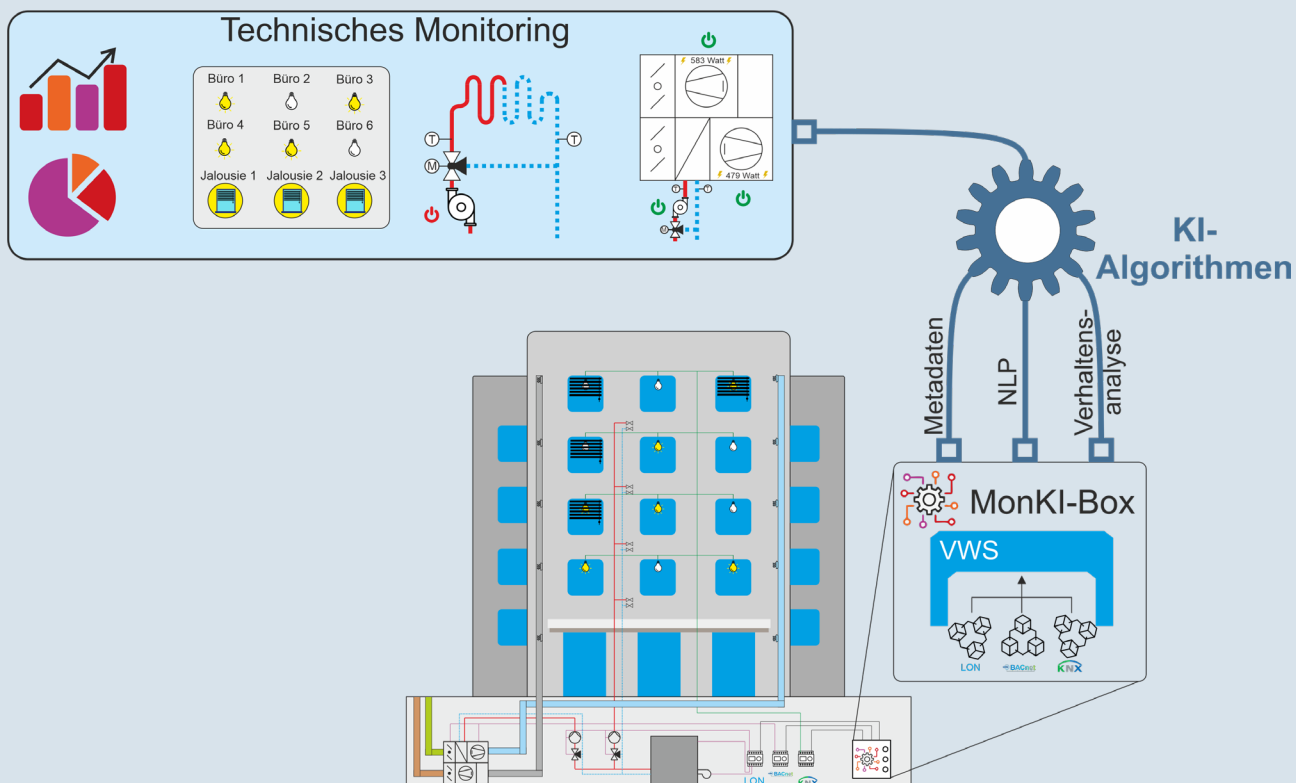




Technisches Monitoring ohne Aufwand

Gewinnung von Strukturinformationen aus semantisch heterogenen Gebäudeautomationsnetzen durch Mustererkennung mittels KI

Prof. Dr. Jochen Müller
Björn Kämper
Jo Beermann
Michael Krüttgen

Methoden der KI machen Gebäudeautomation smart und bezahlbar

Digitale Zwillinge aus Altanlagen – ganz ohne neue Sensorik

Gebäude verursachen einen erheblichen Teil des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen. Technische Monitoring-Systeme (TMon) können durch kontinuierliche Analyse und Bewertung von Betriebsdaten einen energie- und kosteneffizienten Gebäudebetrieb ermöglichen (VDI 6041:2017: 6). Sie identifizieren frühzeitig Fehlfunktionen, zeigen Optimierungspotenziale auf und tragen somit zur Nachhaltigkeit des Gebäudebetriebs bei. Der flächendeckende Einsatz solcher Systeme scheitert jedoch häufig an der Komplexität und den hohen Aufwänden bei der Implementierung (Rohde et al. 2018: 66 ff.). Besonders in Bestandsgebäuden ist die Nachrüstung mit TMon-Anwendungen kostenintensiv, da Daten aus Gebäudeautomationssystemen (GA-Systemen) in verschiedensten Kommunikationsprotokollen und mit uneinheitlichen Datenpunktbezeichnungen vorliegen. Eine einheitliche Strukturierung und Interpretation dieser Daten ist manuell kaum zu bewältigen und erfordert häufig umfangreiches domänenspezifisches Fachwissen.

Daraus ergibt sich eine zentrale Forschungslücke: Es fehlt eine automatisierte, skalierbare Methode zur Interpretation und Strukturierung semantisch heterogener GA-Daten, die ohne zusätzliche Sensorik oder manuelle Konfiguration auskommt. Ziel des Forschungsprojekts war es daher, ein Verfahren zur KI-gestützten Gewinnung von Strukturinformationen aus semantisch heterogenen GA-Netzen zu entwickeln. Die übergeordnete Forschungsfrage lautete: Wie können semantisch uneinheitliche GA-Daten automatisiert auf ein einheitliches Informationsmodell abgebildet werden? Dies soll TMon-Anwendungen ohne manuellen Engineering-Aufwand ermöglichen.

Zur Beantwortung dieser Frage entwarfen die Projektbeteiligten einen mehrstufigen Algorithmus, der auf Methoden des Natural Language Processing (NLP) basiert und Datenpunkte aus verschiedenen GA-Systemen automatisiert analysiert, klassifiziert und einem standardisierten Zielvokabular zuordnet. NLP ist ein Teilbereich der künstlichen Intelligenz, der es Computern ermöglicht, menschliche Sprache zu verarbeiten. Im Anschluss an die Entwicklung des Algorithmus, zeigten Evaluierungen eine Klassifikationsgenauigkeit von über 98 %, was die Praxistauglichkeit und Robustheit des entwickelten Verfahrens unterstreicht.

Durch die Abbildung heterogener Daten auf ein einheitliches Informationsmodell, wurde eine strukturierte Datenbasis geschaffen, die eine weitgehend konfigurationsfreie Implementierung von TMon-Anwendungen erlaubt. Die interoperable Integration der gewonnenen Strukturinformationen und Daten in weiterführende Systeme wird durch die Anwendung der Informationsmodells der Industrie 4.0-Verwaltungsschale (VWS) sichergestellt. Ergänzend entwickelte das Team interoperable Schnittstellen und semantische Mapping-Algorithmen, die den Systemaustausch erleichtern und so eine Grundlage für digitale Zwillinge im Gebäudebetrieb schaffen. Damit wird eine durchgängige Datenverfügbarkeit über den gesamten Lebenszyklus von Gebäuden hinweg ermöglicht.

Die praktische Bedeutung der Ergebnisse liegt in der deutlichen Reduktion des manuellen Engineering-Aufwands bei der Einführung von TMon-Lösungen. Dadurch wird es auch kleinen und mittleren Betreibern ermöglicht, ihre Anlagen effizient zu überwachen und Potenziale zur Effizienzsteigerung zu identifizieren. Maßnahmen zur Betriebsoptimierungen werden einerseits identifizierbar und andererseits in der Durchführung kontrollierbar. Das Verfahren ist sowohl für Neubauten als auch für Bestandsgebäude geeignet und kann individuell an die Bedürfnisse der Betreiber angepasst werden. Die automatisierte Generierung von Dashboards auf einer Cloud-basierten Plattform ermöglicht dabei eine intuitive Nutzbarkeit und unterstützt auch nicht-technische Nutzer bei der Interpretation der Ergebnisse.

Abschließend implementierte und testete das Team die entwickelte Methodik erfolgreich in unterschiedlichen Gebäudetypen wie Schulen und Verwaltungsgebäuden. Das Projekt leistet damit einen bedeutenden Beitrag zur Digitalisierung und Automatisierung im Gebäudemanagement. Darüber hinaus unterstützt es den wirtschaftlichen Betrieb technischer Anlagen und fördert die Erreichung der Klimaziele der Bundesrepublik Deutschland durch einen skalierbaren Einsatz energieeffizienter TMon-Anwendungen.

1.1 Analyse Kommunikationsprotokolle

Im Rahmen des Projekts analysierten die Projektbeteiligten die etablierten Kommunikationsprotokolle BACnet, KNX und Modbus hinsichtlich ihrer Eignung zur automatisierten Strukturerkennung. Ziel war es, das semantische Potenzial der jeweiligen Protokolle für eine KI-gestützte Klassifikation von Datenpunkten zu bewerten.

Das herstellerneutrale Kommunikationsprotokoll BACnet erwies sich dabei als besonders geeignet, da es über eine erkundbare strukturierte Objekt- und Property-Architektur verfügt. Relevante Properties wie ObjectName und Description enthalten typischerweise semantische Informationen (Hansemann/Hübner 2016: 215 ff.). Weitere Properties wie ObjectType und Unit liefern nützliche Metadaten, die durch Machine Learning klassifiziert werden können. BACnet stellt damit eine solide Grundlage für eine automatisierte, strukturierte Datenverarbeitung dar.

Im Gegensatz dazu ist das Kommunikationsprotokoll KNX dezentral organisiert und basiert auf einer projektspezifischen Konfiguration mit Hilfe eines speziell entwickelten Software-Tools (ETS) (Hansemann/Hübner 2016: 74 ff.). Semantische Informationen sind nur in den projektbezogenen ETS-Dateien enthalten und nicht über das Netzwerk direkt abrufbar. Die fehlende Zugänglichkeit und die starke Dezentralität erschweren eine automatisierte Auswertung. Eine Lösung könnte in der maschinellen Auswertung der ETS-Dateien liegen. Zukünftige Arbeiten könnten hier ansetzen.

Das Kommunikationsprotokoll Modbus bietet ebenfalls nur minimale strukturierte Informationen (Modbus Organization 2012: 6). Die Registerstruktur erlaubt keine se-

mantische Interpretation. Externe Herstellerinformationen, häufig nur in PDF-Dokumenten verfügbare, sind für die Interpretation erforderlich. Daher ist eine KI-gestützte Klassifikation mit NLP oder ML direkt aus den Protokolldaten kaum möglich. Eine potenzielle Lösung könnte in der automatisierten Auswertung dieser externen Dokumentationen liegen. Auch dieses Protokoll wurde aus Gründen der fehlenden semantischen Erkundbarkeit nicht weiter betrachtet.

Fazit: Die Ergebnisse der Analyse sind in Tab. 1: Analyse der Kommunikationsprotokolle in der Gebäudeautomation dargestellt. Semantische Informationen, Erkundungsfunktionen und Metadaten sind ausschließlich beim BACnet-Protokoll verfügbar. Für die Ziele dieses Projekts ist BACnet deshalb das einzige Protokoll mit ausreichendem erkundbarem Informationsgehalt zur praktischen Umsetzung der entwickelten Methoden. Das Projektteam bildete KNX und Modbus dennoch zur Vervollständigung auf das Informationsmodell der Verwaltungsschale ab.

Kommunikationsprotokoll

Ein Kommunikationsprotokoll ist eine standardisierte Vereinbarung, die regelt, wie Daten zwischen Geräten eines Netzwerkes übertragen, empfangen und interpretiert werden (DIN EN ISO 16484-2:2004: 70).

Kommunikationsprotokoll	BACnet	KNX	Modbus
Semantische Information	Im Netzwerk verfügbar Object Name Description	Ausschließlich in Projektdatei	Ausschließlich in Dokumentationsunterlagen
Erkundungsfunktion	Netzwerkerkunden vorhanden	Netzwerkerkunden teilweise vorhanden	Netzwerkerkunden nicht vorhanden
Metadaten	Im Netzwerk verfügbar ObjectType Unit	Datentyp nicht erkennbar	Ausschließlich in Dokumentationsunterlagen

Tab. 1: Analyse der Kommunikationsprotokolle in der Gebäudeautomation; Quelle: eigene Darstellung

2.1 Entwurf des KI-Algorithmus zur Abbildung heterogener Semantik

Um semantisch heterogene Datenpunkte aus Gebäudeautomationssystemen automatisiert nutzbar zu machen, wurde ein KI-gestützter Klassifikationsansatz entwickelt. Im Zentrum steht ein NLP-basierter Algorithmus, der unstrukturierte (heterogene) Informationen – typischerweise aus den BACnet-Properties ObjectName und Description – in ein standardisiertes (homogenes) Vokabular überführt. Die semantische Klassifikation funktioniert ähnlich wie ein Übersetzer, der Wörter aus einer Sprache in eine andere überträgt.

Die Klassifikation erfolgt in vier Ebenen (Abbildung 1): (1) Grundfunktion (z. B. „Wärme versorgen“), (2) Unterfunktion (z. B. „Wärme bereitstellen“), (3) Entität/Komponente (z. B. „Kessel“), und (4) konkrete Datenpunktbezeichnung (z. B. „Schaltbefehl Anlage“). Diese strukturierte Einteilung ermöglicht eine konsistente maschinelle Zuordnung unterschiedlich bezeichneter Datenpunkte aus verschiedenen GA-Systemen.

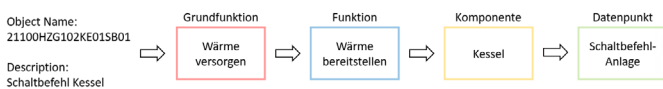


Abb. 1: Beispielhafte Klassifizierung eines Datenpunkts bestehend aus Object Name und Description; Quelle: eigene Darstellung

Die Projektbeteiligten erstellten für das Training der NLP-basierten Klassifikationsmodelle einen umfangreichen Datensatz aus realen Gebäudeautomationssystemen der Städte Köln und Hamburg. Der Fokus lag auf typischen BACnet-Objekttypen wie Analog-Input/Output und Binary-Input/Output. Insgesamt umfasst der Datensatz 54.125 Datenpunkte, die manuell dem vierstufigen Klassifikationsschema zugewiesen wurden (öffentlich verfügbar unter https://huggingface.co/datasets/gart-labor/datapoints_monKI). Tabelle 2 stellt eine Übersicht der erstellten Klassen der Ebenen Grundfunktion, Unterfunktion und Entität/Komponente dar. Beispiele für Grundfunktionen sind „Wärme versorgen“, „Luft versor-

gen“ oder „Kälte versorgen“. Diese untergliedern sich weiter in zum Beispiel „Wärme erzeugen“ oder „Luft verteilen“. Darüber hinaus sind in den Unterfunktionen jeweils spezifische Entitäten wie Kessel, Ventilator oder Pumpe definiert. Abschließend erhielten die Datenpunkte standardisierte Bezeichnungen (Label), um semantische Einheitlichkeit zu gewährleisten. Insgesamt wurden 467 eindeutige Labels definiert (Tabelle 2).

Datenpunkte mit unklaren Beschreibungen wurden der Kategorie „Sonstige“ zugewiesen, um Modellverzerrungen zu vermeiden. Für die spätere Klassifikation mit Hilfe des NLP-Algorithmus wurde zudem sichergestellt, dass für jeden Datenpunkt nur relevante Ziel-Labels zur Auswahl standen. Beispielsweise 43 Datenpunkt-Labels für die Entität „Pumpe“. Diese gezielte Einschränkung erhöht Effizienz und Genauigkeit der KI-Modelle und bildet die Grundlage für eine zuverlässige automatisierte Datenpunktklassifikation.

Ziel war es, eine Klassifikationsgenauigkeit von über 95 % zu erreichen. Konkret bedeutet das, dass im Durchschnitt in 95 von 100 Fällen korrekte Klassifizierungen durch den NLP-Algorithmus vorgenommen werden. Die verwendeten NLP-Modelle GBERT (Chan/Schweter/Möller 2020) und IDiS (Both et al. 2022) erzielten je nach Klasse sogar Klassifikationsgenauigkeiten von über 98 %. Darüber hinaus wurde untersucht wie viele Trainingsbeispiele nötig sind, um eine Klassifikationsgenauigkeiten von 95 % zu erreichen. Abbildung 2 verdeutlicht, dass sich ab etwa 10.000 Trainingsbeispielen das Training verlangsamt und Verbesserungen nur noch geringfügig vorhanden sind. Besonders effizient zeigte sich die Methode bei Datenpunkten mit klarer semantischer Struktur. Für einige Klassen mit geringem Datenaufkommen konnte kein Modell trainiert werden – hier zeigt sich das Potenzial zukünftiger Datenerweiterung.

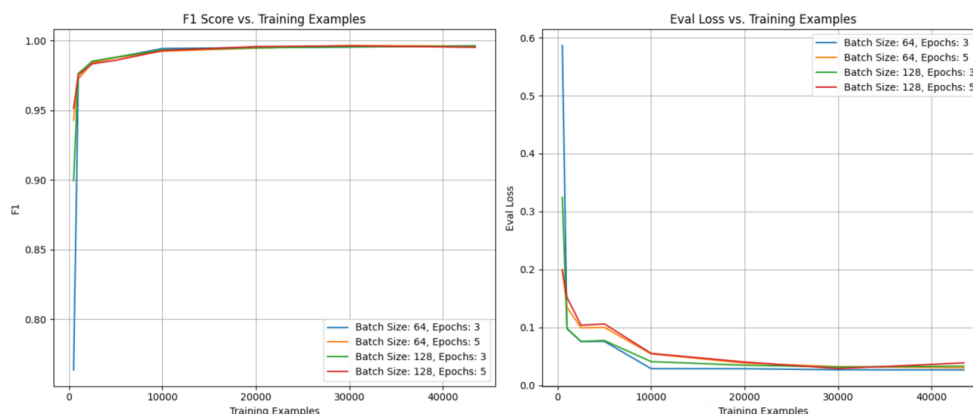


Abb. 2: Entwicklung des F1-Score und Evaluation-Loss in Kombination mit zunehmender Anzahl von Trainingsbeispielen (gBERT Grundfunktionen); Quelle: eigene Darstellung

Grundfunktion	Unterfunktion	Entität/Komponente
Wärme versorgen (22.540)	Wärme erzeugen (2.147)	BHKW (304), Kessel (1.182), Pelletkessel (33), Wärmepumpe (46), Wärmeversorger allgemein (582)
	Wärme verteilen (19.758)	Druckhaltestation (7), Heizkreis allgemein (3.734), Heizkurve (1.818), Kältemengenzähler (6), Pumpe (5.266), Raum (2.672), Regler (1.427), Rücklauf (759), Übertrager (39), Ventil (1.638), Vorlauf (2.003), Wärmemengenzähler (97), Warmwasserbereitung (292)
	Wärme speichern (176)	Speicher (176)
	Wärme beziehen (459)	Fernwärme (459)
Luft versorgen (14.849)	Luft bereitstellen (11.331)	Abluft Allgemein (766), Abluftfilter (105), Abluftklappe (87), Abluftventilator (1.900), Außenluftfilter (116), Außenluftklappe (465), Befeuchter (110), Erhitzer (236), Filter (12), Fortluftklappe (454), Gerät allgemein (1.660), Kältemengenzähler (4), Klappe allgemein (87), Kühler (141), Regler (1.850), Umluft (39), Ventilator (155), Wärmemengenzähler (5), Wärmerückgewinnung (516), Zuluft allgemein (1.185), Zuluftfilter (43), Zuluftklappe (92), Zuluftventilator (1.291)
	Luft verteilen (3.518)	Auslass (49), Raum (1.632), Volumenstromregler Abluft (834), Volumenstromregler Raum (87), Volumenstromregler Zuluft (916)
Medien versorgen (736)	Medien bereitstellen (106)	Bereitstellung allgemein (23), Dosieranlage (14), Entgasung (4), Enthärtung (9), Entsalzung (1), Frischwassermodule (6), Kraftstoffreinigung (5), Nachfüllstation (10), Präsenzmelder (2), Regler (11), Thermische Desinfektion (12), Wasseraufbereitung (9)
	Medien entsorgen (91)	Drainage (2), Fettabscheider (6), Hebeanlage (52), Neutralisation Kondensat (4), Regenwasserpumpe (3), Schmutzwasserpumpe (20), WC Abwasser (4)
	Medien speichern (51)	Speicher (51)
Medien versorgen (736)	Medien verteilen (488)	Druckhaltestation (15), Hygienespülung (257), Kraftstoffpumpe (6), Rohrbegleitheizung (5), Ventil (29), Wasserzähler (18), Zirkulation allgemein (34), Zirkulationspumpe (124)
Kälte versorgen (1.319)	Kälte erzeugen (722)	Kälteanlage (29), Kältekreis allgemein (6), Kältemaschine (284), Kältemengenzähler (19), Klappe (60), Pumpe (56), Regler (41), Rückkühlwerk (87), Rücklauf (18), Ventil (8), Vorlauf (11), Wärmemengenzähler (3)
	Kälte verteilen (582)	Frequenzumrichter (1), Kältekreis allgemein (11), Kältemaschinenanschluss (28), Klappe (229), Pumpe (81), Raum (69), Regler (13), Rücklauf (54), Umluftkühlgerät (3), Ventil (21), Vorlauf (61), Wärmemengenzähler (11)
	Kälte speichern (15)	Eisspeicher (3), Eisspeicheranschluss (6), Kältemengenzähler (6)
Sichern (9.337)	-	-
Transport (15)	-	-
Andere Anlagen (1.798)	-	-

Tab. 2: Übersicht über den erstellten Datensatz mit Namen und Anzahl der Vorkommnisse aus den drei Ebenen: Grundfunktion, Unterfunktion, Entität/Komponente; Quelle: eigene Darstellung

Insgesamt belegt der entwickelte Klassifikationsansatz, dass eine automatisierte semantische Zuordnung technischer Datenpunkte auch bei heterogener Benennung zuverlässig möglich ist. Dies reduziert den manuellen Aufwand erheblich und stellt eine skalierbare Grundlage für datengetriebene sowie automatisierte Monitoring- und Steuerungssysteme in der Gebäudeautomation dar.

1.3 Erstellung digitaler Zwillinge und prototypische Monitoring-Anwendung

Der im Projekt entwickelte NLP-Algorithmus dient dazu, semantisch klassifizierte Datenpunkte als digitale Zwillinge in Form standardisierten Verwaltungsschalen abzubilden. Das Informationsmodell der Verwaltungsschale ist ein standardisiertes, abstraktes Informationsmodell aus dem Kontext Industrie 4.0, das als digitale Repräsentation eines physischen Assets dient (IDTA 2024: 22 f.). Sie ermöglicht es, Informationen strukturiert, maschinenlesbar und interoperabel bereitzustellen – unabhängig von Anwendungsfall oder Branche. In Abbildung 3 ist das Meta-

modell der VWS (engl. AAS, Asset Administration Shell) vereinfacht auszugsweise dargestellt. Die Informationen der VWS werden mit Hilfe von Teilmodellen (engl. Submodel) strukturiert und durch Teilmodellelemente (engl. Submodel Elements) repräsentiert.

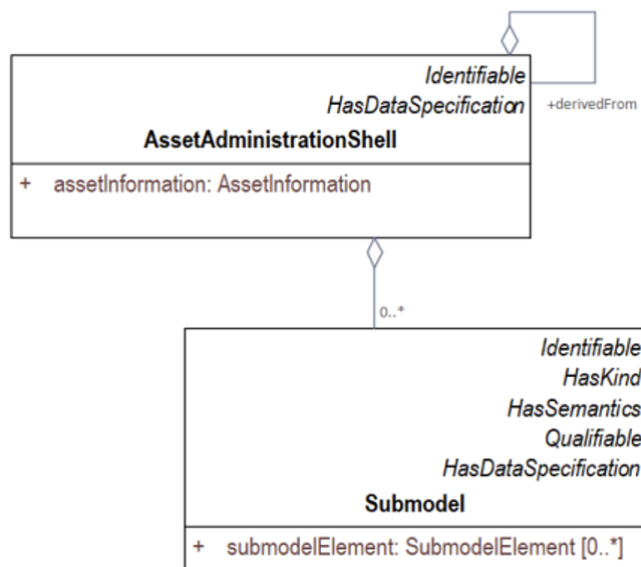


Abb. 3: Metamodell der Verwaltungsschale; Quelle: eigene Darstellung

Basierend auf diesen VWS wurden verschiedene Teilmodelle entwickelt, um Gebäudekomponenten wie Heizkreise oder Lüftungsanlagen zu erfassen. Die Teilmodelle bildeten die Grundlage, um automatisiert nutzerspezifische Dashboards zu erzeugen und technische Betriebszustände zu visualisieren. Diese digitalen Zwillinge dienen als zentrale Grundlage für ein umfassendes TMon.

Das prototypische Monitoring-Konzept basiert auf einer flexiblen Backend-Architektur, die Daten zyklisch über ein Gateway aus BACnet-Netzwerken ausliest, mit Hilfe des NLP-Algorithmus verarbeitet und in VWS überführt (Abbildung 4). Auf diese Weise werden die Datenpunkte semantisch eindeutig beschrieben und für die TMon-Anwendung bereitgestellt.

Verwaltungsschale (VWS)

Ein zentrales Konzept aus der Industrie 4.0. Sie beschreibt ein standardisiertes, digitales Abbild eines physischen Assets (z. B. einer Anlage oder Komponente), das alle relevanten Informationen strukturiert und maschinenlesbar bereitstellt (IDTA 2024: 22 f.)

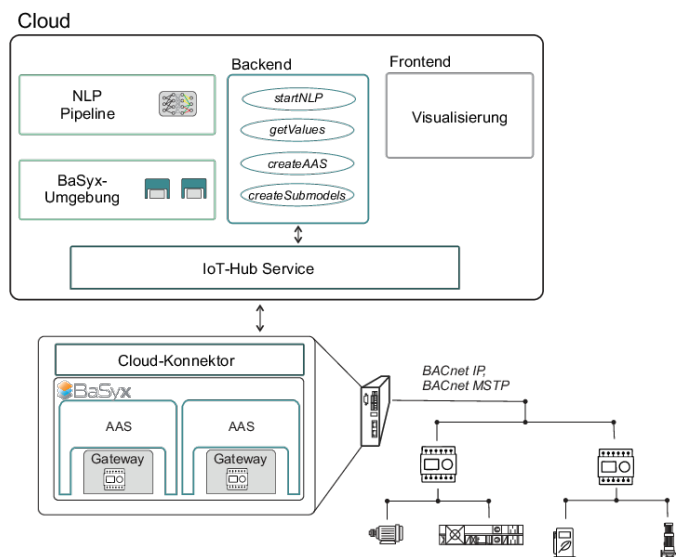


Abb. 4: Softwarearchitektur inklusive Feldimplementierung; Quelle: eigene Darstellung

Darauf aufbauend realisiert ein Monitoring-Frontend die Visualisierung der im Backend klassifizierten Informationen in HTML-basierten Dashboards. In Abbildung 5 ist ein Ausschnitt des Monitoring-Frontend exemplarisch für einen Heizkreis mit den Komponenten Vorlauf, Rücklauf et cetera dargestellt. Zusätzlich sind Funktionen zur Bearbeitung und Korrektur fehlerhaft zugewiesener Datenpunkte integriert. Das System erlaubt eine weitgehend automatisierte, konfigurationsfreie Erstellung von Monitoring-Anwendungen, was besonders für Bestandsgebäude eine große Skalierbarkeit und Wirtschaftlichkeit bietet.

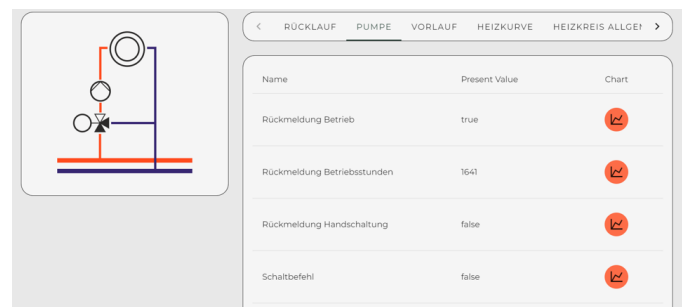


Abb. 5: Visualisierung des Monitorings eines Heizkreises; Quelle: eigene Darstellung

Nutzen für die Praxis

Die digitale Transformation im Gebäudesektor erfordert praxisnahe, skalierbare Lösungen, um technische Systeme effizienter, transparenter und interoperabler zu gestalten. Das vorliegende Projekt zeigt anhand konkreter methodischer Entwicklungen, wie dieser Wandel – insbesondere im Kontext bestehender Gebäudeinfrastrukturen – erfolgreich umgesetzt werden kann. Besonders hervorzuheben ist die Fortführung der entwickelten Konzepte durch die Hochschulausgründung ENTENDIX. Darüber hinaus ist eine dem Peer-Review unterzogene Open-Access-Veröffentlichung der Ergebnisse in der Zeitschrift *Energy and Buildings* entstanden (Both et al. 2023).

2.1 Automatisierte Integration technischer Gebäudeanlagen in Monitoring-Systeme

Das Projekt vereinfacht die Integration technischer Gebäudeanlagen in moderne TMon-Systeme erheblich. Bisher war der Aufbau eines TMon mit hohem zeitlichem und personellem Aufwand verbunden, insbesondere bei der Bestandsaufnahme und Klassifikation vorhandener Datenpunkte aus der Gebäudeautomation. Dieser Prozess erforderte häufig manuelle Arbeitsschritte, technisches Expertenwissen und detaillierte Kenntnisse über die verwendeten Kommunikationsprotokolle, Anlagenkennzeichnungen und Funktionsweisen einzelner Systeme.

Im Rahmen dieses Projekts entwickelten wir eine Methodik, die auf den Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI) und NLP setzt, um diese manuellen Tätigkeiten zu automatisieren. Ein mehrstufiger Klassifikationsalgorithmus bildet das Herzstück. Dieser analysiert unstrukturierte Datenpunkte, vor allem aus BACnet-Netzwerken und ordnet sie automatisch einer standardisierten Zielesemantik zu. Als Eingabe dienen lediglich die textuellen Beschreibungen (ObjectName, Description) aus den Protokollen. Der Algorithmus identifiziert zunächst die funktionale Hauptaufgabe (z. B. Wärmeversorgung), differenziert anschließend in Unterfunktionen (z. B. Wärmeerzeugung), erkennt die verantwortliche Entität (z. B. Kessel) und benennt den konkreten Datenpunkt (z. B. Vorlauftemperatur Istwert) mit einem standardisierten Label.

Das Projektteam trainierte die eingesetzten NLP-Modelle auf Grundlage eines umfangreichen Datensatzes

realer Gebäudeanlagen. Über 54.000 Datenpunkte wurden manuell annotiert, klassifiziert und für das Training von KI-Modellen wie GBERT oder IDiS verwendet. Durch eine geschickte Begrenzung der möglichen Zielkategorien pro Datenpunkt konnte der Rechenaufwand effizient reduziert werden – ohne Einbußen bei der Genauigkeit. Die so erzielte Klassifikationsgenauigkeit beträgt über 95 % und zeigt damit, dass eine verlässliche, automatisierte Strukturierung von Gebäudedatenpunkten technisch möglich ist.

Ein weiterer Vorteil der entwickelten Methodik ist die Möglichkeit zur direkten Weiterverarbeitung der klassifizierten Datenpunkte in digitalen Zwillingen. Diese digitale Repräsentanz technischer Anlagen dient als Grundlage für Visualisierung, Überwachung und Analyse. Der Einsatz digitaler Zwillinge sorgt nicht nur für eine strukturierte Abbildung der Anlagenlandschaft, sondern erleichtert auch die Wartung, Erweiterung und Systemintegration. Der geschaffene homogene Sprachraum ermöglicht die engineeringarme Integration von Gebäude-Applikationen zur Betriebsführung. Monitoring-Anwendungen können so weitgehend konfigurationsfrei erzeugt und betreiber-spezifisch angepasst werden.

Für die Praxis bedeutet dies:

- Die Integration bestehender technischer Systeme wird beschleunigt.
- Der Aufwand für Engineering, Planung und Konfiguration wird reduziert.
- Auch in komplexen, heterogenen GA-Systemen von Bestandsgebäuden können Monitoring-Lösungen wirtschaftlich umgesetzt werden.
- Die Skalierbarkeit steigt – sowohl bei der Anzahl integrierter Gebäude als auch bei der Tiefe der erfassten Informationen.

Besonders hervorzuheben ist, dass die entwickelten Werkzeuge unabhängig von Herstellern oder proprietären Systemen funktionieren. Da sie auf standardisierten Protokollinhalten und offenen Modellen aufsetzen, lassen sie sich flexibel auf verschiedene Anwendungsfälle übertragen. Damit ergeben sich auch für kleine und mittlere Betreiber Möglichkeiten, aufwandsarm in digitale Monitoring-Lösungen zu investieren.

Zusammengefasst bietet die im Projekt entwickelte Methodik eine neue Qualität in der Datenverarbeitung von Systemen der technischen Gebäudeausrüstung. Sie erlaubt erstmals eine automatisierte Klassifikation und Integration von Datenpunkten, die als Basis für verschiedenste Smart-Building- und Energieeffizienzmaßnahmen dient. Die praktische Anwendbarkeit wurde durch das Projektteam in prototypischen Implementierungen erfolgreich demonstriert. Damit ist der Weg frei für die breite Nutzung KI-gestützter Monitoring-Systeme in der Praxis – und für eine signifikante Steigerung der Effizienz, Transparenz und Nachhaltigkeit im Betrieb von Gebäuden.

2.2 Förderung von Standardisierung und Interoperabilität in Bestandsgebäuden

Ein besonders praxisrelevanter Nutzen der im Projekt entwickelten Methodik, liegt in der vereinfachten Umsetzung von Standardisierungen in bestehenden Gebäuden. Gerade Bestandsbauten stellen heute eine der größten Herausforderungen für die digitale Transformation im Gebäudemanagement dar. Ihre technischen Systeme sind oft über viele Jahre gewachsen, herstellerabhängig und basieren auf uneinheitlichen oder veralteten Datenstrukturen. Die Einführung moderner Lösungen wie Energiemanagementsysteme, Smart Building-Plattformen oder automatisierter Monitoring-Werkzeuge scheitert in der Praxis häufig an der fehlenden Standardisierung der Informationshaushalte gebäudetechnischer Systeme.

Das Projekt adressiert dieses Problem durch den Einsatz KI-gestützter Klassifikationsverfahren, die eine automatisierte Harmonisierung der Datenstruktur ermöglichen. Durch die Analyse und semantische Interpretation vorhandener Datenpunkte – insbesondere aus BACnet-basierten Automationssystemen – werden Informationen aus technischen Anlagen in eine einheitliche Semantik überführt. Die erzeugten Klassifizierungs-Begriffe orientieren sich an einem funktionalen Zielvokabular und machen so den Abgleich mit Normen, Richtlinien oder branchenübergreifenden Datenmodellen möglich.

Diese automatisierte Standardisierung eröffnet neue Möglichkeiten im Umgang mit Bestandsgebäuden:

→ Normenkonforme Abbildung ohne Umbau: Auch ältere Anlagen, die ursprünglich nicht für eine strukturierte Datenauswertung konzipiert wurden, können abgebildet und digitalisiert werden – ohne Eingriffe in die Hardware.

- Interoperabilität durch semantische Vereinheitlichung: Unterschiedlich benannte oder strukturierte Datenpunkte verschiedener Hersteller oder Gewerke können auf ein gemeinsames, standardisiertes Vokabular abgebildet werden. So wird die Kommunikation zwischen Systemen erleichtert.
- Vorbereitung für regulatorische Anforderungen: Mit wachsender Bedeutung von EU-Taxonomie oder ESG-Reporting steigt der Bedarf an strukturierten, nachvollziehbaren Betriebsdaten. Die entwickelten Methoden liefern die dafür notwendige semantische Grundlage.
- Nachrüstbarkeit ohne Zusatzsensorik: Da ausschließlich vorhandene Datenpunkte ausgelesen und strukturiert werden, ist keine zusätzliche Sensorik notwendig – ein entscheidender Vorteil für die Wirtschaftlichkeit der Digitalisierung im Bestand.

Im Ergebnis entsteht ein standardisierter digitaler Zwilling, der sich nahtlos in bestehende oder neu aufzubauende Monitoring-, Steuerungs- oder Berichtssysteme integrieren lässt. Dies ist ein zentraler Schritt hin zur flächendeckenden Anwendung von Industrie-4.0-Prinzipien in der Gebäudetechnik und ein wichtiger Beitrag zur Schließung der Digitalisierungslücke im Gebäudebestand.

2.3 Beitrag zur Weiterentwicklung bestehender und neuer Standardisierungsansätze

Die im Projekt entwickelten Methoden leisten nicht nur einen Beitrag zur praktischen Anwendung von KI in der Gebäudeautomation, sondern stärken auch bestehende Standards und neue Standardisierungsinitiativen. Bereits in der Vergangenheit gab es mit Projekten wie BACnet Addenda oder BACtwin (AMEV 2025), Ansätze zur Standardisierung von Betriebsdaten. Auch in anderen Branchen – etwa durch den Einsatz von OPC UA Companion Specifications, in der Industrie – wurden ähnliche Ziele verfolgt. Das Besondere an der hier entwickelten Lösung ist jedoch die automatisierte Überführung bestehender, heterogener Datenpunkte auf ein standardisiertes, homogenes Zielvokabular. Damit wird es möglich, Bestandsgebäude schrittweise auf neue Standards wie BACtwin oder semantisch angereicherte GA-Protokolle abzubilden – ohne aufwendige Neuplanung oder Systemumbauten. So unterstützt das Projekt eine praxisnahe Brücke zwischen Bestandssystemen und zukunftsfähigen, interoperablen Standards.

Methodik und Projektverlauf

3.1 Methodik

Das Forschungsdesign des Projekts zielt auf die Gewinnung von Strukturinformationen aus semantisch heterogenen Gebäudeautomationsnetzen durch den Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI) ab. Fokussiert wurde die Entwicklung eines Verfahrens, das heterogene Kommunikationsprotokolle und unstrukturierte Datenpunkte analysiert, klassifiziert und auf ein einheitliches Informationsmodell abbildet, um automatisierte Monitoring-Lösungen zu ermöglichen.

Drei zentrale Forschungsfragen standen im Fokus:

1. Wie lassen sich etablierte Kommunikationsprotokolle wie BACnet, KNX und Modbus auf das Informationsmodell der VWS abbilden?
2. Wie können semantisch heterogene Datenpunkte automatisiert auf eine standardisierte Zielsemantik abgebildet werden?
3. Wie lassen sich daraus benutzerfreundliche, anpassbare Monitoring-Anwendungen ableiten?

Zur Beantwortung dieser Fragen setzte das Team quantitative und qualitative Methoden ein. Die erste Phase bestand in der Datenakquise und -aufbereitung: Verschiedene Protokolle wurden im Gebäudenetzwerk erkannt, Betriebsdaten gesammelt und zu einem strukturierten Datensatz zusammengeführt – insbesondere unter Verwendung von BACnet-Daten.

Darauf folgten die Entwicklung und Anwendung von KI-Verfahren. Mittels NLP wurden semantisch heterogene Datenpunkte klassifiziert. Dabei kamen moderne Transformer-Architekturen und Sentence Embeddings zum Einsatz, um Datenpunkte auf standardisierte Begriffe zuzuordnen. Plausibilitätsprüfungen stellten die Qualität der Zuordnungen sicher.

In der letzten Phase flossen die Ergebnisse in Monitoring-Dashboards ein. Mithilfe regelbasierter sowie maschineller Lernverfahren konnten anwendungsbezogene Visualisierungen erstellt werden, die sich individuell an Betreiberbedürfnisse anpassen lassen. Das Forschungsdesign ermöglicht somit prototypisch eine konfigurationsfreie, skalierbare Umsetzung von TMon-Anwendungen für unterschiedliche Gebäudetypen und -nutzungen.

3.2 Projektverlauf

Das Forschungsprojekt gliederte sich in vier zentrale Arbeitspakete, die die Beteiligten über einen Zeitraum von zwei Jahren sukzessive umsetzten. Die Arbeiten verfolgten einen systematischen Aufbau von der technischen Grundlage über die Algorithmenentwicklung bis zur praktischen Anwendung.

Arbeitspaket 1 – Abbildung von Kommunikationsprotokollen auf die Verwaltungsschale

Im ersten Schritt wurden etablierte Kommunikationsprotokolle in der Gebäudeautomation – BACnet, KNX und Modbus – hinsichtlich ihrer semantischen Informationsdichte untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass nur BACnet direkt aus dem Netzwerk semantisch verwertbare Metainformationen liefert. KNX und Modbus hingegen enthalten keine ausreichend strukturierten, maschinenlesbaren semantischen Daten. Besonders bei KNX liegt die semantische Struktur ausschließlich in der Projektdatei, nicht im Netzwerk selbst. Dennoch erfolgte die formale Abbildung aller drei Protokolle auf das Informationsmodell der VWS, um eine interoperable homogene Basis zu schaffen. Die prototypische Umsetzung erfolgte exemplarisch für BACnet auf einem Gateway – als Referenzimplementierung für spätere Anwendungen.

Arbeitspaket 2 – Entwicklung des KI-Algorithmus

Ziel dieses Arbeitspakets war es, eine robuste Methodik zur automatisierten semantischen Klassifikation technischer Datenpunkte zu entwickeln. Grundlage hierfür bildete ein Zielvokabular, das sich an der funktionalen Struktur technischer Gebäudeausrüstung (TGA) orientiert. Für das Training der NLP-basierten Klassifikationsmodelle wurde ein umfangreicher Datensatz mit 54.125 gelabelten Datenpunkten aufgebaut. Der entwickelte vierstufige Klassifikationsprozess nutzte Sprachmodelle zur Zuordnung der Daten auf das Zielvokabular. Das Ergebnis: eine Klassifikationsgenauigkeit von 98 %.

Weitere KI-Ansätze, wie die Nutzung von Metadaten zur Erhöhung der Klassifikationsgenauigkeit oder die Analyse zeitlicher Verhaltensmuster aus Zeitreihendaten, wurden im Projektverlauf nicht realisiert. Grund dafür war die bereits mittels NLP erzielte hohe Klassifikationsgenauig-

keit. Dennoch zeigten externe Studien wie (Benfer/Müller 2023), dass beide Ansätze künftig vielversprechend sind und eine Weiterentwicklung der Methode sinnvoll erscheint.

Arbeitspaket 3 – Entwicklung des technischen Monitoring-Konzepts

Auf Basis der semantisch strukturierten Daten entwickelten die Verantwortlichen ein skalierbares TMon für Gebäude. Ziel war es, eine vollständig automatisierte und konfigurationsfreie Erstellung von nutzerspezifischen Dashboards zu ermöglichen. Dazu kamen Regelwerke und maschinelle Lernverfahren zum Einsatz, um die erkannten Datenpunkte in visuelle Anwendungen zu überführen. Die Dashboards lassen sich individuell an Betreiberanforderungen anpassen und ermöglichen eine intuitive Überwachung des Anlagenbetriebs, etwa zur Optimierung der Energieeffizienz oder Wartungszyklen.

Arbeitspaket 4 – Prototypische Implementierung

Im letzten Schritt kam die entwickelte Methodik in der Praxis zum Einsatz. Für verschiedene Gebäudetypen der Projektpartner Stadt Köln und Stadt Hamburg – darunter Verwaltungs- und Bildungseinrichtungen – wurden reale GA-Daten analysiert und über die Dashboards visualisiert. Die prototypische Anwendung zeigte deutlich das Potenzial der entwickelten Lösung für die praktische Nutzung im Gebäudebetrieb – ohne zusätzliche Sensorik und mit minimalem manuellen Konfigurationsaufwand.

Literaturverzeichnis

AMEV – Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen, Geschäftsstelle im Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB), 2025: BACtwin in öffentlichen Gebäuden (BACtwin 2025). Empfehlung Nr. 174. Berlin.

Benfer, R.; Müller J., 2024: Semantic digital twin creation of building systems through time series based metadata inference—A review. *Energy and Buildings* (321): 114637.

Both, M.; Franke, M.; Mummel, J.; Redeker, M.; Bergander, S.; Bülow, G.; Lindenstruth, T., 2022: Piloten 2022 der Initiative - Management Summary. Berlin.

Both, M.; Kämper, B.; Cartus, A.; Beermann, J.; Fessler T.; Müller J.; Diedrich C., 2023: Automated monitoring applications for existing buildings through natural language processing based semantic mapping of operational data and creation of digital twins. *Energy and Buildings* (300): 113635.

Chan, B.; Schweter, S.; Möller, T., 2020: German's Next Language Model. In: International Committee on Computational Linguistics (Hrsg.): *Proceedings of the 28th International Conference on Computational Linguistics*. Barcelona: 6788–6796.

Hansemann, T.; Hübner, C., 2016: Gebäudeautomation Kommunikationssysteme mit EIB/KNX, LON und BACnet. 4. Auflage. München.

IDTA – Industrial Twin Association, 2024: *Asset Administration Shell Specification - Part 1: Metamodel*. Frankfurt am Main.

Modbus Organization, 2012: *Modbus Application Protocol Specification*. Zugriff: <https://modbus.org/specs.php> [abgerufen am 11.07.2024].

Rohde, C.; Plötz, P.; Nabitz, L.; Friedrichsen, N.; Bedoya, I.; Winter, R.; Mayer, C., 2018: Branchen- und unternehmensgrößenbezogene Ermittlung von Klimaschutzpotenzialen (Schwerpunkt KMU) durch verstärkte Umsetzung von Energiemanagementmaßnahmen in der Wirtschaft: Abschlussbericht. Herausgeber: Umweltbundesamt. *Climate Change* 21/2018. Dessau-Roßlau.

Weitere Quellen

DIN EN ISO 16484-5:2004-10, Systeme der Gebäudeautomation - Teil 2: Hardware.

VDI 6041 - Facility-Management. Monitoring von Gebäuden und gebäudetechnischen Anlagen, 2017.

Projektbeteiligte

Technische Hochschule Köln – Labor für Gebäudeautomation

**Technology
Arts Sciences
TH Köln**

Gebäudewirtschaft der Stadt Köln



Impressum

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG



Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung
im Bundesamt für Bauwesen
und Raumordnung



Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-22.26
Projektlaufzeit: 10.22 bis 10.24
Bundesmittel in €: 310.434,48

Zuwendungsempfängende:
Technische Hochschule Köln, Institut für
Technische Gebäudeausrüstung

Über Zukunft Bau

Mit dem Innovationsprogramm Zukunft Bau stärkt das BMWSB gemeinsam mit dem BBSR die Zukunfts- und Innovationsfähigkeit des Bausektors. Die Zukunft Bau Forschungsförderung schafft Vorbilder, die die Machbarkeit von neuen Ideen ausloten und die Baupraxis weiterentwickeln. Gefördert werden Forschungs- und Entwicklungsvorhaben, die einen Gebäudebezug als Schwerpunkt haben und einen substantiellen Beitrag zur Bewältigung aktueller und künftiger Herausforderungen im Baubereich erwarten lassen.

zukunftbau.de

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und
Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und
Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Wissenschaftliche Begleitung

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und
Raumforschung
Referat WB 3 „Forschung und Innovation
im Bauwesen“
Andreas Windisch
andreas.windisch@bbr.bund.de

Autorinnen und Autoren

Prof. Dr. Jochen Müller 
Technische Hochschule Köln
jochen.mueller@th-koeln.de

Björn Kämper
Technische Hochschule Köln

Jo Beermann 
Technische Hochschule Köln

Michael Krüttgen 
Technische Hochschule Köln

Lektorat

Technische Hochschule Köln

Stand
Juli 2025

Grafisches Konzept
www.sans-serif.de

Satz und Barrierefreiheit
www.sans-serif.de
www.satzweiss.com

Bildnachweis

Titelbild: Eigene Darstellung

Vervielfältigung



Dieses Werk ist lizenziert unter der Creative Commons-Lizenz Attribution – Share Alike 4.0 (CC BY-SA 4.0). Diese Lizenz erlaubt unter Voraussetzung der Namensnennung des Urhebers und der Weitergabe unter gleichen Bedingungen die Bearbeitung, Vervielfältigung und Verbreitung des Materials in jedem Format oder Medium für beliebige Zwecke, auch kommerziell. Nähere Informationen zu dieser Lizenz finden sich unter: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de/>.

Die Bedingungen der Creative Commons-Lizenz gelten nur für Originalmaterial. Die Wiederverwendung von Material aus anderen Quellen erfordert ggf. weitere Nutzungsgenehmigungen durch den jeweiligen Rechteinhaber.

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Müller, J.; Kämper, B.; Beermann, J.; Krüttgen, M., 2025: Technisches Monitoring ohne Aufwand: Gewinnung von Strukturinformationen aus semantisch heterogenen Gebäudeautomationsnetzen durch Mustererkennung mittels KI. Herausgeber: BBSR – Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. Zukunft Bau – Forschung KOMPAKT 15/2025. Bonn. <https://doi.org/10.58007/Of6j-n846>



Bonn 2025
ISSN 2944-067X

Dieses Werk ging aus folgendem Forschungsbericht hervor:

Kämper, B.; Beermann, J.; Fessler, T.; Cartus, A.; Both, M.; Krüttgen, M.; Müller, J., 2025: Forschungsbericht MonKI Projekt: Gewinnung von Strukturinformationen aus semantisch heterogenen Gebäudeautomationsnetzen durch Mustererkennung mittels Künstlicher Intelligenz. Köln.

Hier geht es zum kostenfreien Forschungsbericht:



<https://doi.org/10.57683/EPUB-3033>