

---

Ciplus  
Band 1/2023

# KOARCH - Kognitive Architektur für Cyber- physische Produktionssysteme und Industrie 4.0

Thomas Bartz-Beielstein

Richard Schulz





# Wissenschaftlicher Abschlussbericht

zum BMBF-Forschungsvorhaben:

*„KOARCH - Kognitive Architektur für Cyber-physische Produktionssysteme und Industrie 4.0“*

Im Rahmen der BMBF-Förderbekanntmachung „IngenieurNachwuchs – Kooperative Promotion“

Förderkennzeichen: 13FH007IB6

Projektlaufzeit: 01.01.2018 – 31.12.2022

Technische Hochschule Köln – Campus Gummersbach  
Fakultät für Informatik und Ingenieurwissenschaften  
IDE+A - Institut für Data Science, Engineering, and Analytics  
Steinmüllerallee 1  
51643 Gummersbach

Gefördert vom: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

Projektträger: VDI Technologiezentrum GmbH  
VDI-Platz 1  
40468 Düsseldorf

Verfasst von: Richard Schulz, M. Sc.      Prof. Dr. Thomas Bartz-Beielstein  
(Forschungskordinator)      (Projektleiter)

Gummersbach, 28.06.2023

## Danksagung und Erklärung

Die Autoren und die Technische Hochschule Köln möchten sich bei dem Fördergeldgeber BMBF für das entgegengebrachte Vertrauen bedanken. Wir möchten auch den Partnerfirmen Telekom Innovation Laboratories, Telexiom AG und OPITZ Consulting Deutschland GmbH für die konstruktive Zusammenarbeit danken. Ebenso gilt unser Dank dem inIT und der Technischen Hochschule Ostwestfalen-Lippe für die Zusammenarbeit in Bezug auf die kognitive Referenzarchitektur und die Bereitstellung der Demonstratoren in deren SmartFactoryOWL.

Es ist zu beachten, dass das BMBF keine Gewähr für die Richtigkeit, Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben übernimmt, sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die Autoren sind verantwortlich für den Inhalt dieser Veröffentlichung.

# Inhalt

<b>Danksagung und Erklärung</b> .....	<b>IV</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>VI</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>VII</b>
<b>1 Kurze Darstellung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Aufgabenstellung.....	1
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	2
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	2
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand.....	4
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	5
<b>2 Eingehende Darstellung</b> .....	<b>6</b>
2.1 Verwendung der Zuwendung und Projektergebnisse.....	6
2.1.1 Arbeitsschwerpunkte der einzelnen Arbeitspakete.....	6
2.1.2 Ergebnisse der wissenschaftlich-technischen Untersuchungen und wichtige Verfahrensweiterentwicklungen.....	10
2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	13
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	13
2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	14
2.5 Während des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte anderer Stellen.....	14
2.6 Gesamteinschätzung über den Fortgang der FE-Arbeiten des Verbundvorhabens und die Kooperation des Verbundes.....	15
2.7 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	15
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>18</b>

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Arbeitspakete des Projektes .....	3
Tabelle 2: Veröffentlichungen .....	15

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Architekturen und identifizierter Forschungsbedarf [37] .....	11
Abbildung 2: Kognitive Referenzarchitektur (CAAI).....	12
Abbildung 3: Deployment in Kubernetes .....	13

# 1 Kurze Darstellung

## 1.1 Aufgabenstellung

In den letzten Jahren ist die Komplexität der Produktionssysteme aufgrund des globalen Wettbewerbs und der zunehmenden Produktkomplexität stark angestiegen. Insbesondere im Maschinenbau hat die Softwareentwicklung einen großen Anteil an dieser Entwicklung übernommen. Diese wachsende Komplexität stellt eine Herausforderung für Automatisierer, Systemingenieure und Anlagenbauer dar. Industrie 4.0, Cyber-physische Systeme (CPS) und intelligente Automatisierungssysteme bieten eine mögliche Lösung für diese wachsende Belastung, indem menschliches Expertenwissen in die Automatisierung integriert wird.

Im Gegensatz zum traditionellen prozeduralen Ansatz in der klassischen Automation formuliert der Experte lediglich seine Ziele, wie zum Beispiel die Beschreibung des Endprodukts, der Durchsatzziele oder des maximalen Energieverbrauchs. Das Wissen bezieht sich auf die Beschreibung dieser Ziele durch Aussagesätze anstatt auf die Beschreibung von Schritten, um diese Ziele zu erreichen. Mit anderen Worten, das Wissen wird deklarativ statt prozedural formuliert. Dieser neue Ansatz ermöglicht es intelligenten Systemen, ausreichend Handlungsspielraum zur Umsetzung der Zielvorgaben zu haben, einschließlich Anpassung und Optimierung. Dadurch wird der menschliche Aufwand in der Automatisierung, beispielsweise bei der Optimierung, Inbetriebnahme und beim Anlagenumbau, reduziert.

Um eine solche intelligente Automation umzusetzen, sind neue Automatisierungstechniken und insbesondere neue Software-Services erforderlich, die diese Methoden unterstützen. Dazu gehören unter anderem Methoden des maschinellen Lernens, Condition-Monitoring- und Diagnose-Algorithmen sowie Optimierungsverfahren. Derzeit werden diese neuen Software-Services im Rahmen von Industrie 4.0-Ansätzen unabhängig voneinander von verschiedenen Partnern implementiert. Die Schnittstellen sind proprietär, sodass notwendige Daten, Modelle und Ergebnisse nicht ohne zusätzlichen Aufwand ausgetauscht werden können. Dennoch soll es möglich sein, dass Geräte und Komponenten unterschiedlicher Hersteller in der Industrie 4.0 zusammenarbeiten können.

Im Rahmen des Projekts wurden technologische und produktionstechnische Schwerpunkte bearbeitet. Das Institut für Data Science, Engineering, and Analytics (IDE+A) war für die folgenden, praxisrelevanten Inhalte verantwortlich:

- Algorithmenentwurf und -implementierung
- Entwicklung einer Big Data Plattform unter Berücksichtigung von Industrie 4.0 Standards
- Einrichtung des Big Data Labs
- Konzeptionelle Entwicklung einer Referenzarchitektur für intelligente Automation im Umfeld von Industrie 4.0



## 1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Ursprünglich war die Projektlaufzeit für einen Zeitraum von 36 Monaten geplant, und zwar vom 01.01.2018 bis zum 31.12.2021. Aufgrund der Corona-Pandemie und dem Wechsel der Projektleitung von Herrn Prof. Niggemann zu Herrn Prof. Henning Trsek am 01.04.2021 wurde die Projektlaufzeit um weitere 12 Monate bis zum 31.12.2022 verlängert, wobei diese Verlängerung keine Auswirkungen auf die finanzielle Förderung hatte.

Insgesamt waren drei Industriepartner und vier Partner aus Hochschulen und Forschungseinrichtungen an dem Projekt beteiligt. Die Gesamtprojektkoordination wurde vom inIT der Technischen Hochschule Ostwestfalen-Lippe (TH OWL) übernommen und die Teilprojektleitung vom IDE+A (Institut für Data Science, Engineering, and Analytics) der Technische Hochschule Köln (TH Köln).

## 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Gesamtprojekt bestand aus insgesamt fünf Arbeitspaketen, wobei vier davon durch die Technische Hochschule Köln mitbearbeitet wurden. Ein Schwerpunkt (zweites Arbeitspaket) stellte der Entwurf und die Implementierung von Algorithmen dar. Hierbei wurden vor allem Recherchen, Entwürfe, Implementierungen und Erweiterungen von Algorithmen durchgeführt. Außerdem wurde all dies mit den aktuellen Industrie 4.0-Standards abgeglichen.

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Big-Data Plattform (drittes Arbeitspaket). Hier wurde neben der dazugehörigen Recherche und Implementierung vor allem das Konzept und die Umsetzung einer verteilten Architektur vorangetrieben. Auch hier wurden die aktuellen Industrie 4.0-Standards berücksichtigt.

Das vierte Arbeitspaket beschäftigte sich mit der Evaluation der in den vorherigen Arbeitspaketen entwickelten Lösungen. Unser Fokus lag dabei auf der Verifikation der erarbeiteten Datenstrukturen, indem deren Funktionalität und Plausibilität ausführlich getestet wurde. Im Anschluss erfolgten praktische Tests, wofür Hardware, Algorithmen und Big-Data-Plattform verknüpft wurden.

Im fünften Arbeitspaket sollte die Anwendbarkeit der entwickelten Konzepte und Formalismen für unterschiedliche Branchen und Unternehmen geprüft werden.

Die entwickelten Konzepte und Formalismen wurden der Produktionsbranche auf nationalen und europäischen Veranstaltungen vorgestellt. Als herausragendes Ergebnis des Projekts ist die erfolgreiche Durchführung von drei Promotionen zu erwähnen.

Insgesamt gliederte sich das Projekt in folgende Arbeitspakete:

Tabelle 1: Arbeitspakete des Projektes

<b>AP 1</b>	<b>Entwurf der kognitiven Referenzarchitektur und Konzeption der konzeptionellen Ebene</b>	
AP 1.1	Recherche, Anforderungsdefinition, Konzept	01/18 – 10/18
AP 1.2	Entwurf deklarativer Programmieransätze für Architektur	11/18 – 10/19
AP 1.3	Abgleich mit Industrie 4.0 Standards	11/19 – 04/20
<b>AP 2</b>	<b>Algorithmenentwurf und -implementierung</b>	
AP 2.1	Recherche und Entwurf	01/18 – 10/18
AP 2.2	Implementation, Erweiterung der SPO2 Toolbox	11/18 – 10/19
AP 2.3	Abgleich mit Industrie 4.0 Standards	11/19 – 04/20
<b>AP 3</b>	<b>Big-Data Plattform</b>	
AP 3.1	Recherche und Entwurf, Implementation, Testen und Dokumentation	01/18 – 10/18
AP 3.2	Konzept und Umsetzung für eine verteilte Umsetzung der Architektur	11/18 – 10/19
AP 3.3	Abgleich mit Industrie 4.0 Standards	11/19 – 04/20
<b>AP 4</b>	<b>Evaluation in SmartFactoryOWL und Big Data Lab</b>	
AP 4.1	Umsetzung der Anwendungsbeispiele in der SmartFactoryOWL	05/20 – 11/21
AP 4.2	Verifikation der Standards im Big Data Lab	05/20 – 11/21

AP 4.3	Klärung der Anwendbarkeit anhand unterschiedlicher Demonstratoren	12/21 – 04/22
<b>AP 5</b>	<b>Individualisierung bei verschiedenen Kunden</b>	
AP 5.1	Klärung der Anwendbarkeit für unterschiedliche Branchen und Firmen	05/22 – 12/22

Das Teilvorhaben wurde gemäß dem oben genannten Projektplan durchgeführt. Zur Gewährleistung eines effektiven Informationsaustauschs zwischen den Projektpartnern fanden zentrale Veranstaltungen wie das Kick-Off-Meeting und Meilensteintreffen statt. Zudem wurden regelmäßige interne Projekttreffen abgehalten, an denen das IDE+A teilnahm.

Durch diese kontinuierliche Abstimmung wurde eine effiziente Projektbearbeitung ermöglicht und gegebenenfalls erforderliche Anpassungen der Arbeitsschritte vorgenommen. Die im Rahmen der Projekttreffen erarbeiteten Unterlagen wurden allen Partnern zur Verfügung gestellt.

#### 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Der Hauptbeitrag der TH Köln befasste sich mit der Entwicklung von selbstlernenden Algorithmen für eine kognitive Referenzarchitektur. Diese Architektur ermöglicht den Entwurf komplexer Softwaresysteme und bietet anwendungsspezifische Methoden sowie Implementierungsanleitungen, die auf bewährten domänenspezifischen Konzepten basieren. Benutzer benötigen keine tiefgreifenden algorithmischen Kenntnisse, da die Algorithmen in der Lage sind, selbst zu lernen. Das Ergebnis ist eine Blaupause für eine domänenspezifische Klasse von Systemen, die die Kommunikation und den Wissenstransfer zwischen den Teilsystemen erleichtert. Aufbauend auf früheren Arbeiten wie bspw. [1] und [2] wurde im Rahmen des Projekts eine dreistufige Architektur entwickelt, die ein anpassungsfähiges System mit schnell wechselnden Konfigurationen ermöglicht.

Eine Übersicht über die Entwicklung und relevante Anwendungen im Bereich CPS (Cyber-Physical Systems) bietet [3]. In der Literatur gibt es bereits Ansätze, die Richtlinien, Architekturen und Modelle für CPS beschreiben [4] [5] [6] [7] [8] [9] [10]. Niggemann et al. [11] haben Konzepte für die datengetriebene Analyse und Diagnose in CPS beschrieben. Besondere Anforderungen, wie z. B. hohe Echtzeitfähigkeit [12], ergeben sich beim Einsatz von Lernalgorithmen mit CPS in der Produktion. In stark vernetzten CPS treten große Datenmengen auf. Eine Übersicht über deren Analyse und Management findet man in [13], [14] und [15]. Für die Analyse großer Datenmengen werden häufig Data Mining-Algorithmen in Online-Varianten entwickelt, bei denen die Modelle durch einzelne Datensätze aktualisiert werden können, z.B. Very Fast Decision Trees [16]. Query Optimization bei großen Datenmengen ist ebenfalls relevant [17], auch in Verbindung mit

evolutionären Algorithmen [18] [19] [20]. Die Softwareumgebung „Massive Online Analysis“ (MOA) [21] ermöglicht die Implementierung und Analyse von Online Algorithmen, die mit Datenströmen arbeiten. Für die geplanten Analysen werden Clustering Algorithmen zur Mustererkennung benötigt. Klassische Varianten wie Hierarchical Clustering können bei hochdimensionalen Daten versagen. Xu et al. [22] beschreiben Clustering Algorithmen, die für große Datensätze geeignet sind. Hierzu zählen z. B. Verfahren, die zufällig Untermengen der Daten wählen, Dichteverteilungen ausnutzen oder inkrementell neue Datensätze einlesen [23] [24]. Auch Prognose- und Optimierungsalgorithmen, die für große Datenmengen kaum erforscht wurden, sind von Bedeutung. Evolutionäre Algorithmen, die eine parallele Optimierung ermöglichen, werden bisher selten eingesetzt [25]. Genetisches Programmieren bietet einen interessanten Ansatz für maschinelles Lernen, da es nichtlineare und komplexe Zusammenhänge modellieren und verständliche Modelle für Menschen erzeugen kann. Diese Modelle sind schnell auswertbar und können unter Echtzeitbedingungen angewendet werden [26].

Fragen zu "Data Mining in Sensordaten automatisierter Prozesse" sind Gegenstand verschiedener Forschungsprojekte [27] [28] [29] [30] [31]. Ende 2015 wurde das Forschungsprojekt IMProvT der TH Köln zur Anwendung von Data Mining und Big Data Analytics im Bereich der "Trinkwasserqualität" gestartet.

## 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Projekts wurde eine intensive Zusammenarbeit zwischen den folgenden Forschungsstellen und Industriepartnern etabliert.

Forschungsstellen/Institute:

- Technische Hochschule Köln, Institut für Data Science, Engineering and Analytics (IDE+A) in Gummersbach
- Institut für industrielle Informationstechnik (inIT) in Lemgo

Industriepartner:

- Telekom Innovation Laboratories
- Telexiom AG
- OPITZ Consulting Deutschland GmbH

Die Zusammenarbeit zwischen den Forschungsstellen und Industriepartnern verlief äußerst konstruktiv. Zusätzlich wurde der wissenschaftliche Austausch durch die Kooperation mit dem Projekt Service-Meister (<https://www.servicemeister.org>) verstärkt.

## 2 Eingehende Darstellung

### 2.1 Verwendung der Zuwendung und Projektergebnisse

Das Projekt wurde im Januar 2018 gestartet und erhielt während der gesamten Laufzeit Finanzierung vom BMBF. Ursprünglich sollte das Projekt Ende 2021 abgeschlossen werden. Aufgrund der Corona-Pandemie und verschiedener personeller Veränderungen wurde das Projekt um ein weiteres Jahr bis Ende Dezember 2022 verlängert, ohne dass weitere finanzielle Mittel bereitgestellt wurden. Im Rahmen des Projekts waren folgende wissenschaftliche Mitarbeiter und wissenschaftliche Hilfskräfte vom Institut für Informatik und IDE+A beschäftigt:

- Dr. Jan Strohschein
- Andreas Fischbach
- Dr. Jörg Stork
- Dr. Frederik Rehbach
- Margarita Alejandra Rebolledo Coy
- Sven Kuhl
- Christian Schindler
- Kathrin Schinker
- Moritz Wurm
- Noah Christoph Pütz
- Konstantin Dietrich
- Alexander Hinterleitner
- Amrita Sen
- Alexandr Subbotin
- Alpar Gür

Der Beschäftigungsumfang ist dem Verwendungsnachweis zu entnehmen.

#### **2.1.1 Arbeitsschwerpunkte der einzelnen Arbeitspakete**

Nachfolgend werden die im Rahmen des Projektes bearbeiteten Arbeitspakete näher betrachtet und die sich daraus ergebenden Arbeitsschwerpunkte hervorgehoben.

##### *2.1.1.1 AP 2 - Algorithmenentwurf und -implementierung*

###### AP 2.1 - Recherche und Entwurf (FF1)

Die Arbeiten am AP 2.1 konnten Anfang 2019 abgeschlossen werden. Dafür wurden im Rahmen der Betrachtung gängiger Use-Cases in Industrie 4.0-Szenarien, wie Condition Monitoring, Predictive Maintenance und Prozessoptimierung, Anforderungen an die zu entwickelnden Methoden gesammelt. Es wurden erhebliche

Unterschiede in den Anforderungen festgestellt, sowohl in Bezug auf die Bearbeitungszeit der Algorithmen als auch auf die zu verarbeitende Datenmenge in den verschiedenen Use-Cases, die in Zusammenarbeit mit Industriepartnern bearbeitet wurden. Dies erforderte den Einsatz verschiedener Algorithmen, um die Anforderungen an die genannten Parameter und die Qualität der Verfahren zu erfüllen. Der Entwurf sieht einen standardisierten Ablauf vor, um die vom Benutzer vorgegebenen Ziele deklarativ umzusetzen. Bei hoher Dimensionalität werden Verfahren zur Dimensionalitätsreduktion und Parameterauswahl angewendet, gefolgt von einer datengetriebenen Modellierung mit geeigneten Verfahren.

Bei großen Datenströmen mit hoher Frequenz eignen sich Online-Algorithmen. Eine lernfähige Komponente soll automatisiert eine Auswahl aus der Vielzahl verfügbarer Algorithmen treffen, basierend auf den vorgegebenen Anforderungen, und während der Laufzeit die am besten geeigneten Methoden zur Lösung des aktuellen Problems erlernen. Dabei können effizient Methoden des Reinforcement Learning eingesetzt werden, ähnlich wie es in den kognitiven Architekturen ACT-R und Soar umgesetzt wird.

#### AP 2.2 - Implementation, Erweiterung der SPO2 Toolbox

Anfang 2020 konnte das Arbeitspaket 2.2 abgeschlossen werden. Dabei wurde die SPO2 Toolbox angepasst, um sie in CPPS-Szenarien einzusetzen, um Prozessparameter zu optimieren und Algorithmen zu konfigurieren. Die modulare Architektur von KOARCH ermöglicht die Wiederverwendbarkeit und den Austausch von (Teilen von) Algorithmen. In der herkömmlichen Verwendung wird in SPO eine bestimmte Modellvariante verwendet, was bei langfristigem Einsatz Nachteile wie einen starken Anstieg des Speicher- und CPU-Zeitverbrauchs mit sich bringen kann. Die Anpassungen in AP2.2 ermöglichen die parallele Berechnung verschiedener Modelle und den Wechsel zu einem anderen Modell, das auf denselben Daten basiert. Insbesondere einfachere Modelle wie LASSO, generalisierte lineare Modelle oder Random Forest können verwendet werden, wenn die verfügbaren Daten eine ausreichend hohe Modellgenauigkeit zulassen. Zu Beginn lohnt es sich, rechen- und speicherintensive Algorithmen wie Kriging einzusetzen, um schnell gute Ergebnisse zu erzielen.

#### AP 2.3 - Abgleich mit Industrie 4.0 Standards

Im Jahr 2020 wurden die Arbeiten an AP 2.3 abgeschlossen. Die implementierten Algorithmen und ihre Orchestrierung wurden in verschiedenen Anwendungsszenarien exemplarisch evaluiert. Durch die Abstraktion auf eine Architektur war es möglich, eine spezielle Implementierung für einzelne Use-Cases zu ermöglichen und die Plattform schnell an verschiedene Algorithmen und Hyperparameter anzupassen. In Zusammenarbeit mit dem Flughafen Köln-Bonn und dem InnovationHUB BRL wurde die Architektur von Studierenden der TH-Köln in einem Guided Project in einem Klassifikations-Anwendungsfall getestet. Die gesammelten Erfahrungen und Ideen zur weiteren Spezialisierung und Verfeinerung der kognitiven Komponente der Architektur waren wertvoll für den weiteren Projektverlauf und wurden in folgende APs einbezogen. Die Ergebnisse der APs 2.2 und 2.3 wurden direkt in eine gemeinsame Publikation mit der Arbeitsgruppe in Lemgo einbezogen.

### 2.1.1.2 AP 3 - Abgleich mit Industrie 4.0 Standards

#### AP 3.1 - Recherche und Entwurf, Implementation, Testen und Dokumentation

Das Arbeitspaket 3.1 konnte Anfang 2019 abgeschlossen werden. Es umfasste unter anderem die Recherche der Anforderungen und technischen Möglichkeiten für die Big Data Plattform. Unter Berücksichtigung des Arbeitspakets 3.2 wurde ein clusterbasierter Ansatz gewählt, der eine verteilte Umsetzung der Architektur ermöglichte. Die Fortschritte in der Virtualisierung von Rechenclustern und Plattformen flossen auch in die KOARCH-Architektur ein, wobei Plattform as a Service und Infrastructure as a Service eine Rolle spielten. Diese Ansätze erlauben eine deklarative Beschreibung der benötigten Infrastruktur und Softwareservices durch den Benutzer, was für das KOARCH-Szenario sehr gut geeignet ist.

Die verschiedenen Services sollten sowohl mit der Außenwelt als auch innerhalb des Clusters kommunizieren können. Hierfür wurde ein moderner Nachrichtenbus ausgewählt, der eine schnelle Kommunikation, Replikation für Datensicherheit und Partitionierung für den verteilten Betrieb ermöglicht. Schlussendlich wurden Kubernetes, Docker und Kafka als Technologien für die Orchestrierung, Virtualisierung und nachrichtenbasierte Kommunikation der Komponenten unserer Big-Data-Plattform ausgewählt. Mit diesem ersten Entwurf der Big-Data-Plattform konnte ein prototypischer Use Case erfolgreich umgesetzt werden.

#### AP 3.2 - Konzept und Umsetzung für eine verteilte Umsetzung der Architektur (FF1)

Die Arbeiten an Arbeitspaket 3.2 konnten Anfang 2020 abgeschlossen werden. Aufgrund von Verzögerungen bei der Ausschreibung konnte die benötigte Hardware für den Rechencluster erst zu Beginn des Jahres 2019 beschafft und in Betrieb genommen werden. Der Cluster besteht aus drei Servern, die mit oVirt, einer Open-Source-Alternative zu VMWare, betrieben und vernetzt werden. Nachdem zuerst die Komponenten aus dem Arbeitspaket 3.1 auf den Rechencluster übertragen wurden, wurde anschließend mit der Konzeption und Umsetzung einer verteilten Architektur für den Einsatz von AI in CPPS fortgefahren.

Die entwickelte Architektur wurde im "International Journal of Advanced Manufacturing Technology" unter dem Titel "CAAI—a cognitive architecture to introduce artificial intelligence in cyber-physical production systems" [32] veröffentlicht. In dem Artikel wird die Architektur detailliert beschrieben und eine erste Beispielimplementierung für einen Anwendungsfall präsentiert. Diese Implementierung ist öffentlich im KOARCH Github Repository verfügbar. [33]

#### AP 3.3 - Abgleich mit Industrie 4.0 Standards (FF3)

Das Arbeitspaket 3.3 wurde Ende 2020 erfolgreich abgeschlossen. In diesem Arbeitspaket wurde die entwickelte Architektur mit den Industrie 4.0 Standards abgeglichen. Es stellte sich jedoch heraus, dass bisher keine Standards für die konkrete Implementierung von Machine Learning Algorithmen in CPPS existieren. Daher wurden Veröffentlichungen aus der Wissenschaft und Industrie zur Verarbeitung von Machine Learning Workloads in verteilten Systemen analysiert. Die entwickelte Architektur wurde darauf ausgelegt, skalierbar zu sein, sodass sie sowohl auf gängigen Controllern als auch auf High-Performance-Clustern betrieben werden kann. Um eine breite Anwendung in Industrie und Wirtschaft in bestehenden, heterogenen

IT-Infrastrukturen zu ermöglichen, wurde auf quell-offene Standards und Frameworks der Cloud Native Computing Foundation (z. B. Kubernetes) und der Apache Software Foundation (z. B. Kafka und AVRO) gesetzt. Durch die Umsetzung in Kubernetes ermöglichen wir eine verteilte Verarbeitung der Daten und ermöglichen es dem kognitiven Modul, selbstständig neue Machine Learning Algorithmen auf der Plattform zu instanzieren und aus den Resultaten zu lernen. Die Ergebnisse dieser Arbeit wurden gemeinsam mit der Arbeitsgruppe aus Lemgo in einer Pre-Print-Publikation auf Arxiv veröffentlicht [34].

### *2.1.1.3 AP 4 - Evaluation in SmartFactoryOWL und Big Data Lab*

#### *AP 4.2 - Verifikation der Standards im Big Data Lab*

Die Arbeiten am Arbeitspaket 4.2 konnten Ende 2021 abgeschlossen werden. Es wurde vor allem untersucht, inwiefern sich die Algorithmen für den Einsatz in der Big Data Plattform eignen. Ein Algorithmus wurde für das kognitive Modul entwickelt, um vielversprechende Kandidaten aus den verfügbaren Algorithmen auszuwählen. Diese Kandidaten wurden anhand generierter Testfunktionen evaluiert, um einen Algorithmus für zukünftige Produktionszyklen auszuwählen. Die Untersuchung mit mehreren Algorithmen unterschiedlicher Komplexität ermöglichte Rückschlüsse auf die Übertragbarkeit der Ergebnisse von den Testfunktionen auf den realen Anwendungsfall.

Die anschließende Implementierung im Big Data Lab basierte auf den vorher erarbeiteten Lösungen. Der Schwerpunkt des Anpassungsbedarfs lag auf der dynamischen Orchestrierung einzelner Module, um den Betrieb der Big Data Plattform zu gewährleisten und verschiedene geeignete Algorithmen in einem Benchmark auf Simulationsdaten zur Laufzeit anzuwenden und zu vergleichen. Die Cognition-Komponente wählte und orchestrierte die Kandidaten-Algorithmen aus und setzte den resultierenden Algorithmus auf die Zielfunktion an.

Um eine sinnvolle Auswahl der Algorithmen gemäß der zur Laufzeit verfügbaren Ressourcen auf dem verwendeten System zu treffen, spielt das Algorithmen-Portfolio eine entscheidende Rolle. Unser Ansatz sieht die Implementierung eines Portfolios mit hoher Diversität vor, welches Algorithmen aus verschiedenen Algorithmen-Familien enthält [35]. Dennoch kann es für spezielle Probleme notwendig sein, Anpassungen am Portfolio vorzunehmen, beispielsweise durch das Hinzufügen geeigneter Algorithmen. Dabei kann Expertenwissen genutzt werden, um die Effizienz der Lösung zu steigern, indem ungeeignete oder bekannte ineffiziente Algorithmen deaktiviert werden. Dadurch wird der Suchraum der Cognition-Komponente entsprechend verkleinert.

Die Beispielimplementierung und die Daten aus den Experimenten sind im KO-ARCH GitHub Repository verfügbar [36].

#### *AP 4.3 - Klärung der Anwendbarkeit anhand unterschiedlicher Demonstratoren*

Das Arbeitspaket 4.3 wurde Anfang 2022 abgeschlossen. Der Fokus lag dabei auf der Untersuchung der Anpassbarkeit und Anwendbarkeit der Architektur auf neue



Problemstellungen. Es wurde damit begonnen, verschiedene Optimierungsalgorithmen zu untersuchen, um ein besseres Verständnis für deren Eigenschaften in Bezug auf das Problem zu gewinnen. Dies verbesserte die Anpassbarkeit der Architektur.

#### *2.1.1.4 AP 5 - Individualisierung bei verschiedenen Kunden*

##### *AP 5.1 - Klärung der Anwendbarkeit für unterschiedliche Branchen und Firmen*

Aufgrund von Herausforderungen wie der COVID-19 Pandemie und einer hohen Fluktuation im Team (alle drei Hauptentwickler des CAAI-Projekts haben das Projekt verlassen), wurde die Zielsetzung von Arbeitspaket 5 angepasst. Das Hauptaugenmerk lag nun darauf, die Erfahrungen mit Implementierungsproblemen der CAAI-Plattform in anderen Branchen und Anwendungen zusammenzufassen, um kontinuierliche Verbesserungen vorzunehmen. Zusätzlich wurde ein kritisches Review-Paper erstellt, welches potenzielle Verbesserungsmöglichkeiten für die Plattform aufzeigt und in die zukünftige Entwicklung einfließt. Darüber hinaus wurden die Vor- und Nachteile der CAAI-Architektur in KOARCH diskutiert. Das Paper soll in Kürze veröffentlicht werden.

#### **2.1.2 Ergebnisse der wissenschaftlich-technischen Untersuchungen und wichtige Verfahrensweiterentwicklungen**

Im Rahmen des Projekts wurden sowohl bestehende Architekturen als auch neue Ansätze anhand ausgewählter Anwendungsfälle bewertet. Diese Anwendungsfälle dienten als Grundlage, um die Eignung vorhandener Architekturen zu analysieren und Schwachstellen aufzudecken. Dabei wurden sowohl allgemeine Anforderungen an eine kognitive Architektur für cyber-physische Produktionssysteme (CPPS) als auch spezifische Anforderungen für jeden einzelnen Anwendungsfall definiert. Sowohl Architekturen aus dem Bereich der Automatisierungstechnik wie RAMI4.0 und die 5C-Architektur als auch kognitive Architekturen aus der Kognitionspsychologie wie Soar und ACT-R wurden betrachtet. Die Architekturen wurden hinsichtlich ihres Abstraktionsgrades und ihrer Generalisierbarkeit analysiert. Die Ergebnisse zeigten, dass eine Kombination beider Architekturtypen erforderlich ist, um sowohl den kognitiven Aspekt als auch den Aspekt der Automatisierung angemessen abzudecken. Abbildung 1 veranschaulicht die Ergebnisse der Architekturanalyse sowie den ermittelten Forschungsbedarf.

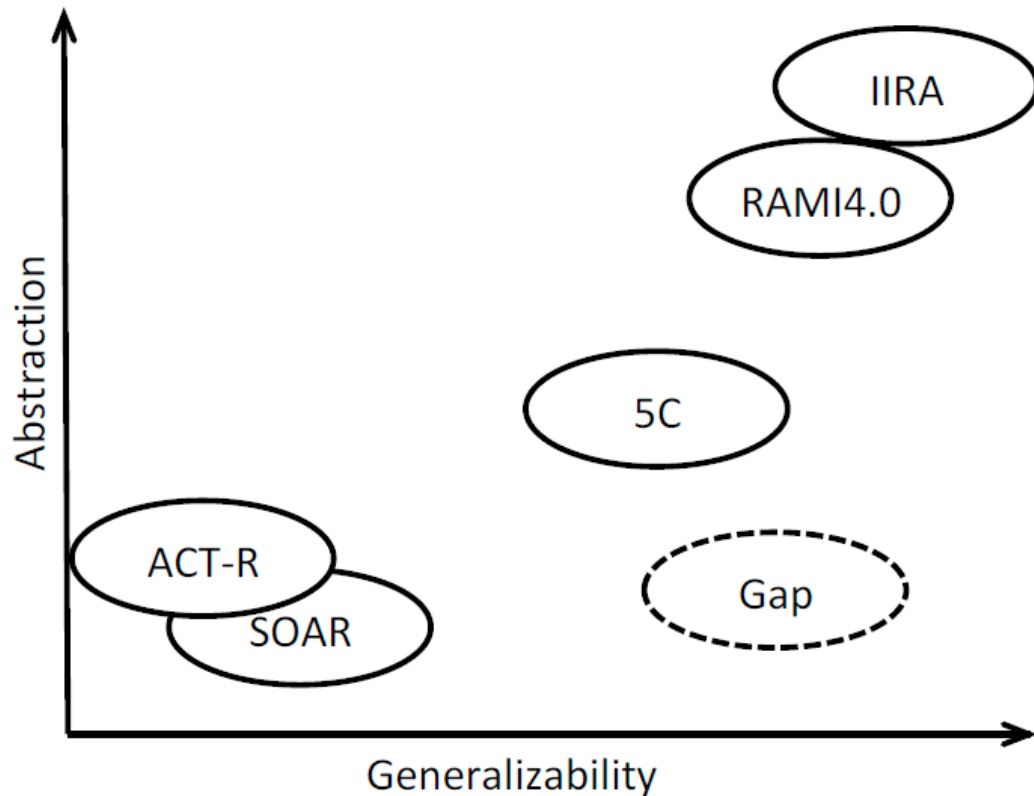


Abbildung 1: Architekturen und identifizierter Forschungsbedarf [37]

In enger Zusammenarbeit mit den Industriepartnern telexiom AG und OPITZ Consulting wurden passende Anwendungsfälle ausgewählt, die als Ausgangspunkt für die weiteren Arbeiten dienten. Es wurde beschlossen, Ontologien als Formalismus zu verwenden, um die benötigten Informationen auf deklarative Weise zu beschreiben. Diese Entscheidung ermöglichte eine präzise und strukturierte Erfassung der relevanten Informationen im Rahmen des Projekts.

Basierend auf den vorherigen Erkenntnissen wurde eine kognitive Referenzarchitektur (Cognitive Architecture for Artificial Intelligence - CAAI) entwickelt, die im weiteren Verlauf des Projekts prototypisch umgesetzt wurde (siehe Abbildung 2). Die Architektur wurde modular aufgebaut, was es Geräteherstellern ermöglicht, vorhandene Software-services direkt zu nutzen und ihren Kunden einen Mehrwert zu bieten. Sollten keine passenden Softwaremodule verfügbar sein, haben die Gerätehersteller die Möglichkeit, eigene Module auf Basis der kognitiven Architektur zu entwickeln und anzubieten. Für jeden neuen Service müssen die Eigenschaften und Parameter einmalig in der Wissensbasis angegeben werden, um eine reibungslose Integration zu gewährleisten.

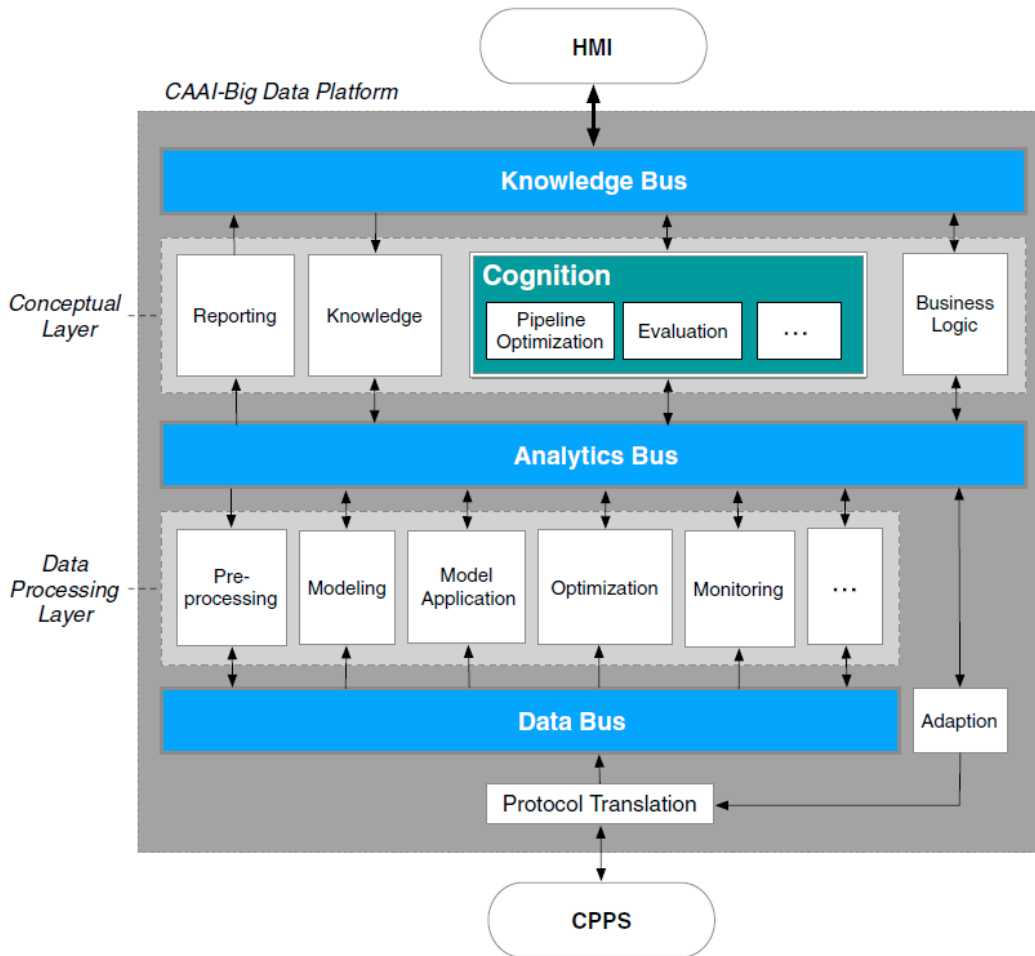


Abbildung 2: Kognitive Referenzarchitektur (CAA)

Für die erste Evaluierung wurde das Versatile Production System (VPS) verwendet. Das VPS ist eine modulare Fertigungsanlage in der SmartFactoryOWL, die verschiedene Produktionsschritte durchläuft, darunter die Anlieferung, den Transport und die Abfüllung des Produktionsmaterials sowie die Herstellung von Verpackungsmaterial aus Mais. Im Anwendungsfall "Online Prozessoptimierung" müssen im Gegensatz zur herkömmlichen Batchverarbeitung die Daten während der Produktion online erfasst und verarbeitet werden.

In diesem Zusammenhang wurde ein Anwendungsfall aus dem Bereich der Prozessoptimierung ausgewählt: die datengetriebene Optimierung der Prozessparameter. Es wurden Daten während der Produktion mit verschiedenen Materialqualitäten und unterschiedlichen Maschineneinstellungen erfasst, um die Evaluierung vorerst offline mit den von uns entwickelten Algorithmen durchzuführen. Hierbei konnten wir die Algorithmen auf der prototypisch implementierten Architektur im BigData Lab des IDE+A testen. Die Ergebnisse dieser Tests dienen als Grundlage für die Dissertation von Andreas Fischbach, die voraussichtlich im Juli 2023 abgeschlossen sein wird.

Die CAAI nutzt Kubernetes für die Orchestrierung von Softwareservices. Vorherige Recherchen haben gezeigt, dass in verschiedenen Projekten gute Erfahrungen damit

gesammelt wurden. Kubernetes ermöglicht ein deklaratives Clustermanagement, bei dem der Benutzer den gewünschten Zustand der Anwendung spezifiziert und der Kubernetes-Controller die erforderlichen Maßnahmen ergreift, um diesen Zustand zu erreichen. Die Anwendung wird aus verschiedenen Bausteinen erstellt, was gut zum modularen Ansatz der CAAI-Architektur passt. Der kleinste Baustein in Kubernetes ist ein Pod, der einen oder mehrere Anwendungscontainer und optional ein Volume für die Datenspeicherung enthält. Der Lebenszyklus dieser Pods wird über ein sogenanntes Deployment gesteuert. Abbildung 3 veranschaulicht den Aufbau dieser Kubernetes-Struktur.

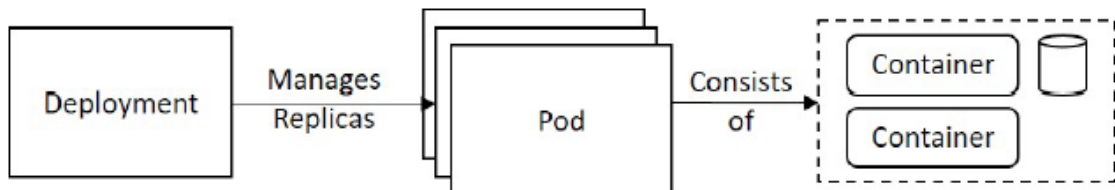


Abbildung 3: Deployment in Kubernetes

Im Rahmen des Arbeitspakets 5 wurde angestrebt, die Ergebnisse des Projekts in die Industrie zu übertragen. Zu Beginn wurden gemeinsam mit den Industriepartnern Anforderungsdefinitionen erstellt und während der Projektlaufzeit regelmäßige Meetings abgehalten, um den Fortschritt zu besprechen. Schließlich wurde vereinbart, dass die Architektur zunächst im Forschungsbereich weiter getestet werden sollte, bevor sie direkt in den produktiven Betrieb integriert wird. Aus diesem Grund wurde im IDE+A eine detaillierte Analyse der bisherigen CAAI-Architektur durchgeführt, begleitet von einem entsprechenden Review. Im inIT wurde ein weiterer Anwendungsfall definiert, um die Architektur weiter zu testen.

Zum Abschluss des Projekts wurde eine wissenschaftliche Untersuchung durchgeführt, in der die Vor- und Nachteile der CAAI-Architektur in KOARCH diskutiert werden. Unter der Federführung der TH Köln ist geplant, dass dieses Paper in naher Zukunft veröffentlicht wird.

## 2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Aufwendungen und der Kostenrahmen wurden größtenteils eingehalten, jedoch gab es Abweichungen innerhalb der einzelnen Positionen. Die größte Differenz wurde in der Position 817 (Beschäftigte E1-E11) festgestellt. Nähere Einzelheiten dazu finden Sie im zahlenmäßigen Nachweis.

## 2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleistete Arbeit im Rahmen des Projekts war von großer Bedeutung, um das Potenzial einer kognitiven Referenzarchitektur für Innovationen nachzuweisen. Angesichts der steigenden Komplexität von Produktionssystemen aufgrund des globalen Wettbewerbs und der zunehmenden Produktkomplexität sowie des wachsenden Anteils der Softwareentwicklung wurde deutlich, dass eine Entlastung von Automatisierern, Systemingenieuren und Anlagenbauern erforderlich ist. Durch den Einsatz von Software-

Services und einen deklarativen Ansatz zur Formulierung von Wissen kann die Belastung erheblich reduziert werden. Die im Rahmen des Projekts entwickelte kognitive Referenzarchitektur (CAAI) bietet all diese Möglichkeiten und ermöglicht es Geräteherstellern, einzelne Software-Services direkt zu nutzen und potenziellen Kunden einen Mehrwert zu bieten.

Die Projektergebnisse konnten nur durch die Zusammenarbeit eines Konsortiums bestehend aus Forschungspartnern und mittelständischen Industriepartnern erzielt werden. Die TH Köln und das IDE+A brachten dabei die Interessen und Kompetenzen im Bereich der Algorithmenentwicklung, Data Science und Optimierungsverfahren ein.

Die vorgelegten Ergebnisse wären ohne die Förderung nicht möglich gewesen. Der Umfang der geleisteten Arbeit wird durch die Präsentationen auf wissenschaftlichen Konferenzen, die laufende Berichterstattung, die Zwischenberichte und die aktive Teilnahme an den Projekttreffen deutlich.

## 2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Punkte des Verwertungsplans behandelt:

1. Im Verlauf des Projekts wurden Anforderungen gemeinsam mit den Industriepartnern erarbeitet und in regelmäßigen Meetings Anwendungsfälle und andere relevante Themen diskutiert. Aktuell gibt es noch keinen direkten industriellen Einsatz der Projektergebnisse, aber dies ist für die Zukunft durchaus möglich. Im Forschungsumfeld haben die Prototypen der Architektur bereits Vorteile gegenüber herkömmlichen Ansätzen gezeigt.
2. Die Projektergebnisse aus dem Bereich Algorithmenentwicklung wurden von Prof. Bartz-Beielstein im Institut IDE+A im Lehr- und Forschungsbetrieb eingesetzt. Zudem wurden an der TH Köln durch das Projekt zwei Bachelorarbeiten, zwei Masterarbeiten, eine bereits abgeschlossene Promotion und eine Promotion, die voraussichtlich im Juli 2023 abgeschlossen wird, ermöglicht.
3. Es ist geplant, die Projektergebnisse in zukünftigen Forschungsprojekten weiterzuverwenden und weiterzuentwickeln.
4. Die Projektergebnisse wurden in renommierten Fachzeitschriften veröffentlicht und auf zahlreichen Konferenzen präsentiert (siehe 2.7 „Erfolge oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse“).

## 2.5 Während des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte anderer Stellen

Es ist keine vergleichbare kognitive Referenzarchitektur bekannt geworden.

## 2.6 Gesamteinschätzung über den Fortgang der FE-Arbeiten des Verbundvorhabens und die Kooperation des Verbundes

Die Zusammenarbeit zwischen den einzelnen Partnern im Projekt war stets sehr gut. Es fanden regelmäßige Gesamttreffen statt, bei denen alle Projektpartner vertreten waren und aktiv an den Diskussionen teilnahmen. Zusätzlich gab es wöchentliche Abstimmungsmeetings zwischen der TH Köln und der TH OWL, in denen detailliert über den jeweiligen Projektstand berichtet wurde. Diese enge Zusammenarbeit und der regelmäßige Austausch ermöglichten es, das aufgebaute Wissen auch während personeller Veränderungen im Projektteam weiterzugeben und auszubauen. Das Team konnte somit von einem reibungslosen Wissenstransfer profitieren. Besonders zwischen den Partnern TH Köln und TH OWL besteht die Absicht, auch in zukünftigen Forschungsprojekten weiterhin zusammenzuarbeiten.

## 2.7 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Die Ergebnisse wurden auf Fachkonferenzen in den Jahren 2018, 2019, 2020 und 2021 präsentiert. Zusätzlich entstanden im Projektzeitraum von Seiten der TH Köln zwei Bachelorarbeiten, zwei Masterarbeiten und eine Dissertation, wobei eine weitere Dissertation im Juli 2023 voraussichtlich abgeschlossen wird.

Tabelle 2: Veröffentlichungen

2019
<p>[Bunt19a] A. Bunte, A. Fischbach, J. Strohschein, T. Bartz-Beielstein, H. Faeskorn-Woyke, and O. Niggemann,  “Evaluation of cognitive architectures for cyberphysical production systems,”  in 2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Sep. 2019, pp. 729–736.</p>
<p>[Stor18c] J. Stork, M. Zaefferer, and T. Bartz-Beielstein,  “Improving neuroevolution efficiency by surrogate model-based optimization with phenotypic distance kernels,”  in Applications of Evolutionary Computation - 22nd International Conference, EvoApplications 2019, Held as Part of EvoStar 2019, Leipzig, Germany, April 24-26, 2019, Proceedings, ser. Lecture Notes in Computer Science, P. Kaufmann and P. A. Castillo, Eds., vol. 11454. Springer, 2019, pp. 504–519.</p>

2020
<p>[fisc20a] A. Fischbach, J. Strohschein, A. Bunte, J. Stork, H. Faeskorn-Woyke, N. Moriz, and T. Bartz-Beielstein,  “CAAI—a cognitive architecture to introduce artificial intelligence in cyber-physical production systems,”  The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 111, no. 1, pp. 609–626, 2020. [Online]. Available: <a href="https://doi.org/10.1007/s00170-020-06094-z">https://doi.org/10.1007/s00170-020-06094-z</a></p>
<p>[Fisc18a] A. Fischbach and T. Bartz-Beielstein,  “Improving the reliability of test functions generators,”  Applied Soft Computing, vol. 92, p. 106315, 2020. [Online]. Available: <a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494620302556">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494620302556</a></p>
<p>[bart20gcos] T. Bartz-Beielstein, C. Doerr, D. van den Berg, J. Bossek, S. Chandrasekaran, T. Eftimov, A. Fischbach, P. Kerschke, W. L. Cava, M. Lopez-Ibanez, K. M. Malan, J. H. Moore, B. Naujoks, P. Orzechowski, V. Volz, M. Wagner, and T. Weise,  “Benchmarking in optimization: Best practice and open issues,”  2020, arXiv e-prints:2007.03488. [Online]. Available: <a href="https://arxiv.org/abs/2007.03488/">https://arxiv.org/abs/2007.03488/</a></p>
<p>[Stroh20aarxiv] J. Strohschein, A. Fischbach, A. Bunte, H. Faeskorn-Woyke, N. Moriz, and T. Bartz-Beielstein,  “Cognitive capabilities for the caai in cyber-physical production systems,”  2020, arXiv e-prints:2012.01823. [Online]. Available: <a href="https://arxiv.org/abs/2012.01823/">https://arxiv.org/abs/2012.01823/</a></p>
<p>[stroh20b] J. Strohschein, A. Lara-Palma, and H. Faeskorn-Woyke,  “Employee technology acceptance on industry 4.0,”  in Paradigm Shifts in ICT Ethics - Proceedings of the ETHICOMP 2020, Sep. 2020.</p>
<p>B. Atay,  “3-D Drucker als Anwendungsbeispiel in der Optimierung,”  Bachelorarbeit TH Köln, 2020.</p>
<p>I. Aboubakar,  “Einsatz künstlicher Intelligenz als Erfolgsfaktor für die Industrie 4.0 in mittelständischen Unternehmen,”  Bachelorarbeit TH Köln, 2020.</p>

<b>2021</b>
[Stroh20a] J. Strohschein, A. Fischbach, A. Bunte, H. Faeskorn-Woyke, N. Moriz, and T. Bartz-Beielstein, “Cognitive capabilities for the CAAI in cyber-physical production systems,” The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021.
[rehb21a] Rehbach, F., Zaefferer, M., Fischbach, A., Rudolph, G., and Bartz-Beielstein, “T. Benchmark-driven configuration of a parallel model-based optimization algorithm,” IEEE Transactions on Evolutionary Computation (2022), 1–1.
S. Kuhl, “Anwendung von Design of Experiments für die Prozessparameteroptimierung von 3D-Druckern,” Masterarbeit TH Köln, 2021.
D. Bamberger, “Analyse und Optimierung der Energieeffizienz beim 3D-Druck,” Masterarbeit TH Köln, 2021.
[Stroh21a] J. Strohschein, “Big Data Reference Architecture for Industry 4.0 - Including Economic and Ethical Implications,” Dissertation Universidad de Burgos, 2021
<b>2023</b>
A. Fischbach, “Automatic Online Algorithm Selection for Optimization in Cyber-Physical Production Systems,” Dissertation Universität Dortmund, 07.2023



## Literaturverzeichnis

[1]	J. Toussaint und K. Cheng, „Design agility and manufacturing responsiveness on the Web,“ in <i>Integr Manuf Syst</i> 13(5):328–339, 2002.
[2]	L. Hu, N. Xie, Z. Kuang und Zhao K, „Review of cyberphysical system architecture,“ in <i>Proceedings - 2012 15th IEEE international symposium on object/component/service-oriented real-time distributed computing workshops, ISORCW 2012</i> , pp 25–30, 2012.
[3]	J. Shi, J. Wan, H. Yan und H. Suo, „A survey of cyber-physical systems,“ in <i>Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), 2011 International Conference on</i> , 2011.
[4]	Y. Tan, S. Goddard und L. C. Perez, „A prototype architecture for cyber-physical systems,“ <i>ACM Sigbed Review</i> , Bd. 5, Nr. 1, p. 26, 2008.
[5]	Y. Tan, M. C. Vuran und S. Goddard, „Spatio-temporal event model for cyber-physical systems,“ in <i>Distributed Computing Systems Workshops, 2009. ICDCS Workshops' 09. 29th IEEE International Conference on</i> , 2009.
[6]	J. Lee, B. Bagheri und H.-A. Kao, „A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems,“ <i>Manufacturing Letters</i> , Bd. 3, pp. 18-23, 2015.
[7]	X. Koutsoukos, N. Kottenstette, J. Hall, P. Antsaklis und J. Sztipanovits, „Passivity-based control design for cyber-physical systems,“ in <i>International Workshop on Cyber-Physical Systems Challenges and Applications</i> , 2008.
[8]	T. L. Crenshaw, E. Gunter, C. L. Robinson, L. Sha und P. Kumar, „The simplex reference model: Limiting fault-propagation due to unreliable components in cyber-physical system architectures,“ in <i>Real-Time Systems Symposium, 2007. RTSS 2007. 28th IEEE International</i> , 2007.
[9]	B. Balaji, A. Faruque, M. Abdullah, N. Dutt, R. Gupta und Y. Agarwal, „Models, abstractions, and architectures: the missing links in cyber-physical systems,“ in <i>Proceedings of the 52nd Annual Design Automation Conference</i> , 2015.

[10]	A. Anis, W. Schäfer und O. Niggemann, „A comparison of modeling approaches for planning in cyber physical production systems,“ in Emerging Technology and Factory Automation (ETFAs), 2014 IEEE, 2014.
[11]	O. Niggemann, G. Biswas, J. S. Kinnebrew, H. Khorasgani, S. Volgmann und A. Bunte, „Data-Driven Monitoring of Cyber-Physical Systems Leveraging on Big Data and the Internet-of-Things for Diagnosis and Control,“ in Proceedings of the 26th International Workshop on Principles of Diagnosis, Paris, France, 2015.
[12]	A. Maier, „Online passive learning of timed automata for cyber-physical production systems,“ in The 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN 2014), 2014.
[13]	J. Manyika, M. Chui, B. Brown, J. Bughin, R. Dobbs, C. Roxburgh und A. H. Byers, „Big data: The next frontier for innovation, competition, and productivity,“ 2011.
[14]	D. Agrawal, S. Das und A. El Abbadi, „Big data and cloud computing: current state and future opportunities,“ in Proceedings of the 14th International Conference on Extending Database Technology, New York, NY, USA, 2011.
[15]	V. Borkar, M. J. Carey und C. Li, „Inside "Big Data management": ogres, onions, or parfaits?,“ in Proceedings of the 15th International Conference on Extending Database Technology, New York, NY, USA, 2012.
[16]	P. Domingos und G. Hulten, „Mining high-speed data streams,“ in Proceedings of the sixth ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining, New York, NY, USA, 2000.
[17]	S. Wu, F. Li, S. Mehrotra und B. C. Ooi, „Query optimization for massively parallel data processing,“ in Proceedings of the 2nd ACM Symposium on Cloud Computing, New York, NY, USA, 2011.
[18]	J.-T. Horng, C.-Y. Kao und B.-J. Liu, „A genetic algorithm for database query optimization,“ in Evolutionary Computation, 1994. IEEE World Congress on Computational Intelligence., Proceedings of the First IEEE Conference on, 1994.

[19]	K. Asghari, A. S. Mamaghani und M. R. Meybodi, „An Evolutionary Algorithm for Query Optimization in Database,“ in Innovative Techniques in Instruction Technology, E-learning, E-assessment, and Education, M. Iskander, Hrsg., Springer Netherlands, 2008, pp. 249-254.
[20]	M. Goncalves, I. Martinez, G. Escuela, F. Bartolo und F. Sarda, „An Evolutionary Algorithm for Skyline Query Optimization,“ in Variants of Evolutionary Algorithms for Real-World Applications, R. Chiong, T. Weise und Z. Michalewicz, Hrsg., Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 413-436.
[21]	G. Holmes, R. Kirkhy und B. Pharringer, „MOA Massive Online Analysis,“ Journal Maschine Learning Resarch , pp. 1601-1604, 11 2010.
[22]	R. Xu und D. Wunsch, Clustering, Wiley-IEEE Press, 2009.
[23]	A. K. Jain, M. N. Murty und P. J. Flynn, „Data clustering: a review,“ ACM Comput. Surv., Bd. 31, Nr. 3, pp. 264-323, #sep# 1999.
[24]	D. Barbarà und P. Chen, „Using the fractal dimension to cluster datasets,“ in Proceedings of the sixth ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining, New York, NY, USA, 2000.
[25]	J. Bacardit und X. Llorà, „Large-scale data mining using genetics-based machine learning,“ Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery, Bd. 3, Nr. 1, pp. 37-61, 2013.
[26]	M. Rebolledo Coy, S. Krey, T. Bartz-Beielstein, O. Flasch und J. Stork, „Modeling and Optimization of a Robust Gas Sensor,“ C1plus TH Köln, Cologne, 2016.
[27]	J. Deuse, O. Erohin und D. Lieber, „Wissensentdeckung in vernetzten, industriellen Datenbeständen,“ in Industrie 4.0. Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern, 2014.
[28]	J. Deuse, M. Wiegand, O. Erohin, D. Lieber und R. Klinkenberg, „Big Data Analytics in Produktion und Instandhaltung,“ in Instandhaltung im Wandel. Herausforderungen und Lösungen im Zeitalter von Industrie 4.0, 2014.

[29]	M. Eickelmann, M. Wiegand, B. Konrad und J. Deuse, „Die Bedeutung von Data Mining im Kontext von Industrie 4.0,“ Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF), Bd. 110, Nr. 11, pp. 738-743, 2015.
[30]	D. Lieber, O. Erohin und J. Deuse, „Wissensentdeckung im industriellen Kontext - Herausforderungen und Anwendungsbeispiele,“ Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF), Bd. 108, Nr. 6, pp. 388-393, 2013.
[31]	M. Stolpe, K. Morik, B. Konrad, D. Lieber und J. Deuse, „Challenges for Data Mining on Sensor Data of Interlinked Processes,“ in Proceedings of the Next Generation Data Mining Summit (NGDM) 2011, 2011.
[32]	A. Fischbach, J. Strohschein, A. Bunte, J. Stork, H. Faeskorn-Woyke, N. Moriz, and T. Bartz-Beielstein, “CAAI—a cognitive architecture to introduce artificial intelligence in cyber-physical production systems,” The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 111, no. 1, pp. 609–626, 2020. [Online]. Available: <a href="https://doi.org/10.1007/s00170-020-06094-z">https://doi.org/10.1007/s00170-020-06094-z</a>
[33]	<a href="https://github.com/janstrohschein/KOARCH/tree/master/Use_Cases/VPS_Popcorn_Production/Docker">https://github.com/janstrohschein/KOARCH/tree/master/Use_Cases/VPS_Popcorn_Production/Docker</a>
[34]	J. Strohschein, A. Fischbach, A. Bunte, H. Faeskorn-Woyke, N. Moriz, and T. Bartz-Beielstein, “Cognitive capabilities for the caai in cyber-physical production systems,” 2020, arXiv e-prints:2012.01823. [Online]. Available: <a href="https://arxiv.org/abs/2012.01823/">https://arxiv.org/abs/2012.01823/</a>
[35]	T. Bartz-Beielstein, C. Doerr, D. van den Berg, J. Bossek, S. Chandrasekaran, T. Eftimov, A. Fischbach, P. Kerschke, W. L. Cava, M. Lopez-Ibanez, K. M. Malan, J. H. Moore, B. Naujoks, P. Orzechowski, V. Volz, M. Wagner, and T. Weise, “Benchmarking in optimization: Best practice and open issues,” 2020, arXiv e-prints:2007.03488. [Online]. Available: <a href="https://arxiv.org/abs/2007.03488/">https://arxiv.org/abs/2007.03488/</a>
[36]	<a href="https://github.com/janstrohschein/KOARCH/tree/master/Use_Cases/VPS_Popcorn_Production/Kubernetes">https://github.com/janstrohschein/KOARCH/tree/master/Use_Cases/VPS_Popcorn_Production/Kubernetes</a>
[37]	A. Bunte, A. Fischbach, J. Strohschein, T. Bartz-Beielstein, H. Faeskorn-Woyke, and O. Niggemann, “Evaluation of cognitive architectures for cyberphysical production systems,” in 2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Sep. 2019, pp. 729–736.

---

## **Hinweise / Notes**

Diese Veröffentlichungen erscheinen im Rahmen der Schriftenreihe "CIplus". Alle Veröffentlichungen dieser Reihe können unter <https://cos.bibl.th-koeln.de/home> abgerufen werden.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Datum der Veröffentlichung: 28.6.2023

## **Herausgeber / Editorship**

Prof. Dr. Thomas Bartz-Beielstein,

Prof. Dr. Wolfgang Konen,

Prof. Dr. Boris Naujoks,

Faculty of Computer Science and Engineering Science,

TH Köln,

Steinmüllerallee 1,

51643 Gummersbach

## **Schriftleitung und Ansprechpartner / Contact editor's office**

Prof. Dr. Thomas Bartz-Beielstein,

Faculty of Computer Science and Engineering Science,

TH Köln,

Steinmüllerallee 1,

51643 Gummersbach

phone: +49 2261 8196 6391

url: <http://www.th-koeln.de/ki>

eMail: [thomas.bartz-beielstein@th-koeln.de](mailto:thomas.bartz-beielstein@th-koeln.de)

ISSN (online) 2194-2870

DOI 10.57684/COS-1143

URN urn:nbn:de:hbz:832-cos4-11434

---

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Die Verantwortung für den Inhalt dieser  
Veröffentlichung liegt beim Autor.

**Technology**  
**Arts Sciences**  
**TH Köln**