zur Herstellung katalysatorbeschichteter Membranen für PEM-Brennstoffzellen* [Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)]. <https://doi.org/10.5445/KSP/1000045306>.

- Gayo, J. E. L., Prud'hommeaux, E., Boneva, I., & Kontokostas, D. (2018). Validating RDF Data. In *Synthesis Lectures on the Semantic Web: Theory and Technology* (Bd. 7, Nummer 1). Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-79478-0>.
- Gómez-Pérez, A. (2004). Ontology Evaluation. In *Handbook on Ontologies* (S. 251–273). Springer. Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-24750-0\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-540-24750-0_13).
- Groos, U., Cremers, C., Nousch, L., & Baumgärtner, C. (2022). Brennstoffzellen-Technologien. In R. Neugebauer (Hrsg.), *Wasserstofftechnologien* (S. 259–296). Springer. Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-64939-8\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-662-64939-8_10).
- Gruber, T. R. (1993). A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge Acquisition*, 5(2), S. 199–220. <https://doi.org/10.1006/knac.1993.1008>.
- Grüninger, M., & Fox, M. S. (1995). Methodology for the Design and Evaluation of Ontologies. In *IJCAI'95, Workshop on Basic Ontological Issues in Knowledge Sharing*.
- Guarino, N., Oberle, D., & Staab, S. (2009). What Is an Ontology? In S. Staab & R. Studer (Hrsg.), *Handbook on Ontologies*. Springer. Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-92673-3>.
- Haller, A., Janowicz, K., Cox, S., Le Phuoc, D., Taylor, K., & Lefrançois, M. (2019, Oktober 19). *Semantic Sensor Network Ontology*. W3C Recommendation. <https://www.w3.org/TR/vocab-ssn/#intro>
- Hanani, U., Shapira, B., & Shoval, P. (2001). Information Filtering: Overview of Issues, Research and Systems. *User Modeling and User-Adapted Interaction*, 11(3), S. 203–259. <https://doi.org/10.1023/A:1011196000674>.
- Henderson-Sellers, B. (2011). Bridging metamodels and ontologies in software engineering. *Journal of Systems and Software*, 84(2), S. 301–313. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2010.10.025>.
- Hippolyte, J. L., Chrubasik, M., Brochu, F., & Bevilacqua, M. (2021). A domain-agnostic ontology for unified metrology data management. *Measurement: Sensors*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2021.100263>.
- Hoffmann, M. W., Drath, R., & Ganz, C. (2021). Proposal for requirements on industrial AI solutions. In J. Beyerer, C. Kühnert, & O. Niggemann (Hrsg.), *Machine Learning*

- for *Cyber Physical Systems* (S. 63–72). Springer Vieweg. Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-62746-4\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-662-62746-4_7).
- Hogan, A., Blomqvist, E., Cochez, M., D'amato, C., Melo, G. De, Gutierrez, C., Kirrane, S., Gayo, J. E. L., Navigli, R., Neumaier, S., Ngomo, A.-C. N., Polleres, A., Rashid, S. M., Rula, A., Schmelzeisen, L., Sequeda, J., Staab, S., & Zimmermann, A. (2022). Knowledge Graphs. *ACM Computing Surveys*, 54(4), S. 1–37. <https://doi.org/10.1145/3447772>.
- Hongliang, L., & Zhenhai, Z. (2020). Ontology modeling and case database construction of subway emergency plan knowledge. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 587(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/587/1/012076>.
- Huber, J. (2017). *Verfahren zur Klassifikation von Ungängen bei der optischen Prüfung von Batterieseparatoren* [Dissertation]. Technische Universität München.
- JCGM. (2008). *JCGM 100:2008: Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement*.
- Kampker, A., Ayvaz, P., Christoph, S., Philipp, R., & Gerd, K. (2020). *Produktion von Brennstoffzellensystemen* (VDMA, Hrsg.).
- Kampker, A., Ayvaz, P., Schön, C., Reims, P., & Krieger, G. (2020). *Produktion von Brennstoffzellenkomponenten* (VDMA, Hrsg.).
- Kantorovitch, J. (2014). Future Smart Products Systems Engineering. In M. Khosrow-Pour (Hrsg.), *Encyclopedia of Information Science and Technology* (Bd. 10, S. 3806–3817). D.B.A. <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-5888-2.ch375>.
- Katić, D., Maleshkova, M., Engelhardt, S., Wolf, I., März, K., Maier-Hein, L., Nolden, M., Wagner, M., Kenngott, H., Müller-Stich, B. P., Dillmann, R., & Speidel, S. (2017). *What does it all mean? Capturing Semantics of Surgical Data and Algorithms with Ontologies*. <http://arxiv.org/abs/1705.07747>
- Katić, D., Schuck, J., Wekerle, A. L., Kenngott, H., Müller-Stich, B. P., Dillmann, R., & Speidel, S. (2016). Bridging the gap between formal and experience-based knowledge for context-aware laparoscopy. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 11(6), S. 881–888. <https://doi.org/10.1007/s11548-016-1379-2>.

- Keferstein, C. P., Marxer, M., & Bach, C. (2018). *Fertigungsmesstechnik*. Springer Fachmedien. Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-17756-0>.
- Kejriwal, M. (2019). *Domain-Specific Knowledge Graph Construction*. Springer International Publishing. Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-12375-8>.
- Kincaid, R., & Pollock, G. (2017). Nicky: Toward a Virtual Assistant for Test and Measurement Instrument Recommendations. *Proceedings - IEEE 11th International Conference on Semantic Computing, ICSC 2017*, S. 196–203. <https://doi.org/10.1109/ICSC.2017.11>.
- Koschnik, W. J. (1993). *Standardwörterbuch für die Sozialwissenschaften* (1. Aufl., Bd. 2). K.G. Saur. München.
- Kreitmeier, S., Wokaun, A., & Büchi, F. N. (2013). Polymer Electrolyte Membrane Durability -Local Degradation at Pinholes. *ECS Transactions*, 50(2), S. 927–933. <https://doi.org/10.1149/05002.0927ecst>.
- Kreitz, C., & Frank, M. (2020). Automatische Inferenz. In G. Görz, U. Schmid, & T. Braun (Hrsg.), *Handbuch der Künstlichen Intelligenz* (6. Aufl., S. 143–188). De Gruyter. Oldenburg. <https://doi.org/10.1515/9783110659948-005>.
- Lanza, G., Haefner, B., Schild, L., Berger, D., Eschner, N., Wagner, R., & Zaiß, M. (2019). In-Line Measurement Technology and Quality Control. In W. Gao (Hrsg.), *Metrology* (Bd. 52, S. 399–433). Springer. Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-4938-5\\_14](https://doi.org/10.1007/978-981-10-4938-5_14).
- Lehmann, J., Isele, R., Jakob, M., Jentzsch, A., Kontokostas, D., Mendes, P. N., Hellmann, S., Morsey, M., van Kleef, P., Auer, S., & Bizer, C. (2015). DBpedia – A large-scale, multilingual knowledge base extracted from Wikipedia. *Semantic Web*, 6(2), S. 167–195. <https://doi.org/10.3233/SW-140134>.
- Lemaignan, S., Siadat, A., Dantan, J. Y., & Semenenko, A. (2006). MASON: A proposal for an ontology of manufacturing domain. *Proceedings - DIS 2006: IEEE Workshop on Distributed Intelligent Systems - Collective Intelligence and Its Applications, 2006*, S. 195–200. <https://doi.org/10.1109/DIS.2006.48>.
- Li, X., Martinez, J. F., & Rubio, G. (2016). A New Fuzzy Ontology Development Methodology (FODM) Proposal. *IEEE Access*, 4, S. 7111–7124. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2621756>.

- Lin, H. K., & Harding, J. A. (2007). A manufacturing system engineering ontology model on the semantic web for inter-enterprise collaboration. *Computers in Industry*, 58(5), S. 428–437. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2006.09.015>.
- Linß, G. (2021). Prüfplanung. In *Masing Handbuch Qualitätsmanagement* (S. 651–675). Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. München. <https://doi.org/10.3139/9783446466210.028>.
- Mabkhot, M. M., Al-Samhan, A. M., & Hidri, L. (2019). An Ontology-Enabled Case-Based Reasoning Decision Support System for Manufacturing Process Selection. *Advances in Materials Science and Engineering*, S. 1–18. <https://doi.org/10.1155/2019/2505183>.
- Maksimov, N., Gavrilkina, A., Kuzmina, V., & Borodina, E. (2020). Ontology of Properties and its Methods of Use: Properties and Unit extraction from texts. *Procedia Computer Science*, 169, S. 70–75. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.02.116>.
- Maropoulos, P. G., Guo, Y., Jamshidi, J., & Cai, B. (2008). Large volume metrology process models: A framework for integrating measurement with assembly planning. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57(1), S. 477–480. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.017>.
- Middleton, S. E., De Roure, D., & Shadbolt, N. R. (2009). Ontology-Based Recommender Systems. In S. Staab & R. Studer (Hrsg.), *Handbook on Ontologies*. Springer. Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-92673-3>.
- Mitchell, T., Cohen, W., Hruschka, E., Talukdar, P., Yang, B., Betteridge, J., Carlson, A., Dalvi, B., Gardner, M., Kisiel, B., Krishnamurthy, J., Lao, N., Mazaitis, K., Mohamed, T., Nakashole, N., Platanios, E., Ritter, A., Samadi, M., Settles, B., Wang, R., Wijaya, D., Gupta, A., Chen, X., Saproov, A., Greaves, M., & Welling, J. (2018). Never-ending learning. *Communications of the ACM*, 61(5), S. 103–115. <https://doi.org/10.1145/3191513>.
- Muelaner, J. E., Cai, B., & Maropoulos, P. G. (2010). Large-volume metrology instrument selection and measurability analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 224(6), S. 853–868. <https://doi.org/10.1243/09544054JEM1676>.
- Nayyeri, M., Lehmann, J., Xu, C., Yaghoobzadeh, Y., & Yazdi, H. S. (2019). Toward Understanding The Effect Of Loss function On Then Performance Of Knowledge

- Graph Embedding. *Artificial Intelligence*.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.48550/arXiv.1909.00519>.
- Nebel, B., & Wöfl, S. (2020). Wissensrepräsentation und -verarbeitung. In G. Görz, U. Schmid, & T. Braun (Hrsg.), *Handbuch der Künstlichen Intelligenz* (6. Aufl., S. 27–56). De Gruyter. Oldenburg. <https://doi.org/10.1515/9783110659948-002>.
- Noy, N. F., & McGuinness, D. L. (2000). *Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology*. [www.unspsc.org](http://www.unspsc.org)
- Pan, J. Z. (2009). Resource Description Framework. In *Handbook on Ontologies* (S. 71–90). Springer. Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-92673-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-540-92673-3_3).
- Panetto, H., Dassisti, M., & Tursi, A. (2012). ONTO-PDM: Product-driven ONTOlogy for Product Data Management interoperability within manufacturing process environment. *Advanced Engineering Informatics*, 26(2), S. 334–348. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2011.12.002>.
- Parreiras, F. S., Staab, S., & Winter, A. (2007). On marrying ontological and metamodelling technical spaces. *The 6th Joint Meeting on European software engineering conference and the ACM SIGSOFT symposium on the foundations of software engineering: companion papers*, S. 439–448. <https://doi.org/10.1145/1295014.1295017>.
- Paulk, M. C., Curtis, B., Chrissis, M. B., & Weber, C. V. (1993). Capability maturity model, version 1.1. *IEEE Software*, 10(4), S. 18–27. <https://doi.org/10.1109/52.219617>.
- Peroni, S. (2017). A Simplified Agile Methodology for Ontology Development. In M. Dragoni, M. Poveda-Villalón, & E. Jimenez-Ruiz (Hrsg.), *13th International Workshop, OWLED 2016* (S. 55–69). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-54627-8\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-54627-8_5).
- Peter, M., Blanc, F. S.-L., & Fleischer, J. (2013). Trends im Elektromaschinenbau. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 108(6), S. 435–439. <https://doi.org/10.3139/104.110960>.
- Pfeifer, T., & Schmitt, R. (2010). *Fertigungsmesstechnik*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag. <https://doi.org/10.1524/9783486711356>.

- Pfrommer, J., Klein, J.-F., Wurster, M., Rapp, S., Graubeger, P., Lanza, G., Albers, A., Matthiesen, S., & Beyerer, J. (2022). An ontology for remanufacturing systems. *at - Automatisierungstechnik*, 70(6), S. 534–541. <https://doi.org/10.1515/auto-2021-0156>.
- Rebele, T., Suchanek, F., Hoffart, J., Biega, J., Kuzey, E., & Weikum, G. (2016). YAGO: A Multilingual Knowledge Base from Wikipedia, Wordnet, and Geonames (S. 177–185). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-46547-0\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-319-46547-0_19).
- Richter, M. M., & Weber, R. O. (2013). *Case-Based Reasoning*. Springer. Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-40167-1>.
- Rijgersberg, H., Willems, D., Ren, X.-Y., Wigham, M., & Top, J. (2023). *OM - Ontology of units of Measure*. <https://github.com/HajoRijgersberg/OM#readme>
- Scherp, A., & Gröner, G. (2020). Semantic Web. In G. Görz, U. Schmid, & T. Braun (Hrsg.), *Handbuch der Künstlichen Intelligenz* (6. Aufl., S. 783–816). De Gruyter. Oldenburg. <https://doi.org/10.1515/9783110659948-018>.
- Schlenoff, C., Gruninger, M., Tissot, F., Valois, J., & Lee, J. (2000). *The Process Specification Language (PSL) overview and version 1.0 specification*. <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.6459>.
- Schmidt, R., Montani, S., Bellazzi, R., Portinale, L., & Gierl, L. (2001). Cased-Based Reasoning for medical knowledge-based systems. *International Journal of Medical Informatics*, 64(2–3), S. 355–367. [https://doi.org/10.1016/S1386-5056\(01\)00221-0](https://doi.org/10.1016/S1386-5056(01)00221-0).
- Sommerhoff, B. (2021). Die Entwicklung des Qualitätsmanagements im 20. und 21. Jahrhundert. In *Masing Handbuch Qualitätsmanagement* (S. 15–37). Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. München. <https://doi.org/10.3139/9783446466210.002>.
- Staab, S., Studer, R., Schnurr, H. P., & Sure, Y. (2001). Knowledge processes and ontologies. *IEEE Intelligent Systems and Their Applications*, 16(1), S. 26–34. <https://doi.org/10.1109/5254.912382>.
- Staud, J. L. (2019). *Unternehmensmodellierung*. Springer. Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-59376-9>.
- Stepanov, M. S., Koshliakova, I. G., Sorochkina, O. Y., & Kirimova, K. V. (2020). Database management systems application for the organization's metrological support.



- Journal of Physics: Conference Series*, 1679(5). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/5/052056>.
- Studer, R., Benjamins, V. R., & Fensel, D. (1998). Knowledge engineering: Principles and methods. *Data & Knowledge Engineering*, 25(1–2), S. 161–197. [https://doi.org/10.1016/S0169-023X\(97\)00056-6](https://doi.org/10.1016/S0169-023X(97)00056-6).
- Tang, X., & Chen, Z. (2015). A Multi-dimensional Model for Computer-Aided Measuring Planning (CAMP) in Digital Manufacturing. In A. Fred, J. L. G. Dietz, K. Liu, & J. Filipe (Hrsg.), *Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management* (S. 56–65). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-46549-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-662-46549-3_4).
- Töpler, J., & Lehmann, J. (Hrsg.). (2017). *Wasserstoff und Brennstoffzelle*. Springer. Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53360-4>.
- Toteva, P., Vasileva, D., & Mihaylova, N. (2014). Methods for selection of measuring instruments. *Applied Mechanics and Materials*, 657, S. 1006–1010. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.657.1006>.
- Ulsh, M., DeBari, A., Berliner, J. M., Zenyuk, I. V., Rupnowski, P., Matvichuk, L., Weber, A. Z., & Bender, G. (2019). The development of a through-plane reactive excitation technique for detection of pinholes in membrane-containing MEA sub-assemblies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(16), S. 8533–8547. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.181>.
- Uschold, M., & King, M. (1995, August 19). Towards a Methodology for Building Ontologies. *Workshop on Basic Ontological Issues in Knowledge Sharing*.
- Usman, Z., Young, R. I. M., Chungoora, N., Palmer, C., Case, K., & Harding, J. (2011). A Manufacturing Core Concepts Ontology for Product Lifecycle Interoperability. In M. Sinderen & P. Johnson (Hrsg.), *International IFIP Working Conference on Enterprise Interoperability* (S. 5–18). Springer.
- Usman, Z., Young, R. I. M., Chungoora, N., Palmer, C., Case, K., & Harding, J. A. (2013). Towards a formal manufacturing reference ontology. *International Journal of Production Research*, 51(22), S. 6553–6572. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.801570>.
- Vacek, S., Gindele, T., Zollner, J. M., & Dillmann, R. (2007a). Situation classification for cognitive automobiles using case-based reasoning. *2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, S. 704–709. <https://doi.org/10.1109/IVS.2007.4290199>.

- Vacek, S., Gindele, T., Zollner, J. M., & Dillmann, R. (2007b). Using case-based reasoning for autonomous vehicle guidance. *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, S. 4271–4276. <https://doi.org/10.1109/IROS.2007.4399298>.
- Vegetti, M., Henning, G., Leone, H., Henning, G. P., & Leone, H. P. (2005). Product Ontology: Definition of an Ontology for the Complex Product Modeling Domain. In *4th Mercosur Congress on Process Systems Engineering*. <https://www.researchgate.net/publication/242697743>
- Virkki-Hatakka, T., Kraslawski, A., Koironen, T., & Nyström, L. (1997). Adaptation phase in case-based reasoning system for process equipment selection. *Computers & Chemical Engineering*, 21, S. S643–S648. [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(97\)87575-8](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(97)87575-8).
- Vrandečić, D. (2009). Ontology Evaluation. In *Handbook on Ontologies* (S. 293–313). Springer. Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-92673-3\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-540-92673-3_13).
- Wang, Y., Ruiz Diaz, D. F., Chen, K. S., Wang, Z., & Adroher, X. C. (2020). Materials, technological status, and fundamentals of PEM fuel cells – A review. *Materials Today*, 32(7), S. 178–203. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2019.06.005>.
- Watson, I., & Marir, F. (1994). Case-Based Reasoning: A Review. *The Knowledge Engineering Review*, 9(4), S. 327–354. <https://doi.org/10.1017/S0269888900007098>.
- Werthschützky, R. (Hrsg.). (2018). *Sensor Technologien 2022*. AMA Verband für Sensorik und Messtechnik e.V. Berlin.
- Wienk-Borgert, B. (2018). *Einfluss der klimatischen Fertigungsumgebung auf die Mechanik und Rissstrukturierung der elektrodenbeschichteten Membran einer PEM-Brennstoffzelle* [Dissertation]. Forschungszentrum Jülich.
- Yang, B., Yih, W., He, X., Gao, J., & Deng, L. (2014). *Embedding Entities and Relations for Learning and Inference in Knowledge Bases*. <http://arxiv.org/abs/1412.6575>
- Zhang, F., Yuan, N. J., Lian, D., Xie, X., & Ma, W.-Y. (2016). Collaborative Knowledge Base Embedding for Recommender Systems. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, S. 353–362. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939673>.

- Živković, S., Murzek, M., & Kühn, H. (2008). Bringing Ontology Awareness into Model Driven Engineering Platforms. In F. S. Parreiras, J. Z. Pan, U. Aßmann, & J. Henriksson (Hrsg.), *Proceedings of the 1st International Workshop on Transforming and Weaving Ontologies in Model Driven Engineering*.<http://most-project.eu>.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Aufbau der Arbeit	5
Abbildung 2-1: Schematische Darstellung der Integrationsgrade von Messsystemen (eigene Darstellung nach Lanza et al., 2019)	10
Abbildung 2-2: Problemlösungszyklus für fallbasiertes Schließen (eigene Abbildung nach Aamodt & Plaza, 1994)	15
Abbildung 2-3: Wissenscontainer als Prinzip für fallbasiertes Schließen (eigene Abbildung nach Richter & Weber, 2013)	16
Abbildung 2-4: Graphbasierte Darstellung eines exemplarischen RDF-Tripels mit a) einem Objekt mit URI und b) einem Objekt ohne URI als Literal (eigene Abbildung)	21
Abbildung 2-5: Bestandteile von OWL und Beziehung zu RDF/RDFS (eigene Abbildung nach Antoniou & Harmelen, 2009)	23
Abbildung 2-6: Beispielhaftes UML-Klassendiagramm (eigene Abbildung)	24
Abbildung 2-7: Einordnung des Ontologiebegriffs in die Metamodell-Pyramide (eigene Abbildung in Anlehnung an Aßmann et al., 2006)	27
Abbildung 2-8: Ein Tripel $(h, r, t)$ eines Wissensgraphen besteht aus zwei Knoten (Subjekt und Objekt) und einer gerichteten, beschrifteten Kante (Prädikat) (eigene Abbildung)	30
Abbildung 2-9: Beispiele eines (a) gerichteten kantenbeschrifteten Graphen, (b) heterogenen Graphen und (c) Eigenschaftsgraphen (eigene Darstellung in Anlehnung an Hogan et al., 2022)	32
Abbildung 2-10: Beispielhaftes Embedding eines Tripels $(h, r, t)$ eines Wissensgraphen (eigene Abbildung)	35
Abbildung 2-11: Exemplarische Darstellung von Embeddings für Instanzen der Klassen und Relationen. Die Knoten und Kanten aus dem vorherigen Beispiel sind blau gekennzeichnet. (eigene Abbildung)	36
Abbildung 4-1: Überblick über das Vorgehen im eigenen Ansatz	60
Abbildung 4-2: Iteratives Vorgehen zur Entwicklung von Ontologien (Eigene Abbildung nach Noy & McGuinness, 2000)	61

---

Abbildung 4-3: Grobstruktur der Ontologie auf der Ebene $M_1$ als UML-Diagramm in Anlehnung an Pfrommer et al. (2022)	67
Abbildung 4-4: Domänenontologie Messaufgabe auf der Ebene $M_1$ als UML-Klassendiagramm	71
Abbildung 4-5: Domänenontologie Messsystem auf der Ebene $M_1$ als UML-Klassendiagramm	72
Abbildung 4-6: Datensammlung mit Hilfe von Literaturrecherchen und Experten	79
Abbildung 4-7: Erstellung von Tripeln aus strukturiertem Wissen	80
Abbildung 4-8: Speicherung der Tripel in Form eines Graphen	82
Abbildung 4-9: Erstellung eines Embeddings für Instanzen der Klassen und Relationen aus dem Graphen	84
Abbildung 4-10: Vorhersage neuer Tripel mit Hilfe des Embeddings	85
Abbildung 4-11: Beispiel für die Vorhersage wahrscheinlicher Tripel	86
Abbildung 4-12: Speicherung von neuen, Ontologie-konformen Tripeln im Graphen	88
Abbildung 4-13: Problemlösungszyklus für fallbasiertes Schließen neuer Messsysteme aus bekannten Messaufgaben (in Anlehnung an Abbildung 2-2)	89
Abbildung 5-1: Auszug aus der Tabelle für Messsysteme (Tabelle in der Mitte geteilt und in zwei Zeilen dargestellt)	94
Abbildung 5-2: Screenshot der Benutzeroberfläche von OntoRefine zur Erstellung von RDF-Tripeln aus strukturierten Daten	99
Abbildung 5-3: Screenshot der Benutzeroberfläche von GraphDB zur Speicherung der RDF-Tripel	100
Abbildung 5-4: Vergleich der Modelle mit Hits@N	101
Abbildung 5-5: Vergleich der Modelle mit Median Rank (Darstellung in 10er Logarithmus)	102
Abbildung 5-6: Vergleich der Trainingszeiten der Modelle in Minuten	103
Abbildung 5-7: Vergleich der Verbesserung der Modellperformance (Hits@N) durch Hyperparameteroptimierung	104

---

Abbildung 5-8: Modellperformance der besten drei Modelle mit Hits@N	105
Abbildung 5-9: Schematische Darstellung der Berechnung der 50% besten Tripel106	
Abbildung 5-10: Exemplarische Systemarchitektur für das Vorhaben	112
Abbildung 5-11: Screenshot der Benutzeroberfläche (Frontend) des Entscheidungsunterstützungssystems in Streamlit	113
Abbildung 5-12: Aufbau eines Brennstoffzellenstacks (eigene Abbildung)	115
Abbildung 5-13: Schematische Darstellung der Brennstoffzellenproduktion (eigene Abbildung)	116
Abbildung 5-14: Kostenstruktur einer PEM-Brennstoffzelle nach Komponenten in Prozent, Annahme 100.000 Stacks p.a. (eigene Abbildung nach Wang et al., 2020)	118
Abbildung 5-15: REM-Aufnahme eines Pinholes (a, eigene Abbildung) und Entwicklung eines Pinholes im Betrieb (b, Kreitmeier et al., 2013)	119
Abbildung 5-16: Ergebnis der Anfrage für Messaufgabe 1	121
Abbildung 5-17: Aufnahmen mit Computertomographie des mit einem CW-Lasers erzeugten Pinholes	123
Abbildung 5-18: Aufnahmen mit Computertomographie des mit einer Mikronadel erzeugten Pinholes	124
Abbildung 5-19: Versuchsaufbau zur Locheinbringung (a) und Versuchsaufbau zur Membranaufspannung (b) (eigene Abbildungen)	125
Abbildung 5-20: REM-Aufnahmen der erstellten Pinholes in der CCM mit Nadeldurchmesser 0,5 mm (a) und 0,25 mm (b) (eigene Abbildungen)	126
Abbildung 5-21: Verlauf der Oberflächentemperaturen der Membran nach thermischer Anregung mit verschiedenen Quellen, Temperaturdifferenz in °C von 25°C Ausgangstemperatur (eigene Abbildung nach A_Maelger, 2021)	128
Abbildung 5-22: Momentaufnahmen der Messungen an der CCM mit der IR-Kamera (a: unbearbeitet, b: mit Bildverarbeitungsoperatoren, eigene Abbildungen)	129
Abbildung 5-23: Ergebnis der Anfrage für Messaufgabe 2	133
Abbildung 5-24: Gravimetrische Referenzmessung des Trocknungsverhaltens einer PEM	135

- Abbildung 5-25: Versuchsaufbau zur Messung der Membranfeuchtigkeit mit einer THz-Kamera (eigene Abbildung) 135
- Abbildung 5-26: a) Unbearbeitete Aufnahme des bildgebenden THz-Verfahrens b) Differenz des jeweils aktuellen Bilds zu Minute 0 (links: Minute 1, rechts: Minute 30) 137
- Abbildung 5-27: Ergebnis der THz-Messung als Grauwertdifferenz [o.E.] über dem Gewicht der Membran [in Gramm] (eigene Abbildung) 138

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Fragen beim Einsatz von Fertigungsmesstechnik (Sommerhoff, 2021)	1
Tabelle 2-1: Vergleich der Arten von Entscheidungsunterstützungssystemen (Aggarwal, 2016)	12
Tabelle 2-2: Kategorien von Embeddings von Wissensgraphen mit Beispielmodellen (Chen et al., 2020; Hogan et al., 2022)	36
Tabelle 2-3: Eigenschaften von Embeddings nach Chen et al. (2020)	37
Tabelle 3-1: Zusammenfassung des Stands der Forschung anhand der Bewertung der Anforderungen	57
Tabelle 4-1: Zusammenfassung der Begriffe für die Konzepte <i>Messsysteme</i> und <i>Messaufgaben</i> der Ontologie	65
Tabelle 4-2: Beispiel 1 für die Einordnung der Begriffe in das PPR-Modell nach Pfrommer et al. (2022)	67
Tabelle 4-3: Beispiel 2 für die Einordnung der Begriffe in das PPR-Modell nach Pfrommer et al. (2022)	68
Tabelle 4-4: Instanzen zur Klasse Messprinzip (fett gedruckt) und zugehörige Instanzen der Klasse Messverfahren auf der Ebene $M_0$ (in Anlehnung an Kölmel, 2016)	74
Tabelle 4-5: Instanzen zu den Klassen Freiheitsgrade, Technologiereifegrade, Integrationsgrade, SI-Einheiten und Aggregatzustände auf der Ebene $M_0$	76
Tabelle 4-6: Ausgewählte Modelle für die Erstellung eines Embeddings	83
Tabelle 4-7: Parameter für die Hyperparameteroptimierung (Gittersuche)	84
Tabelle 5-1: Messsysteme mit Messverfahren in Klammern (Ebene $M_0$ )	94
Tabelle 5-2: Messaufgaben mit Messverfahren in Klammern (Ebene $M_0$ )	95
Tabelle 5-3: Liste der Tripel, die eine SHACL-Bedingung verletzt haben	107
Tabelle 5-4: Ergebnis nach der Generierung der Analogieschlüsse (Beste 40 Tripel auf Basis des Scores)	108
Tabelle 5-5: Liste der Tripel, die durch die Validierung des Experten ausgeschlossen wurden (38 Tripel)	109



Tabelle 5-6: Anregungsquellen für aktive Thermografie nach DIN EN 17119:2018-10 (2018)	127
--	-----

## Quelltextverzeichnis

Quelltext 2-1: Beispielhafte Modellierung einer exemplarischen Ontologie mit RDFS	21
Quelltext 2-2: Instanz <i>Person</i> in RDF (in Anlehnung an Gayo et al., 2018)	41
Quelltext 2-3: SHACL NodeShape für <i>Person</i> (in Anlehnung an Gayo et al., 2018)	41
Quelltext 2-4: SHACL PropertyShape für <i>Age</i> (in Anlehnung an Gayo et al., 2018)	41
Quelltext 4-1: Beispielhafte Tripel für das Messgerät „Metrotom 800“ von der Firma Zeiss (keine vollständige Beschreibung des Messgeräts)	80
Quelltext 4-2: Tripel für die Klasse Messverfahren der Ontologie Messsysteme	81
Quelltext 4-3: Tripel für die Instanzen Autofokus und In-Line der Klassen Messverfahren und Integrationsgrad	81
Quelltext 4-4: Grundaufbau des SPARQL-Queries für die Suche auf dem Wissensgraphen	90
Quelltext 5-1: SPARQL-Query für die erste Messaufgabe in der Brennstoffzellenfertigung	120
Quelltext 5-2: SPARQL-Query für die zweite Messaufgabe in der Brennstoffzellenfertigung	132
Quelltext 5-3: SPARQL-Query für eine alternative Anfrage der zweiten Messaufgabe	139



Forschungsberichte aus dem **wbk**  
Institut für Produktionstechnik  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Bisher erschienene Bände:

---

Band 0

Dr.-Ing. Wu Hong-qj

**Adaptive Volumenstromregelung mit Hilfe von drehzahlgeregelten Elektroantrieben**

Band 1

Dr.-Ing. Heinrich Weiß

**Fräsen mit Schneidkeramik - Verhalten des System  
Werkzeugmaschine-Werkzeug-Werkstück und Prozessanalyse**

Band 2

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Stierle

**Entwicklung und Untersuchung hydrostatischer Lager für die  
Axialkolbenmaschine**

Band 3

Dr.-Ing. Herbert Hörner

**Untersuchung des Geräuschverhaltens druck geregelter Axialkolbenpumpen**

Band 4

Dr.-Ing. Rolf-Dieter Brückbauer

**Digitale Drehzahlregelung unter der besonderen Berücksichtigung  
von Quantisierungseffekten**

Band 5

Dr.-Ing. Gerhard Staiger

**Graphisch interaktive NC-Programmierung von Drehteilen im Werkstattbereich**

Band 6

Dr.-Ing. Karl Peters

**Ein Beitrag zur Berechnung und Kompensation von Positionierfehlern an  
Industrierobotern**

Band 7

Dr.-Ing. Paul Stauss

**Automatisierte Inbetriebnahme und Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit numerisch gesteuerter Fertigungseinrichtungen**

Band 8

Dr.-Ing. Günter Möckesch

**Konzeption und Realisierung eines strategischen, integrierten Gesamtplanungs- und -bearbeitungssystems zur Optimierung der Drehteilorganisation für auftragsbezogene Drehereien**

Band 9

Dr.-Ing. Thomas Oestreicher

**Rechnergestützte Projektierung von Steuerungen**

Band 10

Dr.-Ing. Thomas Selinger

**Teilautomatisierte werkstattnahe NC-Programmerstellung im Umfeld einer integrierten Informationsverarbeitung**

Band 11

Dr.-Ing. Thomas Buchholz

**Prozessmodell Fräsen, Rechnerunterstützte Analyse, Optimierung und Überwachung**

Band 12

Dr.-Ing. Bernhard Reichling

**Lasergestützte Positions- und Bahnvermessung von Industrierobotern**

Band 13

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lesser

**Rechnergestützte Methoden zur Auswahl anforderungsgerechter Verbindungselemente**

Band 14

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lauffer

**Einsatz von Prozessmodellen zur rechnerunterstützten Auslegung von Räumwerkzeugen**

Band 15

Dr.-Ing. Michael C. Wilhelm

**Rechnergestützte Prüfplanung im Informationsverbund moderner Produktionssysteme**

Band 16

Dr.-Ing. Martin Ochs

**Entwurf eines Programmsystems zur wissensbasierten Planung und Konfigurierung**

Band 17

Dr.-Ing. Heinz-Joachim Schneider

**Erhöhung der Verfügbarkeit von hochautomatisierten Produktionseinrichtungen mit Hilfe der Fertigungsleittechnik**

Band 18

Dr.-Ing. Hans-Reiner Ludwig

**Beanspruchungsanalyse der Werkzeugschneiden beim Stirnplanfräsen**

Band 19

Dr.-Ing. Rudolf Wieser

**Methoden zur rechnergestützten Konfigurierung von Fertigungsanlagen**

Band 20

Dr.-Ing. Edgar Schmitt

**Werkstattsteuerung bei wechselnder Auftragsstruktur**

Band 21

Dr.-Ing. Wilhelm Enderle

**Verfügbarkeitssteigerung automatisierter Montagesysteme durch selbsttätige Behebung prozessbedingter Störungen**

Band 22

Dr.-Ing. Dieter Buchberger

**Rechnergestützte Strukturplanung von Produktionssystemen**

Band 23

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

**Rechnerunterstützte Technologieplanung für die flexibel automatisierte Fertigung von Abkantteilen**

Band 24

Dr.-Ing. Lukas Loeffler

**Adaptierbare und adaptive Benutzerschnittstellen**

Band 25

Dr.-Ing. Thomas Friedmann

**Integration von Produktentwicklung und Montageplanung durch neue rechnergestützte Verfahren**

Band 26

Dr.-Ing. Robert Zurrin

**Variables Formhonen durch rechnergestützte Hornprozesssteuerung**

Band 27

Dr.-Ing. Karl-Heinz Bergen

**Langhub-Innenrundhonen von Grauguss und Stahl mit einem elektromechanischem Vorschubsystem**

Band 28

Dr.-Ing. Andreas Liebisch

**Einflüsse des Festwalzens auf die Eigenspannungsverteilung und die Dauerfestigkeit einsatzgehärteter Zahnräder**

Band 29

Dr.-Ing. Rolf Ziegler

**Auslegung und Optimierung schneller Servopumpen**

Band 30

Dr.-Ing. Rainer Bartl

**Datenmodellgestützte Wissensverarbeitung zur Diagnose und Informationsunterstützung in technischen Systemen**

Band 31

Dr.-Ing. Ulrich Golz

**Analyse, Modellbildung und Optimierung des Betriebsverhaltens von Kugelgewindetrieben**

Band 32

Dr.-Ing. Stephan Timmermann

**Automatisierung der Feinbearbeitung in der Fertigung von Hohlformwerkzeugen**

Band 33

Dr.-Ing. Thomas Noe

**Rechnergestützter Wissenserwerb zur Erstellung von Überwachungs- und Diagnoseexpertensystemen für hydraulische Anlagen**

Band 34

Dr.-Ing. Ralf Lenschow

**Rechnerintegrierte Erstellung und Verifikation von Steuerungsprogrammen als Komponente einer durchgängigen Planungsmethodik**

Band 35

Dr.-Ing. Matthias Kallabis

**Räumen gehärteter Werkstoffe mit kristallinen Hartstoffen**

Band 36

Dr.-Ing. Heiner-Michael Honeck

**Rückführung von Fertigungsdaten zur Unterstützung einer fertigungsgerechten Konstruktion**

Band 37

Dr.-Ing. Manfred Rohr

**Automatisierte Technologieplanung am Beispiel der Komplettbearbeitung auf Dreh-/Fräszellen**

Band 38

Dr.-Ing. Martin Steuer

**Entwicklung von Softwarewerkzeugen zur wissensbasierten Inbetriebnahme von komplexen Serienmaschinen**

Band 39

Dr.-Ing. Siegfried Beichter

**Rechnergestützte technische Problemlösung bei der Angebotserstellung von flexiblen Drehzellen**

Band 40

Dr.-Ing. Thomas Steitz

**Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Werkzeugmaschinen mit Integration von funktionsbasierter Strukturierung und Kostenschätzung**

Band 41

Dr.-Ing. Michael Richter

**Wissensbasierte Projektierung elektrohydraulischer Regelungen**



Band 42

Dr.-Ing. Roman Kuhn

**Technologieplanungssystem Fräsen. Wissensbasierte Auswahl von Werkzeugen, Schneidkörpern und Schnittbedingungen für das Fertigungsverfahren Fräsen**

Band 43

Dr.-Ing. Hubert Klein

**Rechnerunterstützte Qualitätssicherung bei der Produktion von Bauteilen mit frei geformten Oberflächen**

Band 44

Dr.-Ing. Christian Hoffmann

**Konzeption und Realisierung eines fertigungsintegrierten Koordinatenmessgerätes**

Band 45

Dr.-Ing. Volker Frey

**Planung der Leittechnik für flexible Fertigungsanlagen**

Band 46

Dr.-Ing. Achim Feller

**Kalkulation in der Angebotsphase mit dem selbsttätig abgeleiteten Erfahrungswissen der Arbeitsplanung**

Band 47

Dr.-Ing. Markus Klaiber

**Produktivitätssteigerung durch rechnerunterstütztes Einfahren von NC-Programmen**

Band 48

Dr.-Ing. Roland Minges

**Verbesserung der Genauigkeit beim fünffachen Fräsen von Freiformflächen**

Band 49

Dr.-Ing. Wolfgang Bernhart

**Beitrag zur Bewertung von Montagevarianten: Rechnergestützte Hilfsmittel zur kostenorientierten, parallelen Entwicklung von Produkt und Montage system**

Band 50

Dr.-Ing. Peter Ganghoff

**Wissensbasierte Unterstützung der Planung technischer Systeme:  
Konzeption eines Planungswerkzeuges und exemplarische Anwendung  
im Bereich der Montagesystemplanung**

Band 51

Dr.-Ing. Frank Maier

**Rechnergestützte Prozessregelung beim flexiblen Gesenkbiegen durch  
Rückführung von Qualitätsinformationen**

Band 52

Dr.-Ing. Frank Debus

**Ansatz eines rechnerunterstützten Planungsmanagements für die Planung  
in verteilten Strukturen**

Band 53

Dr.-Ing. Joachim Weinbrecht

**Ein Verfahren zur zielorientierten Reaktion auf Planabweichungen in der  
Werkstattregelung**

Band 54

Dr.-Ing. Gerd Herrmann

**Reduzierung des Entwicklungsaufwandes für anwendungsspezifische  
Zellenrechnersoftware durch Rechnerunterstützung**

Band 55

Dr.-Ing. Robert Wassmer

**Verschleissentwicklung im tribologischen System Fräsen: Beiträge  
zur Methodik der Prozessmodellierung auf der Basis tribologischer  
Untersuchungen beim Fräsen**

Band 56

Dr.-Ing. Peter Uebelhoer

**Inprocess-Geometriemessung beim Honen**

Band 57

Dr.-Ing. Hans-Joachim Schelberg

**Objektorientierte Projektierung von SPS-Software**

Band 58

Dr.-Ing. Klaus Boes

**Integration der Qualitätsentwicklung in featurebasierte CAD/CAM-Prozessketten**

Band 59

Dr.-Ing. Martin Schreiber

**Wirtschaftliche Investitionsbewertung komplexer Produktionssysteme unter Berücksichtigung von Unsicherheit**

Band 60

Dr.-Ing. Ralf Steuernagel

**Offenes adaptives Engineering-Werkzeug zur automatisierten Erstellung von entscheidungsunterstützenden Informationssystemen**

Band 62

Dr.-Ing. Uwe Schauer

**Qualitätsorientierte Feinbearbeitung mit Industrierobotern: Regelungsansatz für die Freiformflächenfertigung des Werkzeug- und Formenbaus**

Band 63

Dr.-Ing. Simone Loeper

**Kennzahlengestütztes Beratungssystem zur Verbesserung der Logistikleistung in der Werkstattfertigung**

Band 64

Dr.-Ing. Achim Raab

**Räumen mit hartstoffbeschichteten HSS-Werkzeugen**

Band 65,

Dr.-Ing. Jan Erik Burghardt

**Unterstützung der NC-Verfahrenskette durch ein bearbeitungselementorientiertes, lernfähiges Technologieplanungssystem**

Band 66

Dr.-Ing. Christian Tritsch

**Flexible Demontage technischer Gebrauchsgüter: Ansatz zur Planung und (teil-)automatisierten Durchführung industrieller Demontageprozesse**

Band 67

Dr.-Ing. Oliver Eitrich

**Prozessorientiertes Kostenmodell für die entwicklungsbegleitende Vorkalkulation**

Band 68

Dr.-Ing. Oliver Wilke

**Optimierte Antriebskonzepte für Räummaschinen - Potentiale zur Leistungssteigerung**

Band 69

Dr.-Ing. Thilo Sieth

**Rechnergestützte Modellierungsmethodik zerspantechnologischer Prozesse**

Band 70

Dr.-Ing. Jan Linnenbuerger

**Entwicklung neuer Verfahren zur automatisierten Erfassung der geometrischen Abweichungen an Linearachsen und Drehschwenkköpfen**

Band 71

Dr.-Ing. Mathias Klimmek

**Fraktionierung technischer Produkte mittels eines frei beweglichen Wasserstrahlwerkzeuges**

Band 72

Dr.-Ing. Marko Hartel

**Kennzahlenbasiertes Bewertungssystem zur Beurteilung der Demontage- und Recyclingeignung von Produkten**

Band 73

Dr.-Ing. Jörg Schaupp

**Wechselwirkung zwischen der Maschinen- und Hauptspindelantriebsdynamik und dem Zerspanprozess beim Fräsen**

Band 74

Dr.-Ing. Bernhard Neisius

**Konzeption und Realisierung eines experimentellen Telemanipulators für die Laparoskopie**

Band 75

Dr.-Ing. Wolfgang Walter

**Erfolgsversprechende Muster für betriebliche Ideenfindungsprozesse. Ein Beitrag zur Steigerung der Innovationsfähigkeit**

Band 76

Dr.-Ing. Julian Weber

**Ein Ansatz zur Bewertung von Entwicklungsergebnissen in virtuellen Szenarien**

Band 77

Dr.-Ing. Dipl. Wirtsch.-Ing. Markus Posur

**Unterstützung der Auftragsdurchsetzung in der Fertigung durch Kommunikation über mobile Rechner**

Band 78

Dr.-Ing. Frank Fleissner

**Prozessorientierte Prüfplanung auf Basis von Bearbeitungsobjekten für die Kleinserienfertigung am Beispiel der Bohr- und Fräsbearbeitung**

Band 79

Dr.-Ing. Anton Haberkern

**Leistungsfähigere Kugelgewindetriebe durch Beschichtung**

Band 80

Dr.-Ing. Dominik Matt

**Objektorientierte Prozess- und Strukturinnovation (OPUS)**

Band 81

Dr.-Ing. Jürgen Andres

**Robotersysteme für den Wohnungsbau: Beitrag zur Automatisierung des Mauerwerkbaus und der Elektroinstallation auf Baustellen**

Band 82

Dr.-Ing. Dipl. Wirtschaftsing. Simone Riedmiller

**Der Prozesskalender - Eine Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Prozessen**

Band 83

Dr.-Ing. Dietmar Tilch

**Analyse der Geometrieparameter von Präzisionsgewinden auf der Basis einer Least-Squares-Estimation**

Band 84

Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Oliver Stiefbold

**Konzeption eines reaktionsschnellen Planungssystems für Logistikketten auf Basis von Software-Agenten**

Band 85

Dr.-Ing. Ulrich Walter

**Einfluss von Kühlschmierstoff auf den Zerspanprozess beim Fräsen: Beitrag zum Prozessverständnis auf Basis von zerspantechnischen Untersuchungen**

Band 86

Dr.-Ing. Bernd Werner

**Konzeption von teilautonomer Gruppenarbeit unter Berücksichtigung kultureller Einflüsse**

Band 87

Dr.-Ing. Ulf Osmers

**Projektieren Speicherprogrammierbarer Steuerungen mit Virtual Reality**

Band 88

Dr.-Ing. Oliver Doerfel

**Optimierung der Zerspantechnik beim Fertigungsverfahren Wälzstossen: Analyse des Potentials zur Trockenbearbeitung**

Band 89

Dr.-Ing. Peter Baumgartner

**Stufenmethode zur Schnittstellengestaltung in der internationalen Produktion**

Band 90

Dr.-Ing. Dirk Vossmann

**Wissensmanagement in der Produktentwicklung durch Qualitätsmethodenverbund und Qualitätsmethodenintegration**

Band 91

Dr.-Ing. Martin Plass

**Beitrag zur Optimierung des Honprozesses durch den Aufbau einer Honprozessregelung**

Band 92

Dr.-Ing. Titus Konold

**Optimierung der Fünfschfräsbearbeitung durch eine kennzahlenunterstützte CAM-Umgebung**

Band 93

Dr.-Ing. Jürgen Brath

**Unterstützung der Produktionsplanung in der Halbleiterfertigung durch risikoberücksichtigende Betriebskennlinien**

Band 94

Dr.-Ing. Dirk Geisinger

**Ein Konzept zur marktorientierten Produktentwicklung**

Band 95

Dr.-Ing. Marco Lanza

**Entwurf der Systemunterstützung des verteilten Engineering mit Axiomatic Design**

Band 96

Dr.-Ing. Volker Hüntrup

**Untersuchungen zur Mikrostrukturierbarkeit von Stählen durch das Fertigungsverfahren Fräsen**

Band 97

Dr.-Ing. Frank Reinboth

**Interne Stützung zur Genauigkeitsverbesserung in der Inertialmesstechnik: Beitrag zur Senkung der Anforderungen an Inertialsensoren**

Band 98

Dr.-Ing. Lutz Trender

**Entwicklungintegrierte Kalkulation von Produktlebenszykluskosten auf Basis der ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung**

Band 99

Dr.-Ing. Cornelia Kafka

**Konzeption und Umsetzung eines Leitfadens zum industriellen Einsatz von Data-Mining**

Band 100

Dr.-Ing. Gebhard Selinger

**Rechnerunterstützung der informellen Kommunikation in verteilten Unternehmensstrukturen**

Band 101

Dr.-Ing. Thomas Windmüller

**Verbesserung bestehender Geschäftsprozesse durch eine mitarbeiterorientierte Informationsversorgung**

Band 102

Dr.-Ing. Knud Lembke

**Theoretische und experimentelle Untersuchung eines bistabilen elektrohydraulischen Linearantriebs**

Band 103

Dr.-Ing. Ulrich Thies

**Methode zur Unterstützung der variantengerechten Konstruktion von industriell eingesetzten Kleingeräten**

Band 104

Dr.-Ing. Andreas Schmäzle

**Bewertungssystem für die Generalüberholung von Montageanlagen –Ein Beitrag zur wirtschaftlichen Gestaltung geschlossener Facility- Management-Systeme im Anlagenbau**

Band 105

Dr.-Ing. Thorsten Frank

**Vergleichende Untersuchungen schneller elektromechanischer Vorschubachsen mit Kugelgewindetrieb**

Band 106

Dr.-Ing. Achim Agostini

**Reihenfolgeplanung unter Berücksichtigung von Interaktionen: Beitrag zur ganzheitlichen Strukturierung und Verarbeitung von Interaktionen von Bearbeitungsobjekten**

Band 107

Dr.-Ing. Thomas Barrho

**Flexible, zeitfenstergesteuerte Auftragseinplanung in segmentierten Fertigungsstrukturen**

Band 108

Dr.-Ing. Michael Scharer

**Quality Gate-Ansatz mit integriertem Risikomanagement**



Band 109

Dr.-Ing. Ulrich Suchy

**Entwicklung und Untersuchung eines neuartigen Mischkopfes für das Wasser  
Abrasive Strahlschneiden**

Band 110

Dr.-Ing. Sellal Mussa

**Aktive Korrektur von Verlagerungsfehlern in Werkzeugmaschinen**

Band 111

Dr.-Ing. Andreas Hühsam

**Modellbildung und experimentelle Untersuchung des Wälzschälprozesses**

Band 112

Dr.-Ing. Axel Plutowsky

**Charakterisierung eines optischen Messsystems und den Bedingungen des  
Arbeitsraums einer Werkzeugmaschine**

Band 113

Dr.-Ing. Robert Landwehr

**Konsequent dezentralisierte Steuerung mit Industrial Ethernet und offenen  
Applikationsprotokollen**

Band 114

Dr.-Ing. Christoph Dill

**Turbulenzreaktionsprozesse**

Band 115

Dr.-Ing. Michael Baumeister

**Fabrikplanung im turbulenten Umfeld**

Band 116

Dr.-Ing. Christoph Gönzheimer

**Konzept zur Verbesserung der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) in  
Produktionssystemen durch intelligente Sensor/Aktor-Anbindung**

Band 117

Dr.-Ing. Lutz Demuß

**Ein Reifemodell für die Bewertung und Entwicklung von Dienstleistungs-  
organisationen: Das Service Management Maturity Modell (SMMM)**

Band 118

Dr.-Ing. Jörg Söhner

**Beitrag zur Simulation zerspanungstechnologischer Vorgänge mit Hilfe der Finite-Element-Methode**

Band 119

Dr.-Ing. Judith Elsner

**Informationsmanagement für mehrstufige Mikro-Fertigungsprozesse**

Band 120

Dr.-Ing. Lijing Xie

**Estimation Of Two-dimension Tool Wear Based On Finite Element Method**

Band 121

Dr.-Ing. Ansgar Blessing

**Geometrischer Entwurf mikromechatronischer Systeme**

Band 122

Dr.-Ing. Rainer Ebner

**Steigerung der Effizienz mehrachsiger Fräsprozesse durch neue Planungsmethoden mit hoher Benutzerunterstützung**

Band 123

Dr.-Ing. Silja Klinkel

**Multikriterielle Feinplanung in teilautonomen Produktionsbereichen – Ein Beitrag zur produkt- und prozessorientierten Planung und Steuerung**

Band 124

Dr.-Ing. Wolfgang Neithardt

**Methodik zur Simulation und Optimierung von Werkzeugmaschinen in der Konzept- und Entwurfsphase auf Basis der Mehrkörpersimulation**

Band 125

Dr.-Ing. Andreas Mehr

**Hartfeinbearbeitung von Verzahnungen mit kristallinen diamantbeschichteten Werkzeugen beim Fertigungsverfahren Wälzstoßen**

Band 126

Dr.-Ing. Martin Gutmann

**Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise zur Diagnose von hydraulischen Produktionsmaschinen**

Band 127

Dr.-Ing. Gisela Lanza

**Simulative Anlaufunterstützung auf Basis der Qualitätsfähigkeiten von Produktionsprozessen**

Band 128

Dr.-Ing. Ulf Dambacher

**Kugelgewindetrieb mit hohem Druckwinkel**

Band 129

Dr.-Ing. Carsten Buchholz

**Systematische Konzeption und Aufbau einer automatisierten Produktionszelle für pulverspritzgegossene Mikromauteile**

Band 130

Dr.-Ing. Heiner Lang

**Trocken-Räumen mit hohen Schnittgeschwindigkeiten**

Band 131

Dr.-Ing. Daniel Nesges

**Prognose operationeller Verfügbarkeiten von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung von Serviceleistungen**

Im Shaker Verlag erschienene Bände:

---

Band 132

Dr.-Ing. Andreas Bechle

**Beitrag zur prozesssicheren Bearbeitung beim Hochleistungsfertigungsverfahren Wälzschälen**

Band 133

Dr.-Ing. Markus Herm

**Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke auf Basis von Business Capabilities**

Band 134

Dr.-Ing. Hanno Tritschler

**Werkzeug- und Zerspanprozessoptimierung beim Hartfräsen von Mikrostrukturen in Stahl**

Band 135

Dr.-Ing. Christian Munzinger

**Adaptronische Strebe zur Steifigkeitssteigerung  
von Werkzeugmaschinen**

Band 136

Dr.-Ing. Andreas Stepping

**Fabrikplanung im Umfeld von Wertschöpfungsnetzwerken und  
ganzheitlichen Produktionssystemen**

Band 137

Dr.-Ing. Martin Dyck

**Beitrag zur Analyse thermische bedingter Werkstückdeformationen  
in Trockenbearbeitungsprozessen**

Band 138

Dr.-Ing. Siegfried Schmalzried

**Dreidimensionales optisches Messsystem für eine effizientere  
geometrische Maschinenbeurteilung**

Band 139

Dr.-Ing. Marc Wawerla

**Risikomanagement von Garantieleistungen**

Band 140

Dr.-Ing. Ivesa Buchholz

**Strategien zur Qualitätssicherung mikromechanischer Bauteile  
mittels multisensorieller Koordinatenmesstechnik**

Band 141

Dr.-Ing. Jan Kotschenreuther

**Empirische Erweiterung von Modellen der Makrozerspannung  
auf den Bereich der Mikrobearbeitung**

Band 142

Dr.-Ing. Andreas Knödel

**Adaptronische hydrostatische Drucktascheneinheit**

Band 143

Dr.-Ing. Gregor Stengel

**Fliegendes Abtrennen räumlich gekrümmter Strangpressprofile mittels  
Industrierobotern**

Band 144

Dr.-Ing. Udo Weismann

**Lebenszyklusorientiertes interorganisationelles Anlagencontrolling**

Band 145

Dr.-Ing. Rüdiger Pabst

**Mathematische Modellierung der Wärmestromdichte zur Simulation des thermischen Bauteilverhaltens bei der Trockenbearbeitung**

Band 146

Dr.-Ing. Jan Wieser

**Intelligente Instandhaltung zur Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen**

Band 147

Dr.-Ing. Sebastian Haupt

**Effiziente und kostenoptimale Herstellung von Mikrostrukturen durch eine Verfahrenskombination von Bahnerosion und Laserablation**

Band 148

Dr.-Ing. Matthias Schlipf

**Statistische Prozessregelung von Fertigungs- und Messprozess zur Erreichung einer variabilitätsarmen Produktion mikromechanischer Bauteile**

Band 149

Dr.-Ing. Jan Philipp Schmidt-Ewig

**Methodische Erarbeitung und Umsetzung eines neuartigen Maschinenkonzeptes zur produktflexiblen Bearbeitung räumlich gekrümmter Strangpressprofile**

Band 150

Dr.-Ing. Thomas Ender

**Prognose von Personalbedarfen im Produktionsanlauf unter Berücksichtigung dynamischer Planungsgrößen**

Band 151

Dr.-Ing. Kathrin Peter

**Bewertung und Optimierung der Effektivität von Lean Methoden in der Kleinserienproduktion**

Band 152

Dr.-Ing. Matthias Schopp

**Sensorbasierte Zustandsdiagnose und -prognose von Kugelgewindetrieben**

Band 153

Dr.-Ing. Martin Kipfmüller

**Aufwandsoptimierte Simulation von Werkzeugmaschinen**

Band 154

Dr.-Ing. Carsten Schmidt

**Development of a database to consider multi wear mechanisms within chip forming simulation**

Band 155

Dr.-Ing. Stephan Niggeschmidt

**Ausfallgerechte Ersatzteilbereitstellung im Maschinen- und Anlagenbau mittels lastabhängiger Lebensdauerprognose**

Band 156

Dr.-Ing. Jochen Conrad Peters

**Bewertung des Einflusses von Formabweichungen in der Mikro-Koordinatenmesstechnik**

Band 157

Dr.-Ing. Jörg Ude

**Entscheidungsunterstützung für die Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke**

Band 158

Dr.-Ing. Stefan Weiler

**Strategien zur wirtschaftlichen Gestaltung der globalen Beschaffung**

Band 159

Dr.-Ing. Jan Rühl

**Monetäre Flexibilitäts- und Risikobewertung**

Band 160

Dr.-Ing. Daniel Ruch

**Positions- und Konturerfassung räumlich gekrümmter Profile auf Basis bauteilimmanenter Markierungen**

Band 161

Dr.-Ing. Manuel Tröndle

**Flexible Zuführung von Mikrobauteilen mit piezoelektrischen Schwingförderern**

Band 162

Dr.-Ing. Benjamin Viering

**Mikroverzahnungsnormal**

Band 163

Dr.-Ing. Chris Becke

**Prozesskrafttrichtungsangepasste Frässtrategien zur schädigungsarmen Bohrungsbearbeitung an faserverstärkten Kunststoffen**

Band 164

Dr.-Ing. Patrick Werner

**Dynamische Optimierung und Unsicherheitsbewertung der lastabhängigen präventiven Instandhaltung von Maschinenkomponenten**

Band 165

Dr.-Ing. Martin Weis

**Kompensation systematischer Fehler bei Werkzeugmaschinen durch self-sensing Aktoren**

Band 166

Dr.-Ing. Markus Schneider

**Kompensation von Konturabweichungen bei gerundeten Strangpressprofilen durch robotergestützte Führungswerkzeuge**

Band 167

Dr.-Ing. Ester M. R. Ruprecht

**Prozesskette zur Herstellung schichtbasierter Systeme mit integrierten Kavitäten**

Band 168

Dr.-Ing. Alexander Broos

**Simulationsgestützte Ermittlung der Komponentenbelastung für die Lebensdauerprognose an Werkzeugmaschinen**

Band 169

Dr.-Ing. Frederik Zanger

**Segmentspanbildung, Werkzeugverschleiß, Randschichtzustand und Bauteileigenschaften:** Numerische Analysen zur Optimierung des Zerspanungsprozesses am Beispiel von Ti-6Al-4V

Band 170

Dr.-Ing. Benjamin Behmann

**Servicefähigkeit**

Band 171

Dr.-Ing. Annabel Gabriele Jondral

**Simulationsgestützte Optimierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung des Lean-Methodeneinsatzes**

Band 172

Dr.-Ing. Christoph Ruhs

**Automatisierte Prozessabfolge zur qualitätssicheren Herstellung von Kavitäten mittels Mikrobahnerosion**

Band 173

Dr.-Ing. Steven Peters

**Markoffsche Entscheidungsprozesse zur Kapazitäts- und Investitionsplanung von Produktionssystemen**

Band 174

Dr.-Ing. Christoph Kühlewein

**Untersuchung und Optimierung des Wälzschälverfahrens mit Hilfe von 3D-FEM-Simulation – 3D-FEM Kinematik- und Spanbildungssimulation**

Band 175

Dr.-Ing. Adam-Mwanga Dieckmann

**Auslegung und Fertigungsprozessgestaltung sintergefügter Verbindungen für  $\mu$ MIM-Bauteile**



Band 176

Dr.-Ing. Heiko Hennrich

**Aufbau eines kombinierten belastungs- und zustandsorientierten Diagnose- und Prognosesystems für Kugelgewindetriebe**

Band 177

Dr.-Ing. Stefan Herder

**Piezoelektrischer Self-Sensing-Aktor zur Vorspannungsregelung in adaptronischen Kugelgewindetriebern**

Band 178

Dr.-Ing. Alexander Ochs

**Ultraschall-Strömungsgreifer für die Handhabung textiler Halbzeuge bei der automatisierten Fertigung von RTM-Bauteilen**

Band 179

Dr.-Ing. Jürgen Michna

**Numerische und experimentelle Untersuchung zerspanungsbedingter Gefügeumwandlungen und Modellierung des thermo-mechanischen Lastkollektivs beim Bohren von 42CrMo4**

Band 180

Dr.-Ing. Jörg Elser

**Vorrichtungsfreie räumliche Anordnung von Fügepartnern auf Basis von Bauteilmarkierungen**

Band 181

Dr.-Ing. Katharina Klimscha

**Einfluss des Fügespalts auf die erreichbare Verbindungsqualität beim Sinterfügen**

Band 182

Dr.-Ing. Patricia Weber

**Steigerung der Prozesswiederholbarkeit mittels Analyse akustischer Emissionen bei der Mikrolaserablation mit UV-Pikosekundenlasern**

Band 183

Dr.-Ing. Jochen Schädel

**Automatisiertes Fügen von Tragprofilen mittels Faserwickeln**

Band 184

Dr.-Ing. Martin Krauß

**Aufwandsoptimierte Simulation von Produktionsanlagen durch Vergrößerung der Geltungsbereiche von Teilmodellen**

Band 185

Dr.-Ing. Raphael Moser

**Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke**

Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunkt mittels multikriterieller Optimierung

Band 186

Dr.-Ing. Martin Otter

**Methode zur Kompensation fertigungsbedingter Gestaltabweichungen für die Montage von Aluminium Space-Frame-Strukturen**

Band 187

Dr.-Ing. Urs Leberle

**Produktive und flexible Gleitförderung kleiner Bauteile auf phasenflexiblen Schwingförderern mit piezoelektrischen 2D-Antriebs-elementen**

Band 188

Dr.-Ing. Johannes Book

**Modellierung und Bewertung von Qualitätsmanagementstrategien in globalen Wertschöpfungsnetzwerken**

Band 189

Dr.-Ing. Florian Ambrosy

**Optimierung von Zerspanungsprozessen zur prozesssicheren Fertigung nanokristalliner Randschichten am Beispiel von 42CrMo4**

Band 190

Dr.-Ing. Adrian Kölmel

**Integrierte Messtechnik für Prozessketten unreifer Technologien am Beispiel der Batterieproduktion für Elektrofahrzeuge**

Band 191

Dr.-Ing. Henning Wagner

**Featurebasierte Technologieplanung zum Preforming von textilen Halbzeugen**

Band 192

Dr.-Ing. Johannes Gebhardt

**Strukturoptimierung von in FVK eingebetteten metallischen Lasteinleitungselementen**

Band 193

Dr.-Ing. Jörg Bauer

**Hochintegriertes hydraulisches Vorschubsystem für die Bearbeitung kleiner Werkstücke mit hohen Fertigungsanforderungen**

Band 194

Dr.-Ing. Nicole Stricker

**Robustheit verketteter Produktionssysteme**

Robustheitsevaluation und Selektion des Kennzahlensystems der Robustheit

Band 195

Dr.-Ing. Anna Sauer

**Konfiguration von Montagelinien unreifer Produkttechnologien am Beispiel der Batteriemontage für Elektrofahrzeuge**

Band 196

Dr.-Ing. Florian Sell-Le Blanc

**Prozessmodell für das Linearwickeln unrunder Zahnspulen**

Ein Beitrag zur orthozyklischen Spulenwickeltechnik

Band 197

Dr.-Ing. Frederic Förster

**Geregeltes Handhabungssystem zum zuverlässigen und energieeffizienten Handling textiler Kohlenstofffaserzuschnitte**

Band 198

Dr.-Ing. Nikolay Boev

**Numerische Beschreibung von Wechselwirkungen zwischen Zerspanprozess und Maschine am Beispiel Räumen**

Band 199

Dr.-Ing. Sebastian Greinacher

**Simulationsgestützte Mehrzieloptimierung schlanker und ressourcen-effizienter Produktionssysteme**

Band 200

Dr.-Ing. Benjamin Häfner

**Lebensdauerprognose in Abhängigkeit der Fertigungsabweichungen bei Mikroverzahnungen**

Band 201

Dr.-Ing. Stefan Klotz

**Dynamische Parameteranpassung bei der Bohrungsherstellung in faserverstärkten Kunststoffen unter zusätzlicher Berücksichtigung der Einspannsituation**

Band 202

Dr.-Ing. Johannes Stoll

**Bewertung konkurrierender Fertigungsfolgen mittels Kostensimulation und stochastischer Mehrzieloptimierung**

Anwendung am Beispiel der Blechpaketfertigung für automobiler Elektromotoren

Band 203

Dr.-Ing. Simon-Frederik Koch

**Fügen von Metall-Faserverbund-Hybridwellen im Schleuderverfahren**

ein Beitrag zur fertigungsgerechten intrinsischen Hybridisierung

Band 204

Dr.-Ing. Julius Ficht

**Numerische Untersuchung der Eigenspannungsentwicklung für sequenzielle Zerspanungsprozesse**

Band 205

Dr.-Ing. Manuel Baumeister

**Automatisierte Fertigung von Einzelblattstapeln in der Lithium-Ionen-Zellproduktion**

Band 206

Dr.-Ing. Daniel Bertsch

**Optimierung der Werkzeug- und Prozessauslegung für das Wälzschälen von Innenverzahnungen**

Band 207

Dr.-Ing. Kyle James Kippenbrock

**Deconvolution of Industrial Measurement and Manufacturing Processes for Improved Process Capability Assessments**

Band 208

Dr.-Ing. Farboud Bejnoud

**Experimentelle Prozesskettenbetrachtung für Räumbauteile am Beispiel einer einsatzgehärteten PKW-Schiebemuffe**

Band 209

Dr.-Ing. Steffen Dosch

**Herstellungsübergreifende Informationsübertragung zur effizienten Produktion von Werkzeugmaschinen am Beispiel von Kugelgewindetrieben**

Band 210

Dr.-Ing. Emanuel Moser

**Migrationsplanung globaler Produktionsnetzwerke**

Bestimmung robuster Migrationspfade und risiko-effizienter Wandlungsbefähiger

Band 211

Dr.-Ing. Jan Hochdörffer

**Integrierte Produktallokationsstrategie und Konfigurationssequenz in globalen Produktionsnetzwerken**

Band 212

Dr.-Ing. Tobias Arndt

**Bewertung und Steigerung der Prozessqualität in globalen Produktionsnetzwerken**

Band 213

Dr.-Ing. Manuel Peter

**Unwuchtminimale Montage von Permanentmagnetrotoren durch modellbasierte Online-Optimierung**

Band 214

Dr.-Ing. Robin Kopf

**Kostenorientierte Planung von Fertigungsfolgen additiver Technologien**

Band 215

Dr.-Ing. Harald Meier

**Einfluss des Räumens auf den Bauteilzustand in der Prozesskette  
Weichbearbeitung – Wärmebehandlung – Hartbearbeitung**

Band 216

Dr.-Ing. Daniel Brabandt

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels  
optischer Messtechnik**

Band 217

Dr.-Ing. Alexandra Schabunow

**Einstellung von Aufnahmeparametern mittels projektionsbasierter Qualitäts-  
kenngrößen in der industriellen Röntgen-Computertomographie**

Band 218

Dr.-Ing. Jens Bürgin

**Robuste Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken**

Mittelfristige Planung der variantenreichen Serienproduktion unter Unsicher-  
heit der Kundenauftragskonfigurationen

Band 219

Dr.-Ing. Michael Gerstenmeyer

**Entwicklung und Analyse eines mechanischen Oberflächenbehandlungs-  
verfahrens unter Verwendung des Zerspanungswerkzeuges**

Band 220

Dr.-Ing. Jacques Burtscher

**Erhöhung der Bearbeitungsstabilität von Werkzeugmaschinen durch  
semi-passive masseneinstellbare Dämpfungssysteme**

Band 221

Dr.-Ing. Dietrich Berger

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels prozess-  
integrierter Wirbelstromsensor-Arrays**

Band 222

Dr.-Ing. Fabian Johannes Ballier

**Systematic gripper arrangement for a handling device in lightweight production processes**

Band 223

Dr.-Ing. Marielouise Schäferling, geb. Zaiß

**Development of a Data Fusion-Based Multi-Sensor System for Hybrid Sheet Molding Compound**

Band 224

Dr.-Ing. Quirin Spiller

**Additive Herstellung von Metallbauteilen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiformen**

Band 225

Dr.-Ing. Andreas Spohrer

**Steigerung der Ressourceneffizienz und Verfügbarkeit von Kugelgewindetrieben durch adaptive Schmierung**

Band 226

Dr.-Ing. Johannes Fisel

**Veränderungsfähigkeit getakteter Fließmontagesysteme**

Planung der Fließbandabstimmung am Beispiel der Automobilmontage

Band 227

Dr.-Ing. Patrick Bollig

**Numerische Entwicklung von Strategien zur Kompensation thermisch bedingter Verzüge beim Bohren von 42CrMo4**

Band 228

Dr.-Ing. Ramona Pfeiffer, geb. Singer

**Untersuchung der prozessbestimmenden Größen für die anforderungsgerechte Gestaltung von Pouchzellen-Verpackungen**

Band 229

Dr.-Ing. Florian Baumann

**Additive Fertigung von endlosfaserverstärkten Kunststoffen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiform Verfahren**

Band 230

Dr.-Ing. Tom Stähr

**Methodik zur Planung und Konfigurationsauswahl skalierbarer Montagesysteme – Ein Beitrag zur skalierbaren Automatisierung**

Band 231

Dr.-Ing. Jan Schwennen

**Einbringung und Gestaltung von Lasteinleitungsstrukturen für im RTM-Verfahren hergestellte FVK-Sandwichbauteile**

Band 232

Dr.-Ing. Sven Coutandin

**Prozessstrategien für das automatisierte Preforming von bebinderten textilen Halbzeugen mit einem segmentierten Werkzeugsystem**

Band 233

Dr.-Ing. Christoph Liebrecht

**Entscheidungsunterstützung für den Industrie 4.0-Methodeneinsatz**  
Strukturierung, Bewertung und Ableitung von Implementierungsreihenfolgen

Band 234

Dr.-Ing. Stefan Treber

**Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken**  
Verbesserung des Störungsmanagements durch verstärkten Informationsaustausch

Band 235

Dr.-Ing. Marius Dackweiler

**Modellierung des Fügewickelprozesses zur Herstellung von leichten Fachwerkstrukturen**

Band 236

Dr.-Ing. Fabio Echsler Minguillon

**Prädiktiv-reaktives Scheduling zur Steigerung der Robustheit in der Matrix-Produktion**

Band 237

Dr.-Ing. Sebastian Haag

**Entwicklung eines Verfahrensablaufes zur Herstellung von Batteriezellstapeln mit großformatigem, rechteckigem Stapelformat und kontinuierlichen Materialbahnen**



Band 238

Dr.-Ing. Raphael Wagner

**Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in der Serienproduktion**

Band 239

Dr.-Ing. Christopher Ehrmann

**Ausfallfrüherkennung von Ritzel-Zahnstangen- Trieben mittels Acoustic Emission**

Band 240

Dr.-Ing. Janna Hofmann

**Prozessmodellierung des Fünf-Achs-Nadelwickelns zur Implementierung einer trajektoriebasierten Drahtzugkraftregelung**

Band 241

Dr.-Ing. Andreas Kuhnle

**Adaptive Order Dispatching based on Reinforcement Learning Application in a Complex Job Shop in the Semiconductor Industry**

Band 242

Dr.-Ing. Andreas Greiber

**Fertigung optimierter technischer Oberflächen durch eine Verfahrenskombination aus Fliehkraft-Tauchgleitschleifen und Laserablation Prozesseinflüsse und Prozessauslegung**

Band 243

Dr.-Ing. Jan Niclas Eschner

**Entwicklung einer akustischen Prozessüberwachung zur Porenbestimmung im Laserstrahlschmelzen**

Band 244

Dr.-Ing. Sven Roth

**Schädigungsfreie Anbindung von hybriden FVK/Metall-Bauteilen an metallische Tragstrukturen durch Widerstandspunktschweißen**

Band 245

Dr.-Ing. Sina Kathrin Peukert

**Robustheitssteigerung in Produktionsnetzwerken mithilfe eines integrierten Störungsmanagements**

Band 246

Dr.-Ing. Alexander Jacob

**Hochiterative Technologieplanung**

Rekursive Optimierung produkt- und fertigungsbezogener Freiheitsgrade am Beispiel der hybrid-additiven Fertigung

Band 247

Dr.-Ing. Patrick Moll

**Ressourceneffiziente Herstellung von Langfaser-Preforms im Faserblasverfahren**

Band 248

Dr.-Ing. Eric Thore Segebadé

**Erhöhung der Verschleißbeständigkeit von Bauteilen aus Ti-6Al-4V mittels simulationsgestützter Zerspanung und mechanischer Mikrotexturierung**

Band 249

Dr.-Ing. Shun Yang

**Regionalized implementation strategy of smart automation within assembly systems in China**

Band 250

Dr.-Ing. Constantin Carl Hofmann

**Vorausschauende und reaktive Mehrzieloptimierung für die Produktionssteuerung einer Matrixproduktion**

Band 251

Dr.-Ing. Paul Ruhland

**Prozesskette zur Herstellung von hybriden Faser-Metall-Preforms**

Modellbildung und Optimierung des Binderauftrags und der Drapierung für stabförmige Bauteile

Band 252

Dr.-Ing. Leonard Schild

**Erzeugung und Verwendung von Anwendungswissen in der industriellen Computertomographie**

Band 253

Dr.-Ing. Benedikt Klee

**Analyse von Phaseninformationen in Videodaten zur Identifikation von Schwingungen in Werkzeugmaschinen**

Band 254

Dr.-Ing. Bruno Vargas

**Wälzschälern mit kleinen Achskreuzwinkeln**

Prozessgrenzen und Umsetzbarkeit

Band 255

Dr.-Ing. Lucas Bretz

**Function-oriented in-line quality assurance of hybrid sheet molding compound**

Band 256

Dr.-Ing. Bastian Rothaupt

**Dämpfung von Bauteilschwingungen durch einstellbare Werkstückdirektspannung mit Hydrodehnspanntechnik**

Band 257

Dr.-Ing. Daniel Kupzik

**Robotic Swing Folding of three-dimensional UD-tape-based Reinforcement Structures**

Band 258

Dr.-Ing. Bastian Verhaelen

**(De-)Zentralisierung von Entscheidungen in globalen Produktionsnetzwerken**  
Strategie- und komplexitätsorientierte Gestaltung der Entscheidungsautonomie

Band 259

Dr.-Ing. Hannes Wilhelm Weinmann

**Integration des Vereinzelungs- und Stapelbildungsprozesses in ein flexibel und kontinuierlich arbeitendes Anlagenmodul für die Li-Ionen Batteriezellfertigung**

Band 260

Dr.-Ing. Florian Stamer

**Dynamische Lieferzeit-Preisgestaltung in variantenreicher Produktion**

Ein adaptiver Ansatz mithilfe von Reinforcement Learning

Band 261

Dr.-Ing. Patrick Neuenfeldt

**Modellbildung des Tauchgleitschleifens zur Abtrag- und**

**Topografievorhersage an komplexen Geometrien**

Band 262

Dr.-Ing. Boris Matuschka

**Energieeffizienz in Prozessketten: Analyse und Optimierung von**

**Energieflüssen bei der Herstellung eines PKW-Getriebebauteils aus 16MnCr5**

Band 263

Dr.-Ing. Tobias Schlagenhaut

**Bildbasierte Quantifizierung und Prognose des Verschleißes an**

**Kugelgewindetriebsspindeln**

Ein Beitrag zur Zustandsüberwachung von Kugelgewindetrieben mittels

Methoden des maschinellen Lernens

Band 264

Dr.-Ing. Benedict Stampfer

**Entwicklung eines multimodalen Prozessmodells zur**

**Oberflächenkonditionierung beim Außenlängsdrehen von 42CrMo4**

Band 265

Dr.-Ing. Carmen Maria Krahe

**KI-gestützte produktionsgerechte Produktentwicklung**

Automatisierte Wissensextraktion aus vorhandenen Produktgenerationen

Band 266

Dr.-Ing. Markus Netzer

**Intelligente Anomalieerkennung für hochflexible Produktionsmaschinen**

Prozessüberwachung in der Brownfield Produktion

Band 267

Dr.-Ing. Simon Raphael Merz

**Analyse der Kinematik und Kinetik von Planetenwalgwindtrieben**

Band 268

Dr.-Ing. Rainer Maria Silbernagel

**Funktionsorientierte Qualitatsregelung in Produktionsnetzwerken**

Qualitätsmanagement in der Produktion hochpräziser Produkte durch netzwerkweite Datenintegration

Band 269

Dr.-Ing. Jonas Nieschlag

**Gestaltung und Prozessanalyse für im Schleuderverfahren hergestellte FKV-Metall-Hohlstrukturen**

Band 270

Dr.-Ing. Lukas Matthias Weiser

**In-Process Porositatserkennung für den PBF-LB/M-Prozess**

Band 271

Dr.-Ing. Leonard Vincent Overbeck

**Digital Twins of production systems**

Automated validation and update of material flow simulation models with real data

Band 272

Dr.-Ing. Felix Klenk

**Transparenzsteigerung in der Ruckfuhrungslogistik zur Verbesserung der Materialbedarfsplanung für das Remanufacturing**

Band 273

Dr.-Ing. Benjamin Bold

**Kompensation der Wrinkle-Bildung beim Kalandrieren von Lithium-Ionen-Kathoden**

Vom Prozessverständnis des Kalandrierens bis zur Prozessoptimierung mittels Anti-Wrinkle-Modul

Band 274

Dr.-Ing. Daniel Gauder

**Adaptive in-line Qualitatsregelung in der Mikro-Verzahnungsfertigung**

Band 275

Dr.-Ing. Fabian Sasse

**Ontologie-basierte Entscheidungsunterstützung für die Auswahl von  
Messsystemen in unreifen Produktionsprozessen**