



Abschlussbericht MonKI Projekt

Gewinnung von Strukturinformationen aus semantisch
heterogenen Gebäudeautomationsnetzen durch
Mustererkennung mittels Künstlicher Intelligenz

Von: Björn Kämper, Jo Beermann, Thomas Fessler, Michael Krüttgen,
Alina Cartus, Dr. Maximilian Both, Prof. Dr. Jochen Müller

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

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen aus Mitteln der Zukunft Bau Forschungsförderung.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-22.26

Projektlaufzeit: 01.10.2022 bis 31.09.2024

Impressum

TH Köln
Gustav-Heinemann-Ufer 54
50968 Köln
www.th-koeln.de

Fakultät für Anlagen-, Energie- und Maschinensysteme
Institut für Technische Gebäudeausrüstung
Cologne Lab for Building Automation and Optimization (COLABO)

Datum der Freigabe: September 2025



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	ii
Abkürzungsverzeichnis	iv
Kurzfassung	1
Abstract	3
1. Einführung	5
1.1. Stand der Forschung	5
1.2. Begründung und Benennung des öffentlichen Interesses	5
2. Problemstellung	6
3. Zielstellung	7
4. Forschungsdesign	8
5. Projektverlauf	10
5.1. Arbeitspaket 1 - Abbildung von Kommunikationsprotokollen der Gebäudeautomation auf das Informationsmodell der Verwaltungsschale	10
5.2. Arbeitspaket 2 - Entwicklung des KI-Algorithmus	10
5.3. Arbeitspaket 3 - Konzeption und Aufbau des Technischen Monitorings	11
6. Ergebnisse	13
6.1. Analyse Kommunikationsprotokolle und Abbildung auf den Standard der Verwaltungsschale	13
6.1.1. Analyse Kommunikationsprotokolle	13
6.1.2. Abbildung auf digitale Zwillinge	20
6.1.3. Prototypische Implementierung in Gateway	24
6.2. Entwurf des KI-Algorithmus zur Abbildung heterogener Semantik	28
6.2.1. Entwurf vierstufiger Klassifizierungsprozess	29
6.2.2. Datensatz zum Training der Modelle	31
6.2.3. Training und Evaluation der Modelle	38
6.2.4. Nutzung von Metadaten	46
6.2.5. Verhaltensanalyse von Zeitreihendaten	46

6.3. Digitale Zwillinge technischer Systeme als Grundlage für ein technisches Monitoring	48
6.3.1. Teilmodell NLP Classification Result	48
6.3.2. Generierung Strukturinformationen.....	51
6.3.3. Teilmodelle Operating Information.....	52
6.3.4. Teilmodelle Technical Monitoring	53
6.3.5. Fazit Bestandsanlagen	54
6.4. Konzeption, Aufbau und prototypische Implementierung eines technischen Monitorings	56
6.4.1. Generierung von Verwaltungsschalen für Automationsstationen	57
6.4.2. Verarbeitung heterogener Datenpunkte.....	58
6.4.3. Technische Monitoring Anwendung.....	60
6.4.4. Backend-Struktur und Instanz-AAS	67
6.4.5. Prototypische Implementierung	69
7. Zusammenfassung.....	70
Literaturverzeichnis	73
Anhang.....	77
1. AAS Typen und zugeordnete Teilmodelle.....	77
2. Vollständige Übersicht der Datenpunkte mit Zuordnungen der Entitäten.....	83
3. F1-Scores und Evaluation-Loss der NLP-Modelle IDiS und gBERT	90
4. Konfusionsmatrizen der NLP-Modelle IDiS und gBERT	102
5. Betreiberfragebogen	109

Abkürzungsverzeichnis

AAS: Asset Administration Shell

AID: Asset Interfaces Description

AIMC: Asset Interface Mapping Configuration

AKZ: Anlagenkennzeichnungsschlüssel

GA: Gebäudeautomation

IDTA: Industrial Digital Twin Association

I4.0: Industrie 4.0

KI: Künstliche Intelligenz

NLI: Natural Language Inference

NLP: Natural Language Processing

SDKs: Software Development Kits

SMC: SubmodelElementCollection

TGA: Technische Gebäudeausrüstung

TMon: Technisches Monitoring

Kurzfassung

Das Forschungsprojekt "Gewinnung von Strukturinformationen aus semantisch heterogenen Gebäudeautomationsnetzen durch Mustererkennung mittels Künstlicher Intelligenz" zielte darauf ab, die Integration und Nutzung von Daten aus Gebäudeautomationssystemen zu optimieren. Die Herausforderung bestand darin, semantisch heterogene Datenpunkte, die in verschiedenen Kommunikationsprotokollen (z. B. BACnet, KNX, Modbus) verfügbar sind, effizient zu analysieren und auf ein einheitliches Informationsmodell abzubilden.

Durch den Einsatz von KI-Methoden, insbesondere Natural Language Processing (NLP), konnten diese heterogenen Datenpunkte automatisiert analysiert, klassifiziert und strukturiert werden. Ein besonderer Fokus lag auf der Entwicklung eines vierstufigen Klassifikationsprozesses, der die Zuordnung von Datenpunkten zu funktionalen Kategorien ermöglicht und diese auf ein standardisiertes Vokabular abbildet (Homogenisierung). Dies reduzierte die Notwendigkeit manueller Konfigurationsarbeiten erheblich und ermöglichte eine schnellere Implementierung von Monitoring-Anwendungen.

Die entwickelte Methodik erreichte eine Klassifikationsgenauigkeit von über 98 %, was die Effektivität der angewandten Verfahren zur Datenverarbeitung und Strukturierung unterstreicht. Im Ergebnis werden digitale Zwillinge auf Basis der erkundeten Datenpunkte generiert. Ohne zusätzliche Sensorik oder Aktorik stehen die Betriebsinformationen eines jeden Assets homogenisiert zur Verfügung. Solche digitalen Zwillinge dienen als Grundlage für die automatisierte Erkennung von Optimierungspotenzialen und die Überwachung des Betriebszustands.

Ein weiterer Beitrag des Projekts ist die Entwicklung von interoperablen Schnittstellen und semantischen Mapping-Algorithmen, die den Austausch von Informationen zwischen unterschiedlichen Systemen erleichtern. Damit wird die Grundlage für die Umsetzung von Industrie-4.0-Prinzipien im Gebäudemanagement geschaffen.

Zusammenfassend leistet das Projekt einen wesentlichen Beitrag zur Digitalisierung und Automatisierung im Gebäudemanagement. Es unterstützt die Reduktion des Energieverbrauchs und trägt zur Erreichung der nationalen Klimaziele bei. Durch die Re-

duzierung des Engineering-Aufwands für die Nachrüstung von Monitoring-Anwendungen und die damit verbundene verbesserte Skalierbarkeit, eröffnet es neue Möglichkeiten für den wirtschaftlichen und ressourcenschonenden Betrieb von Gebäuden.

Die Ergebnisse des Forschungsprojekts wurden zusätzlich zu diesem Bericht als peer-reviewed und open-access Artikel in der Zeitschrift *Energy & Buildings* veröffentlicht [1]. Darüber hinaus ist als Fortführung der entwickelten Konzepte die Hochschulausgründung *ENTENDIX* entstanden. Im Rahmen des Projekts wurde somit ein wesentlicher Beitrag zum Wissenstransfer zwischen Forschung und Praxis geleistet und eine nachhaltige Nutzung und Verwertung der Ergebnisse wurde sichergestellt.

Abstract

The research project “Obtaining structural information from semantically heterogeneous building automation networks through pattern recognition using artificial intelligence” aimed to optimize the integration and use of data from building automation systems. The challenge was to efficiently analyze semantically heterogeneous data points stored in different communication protocols (e.g. BACnet, KNX, Modbus) and map them to a uniform information model.

By using AI methods, in particular Natural Language Processing (NLP), these heterogeneous data points could be automatically analyzed, classified and structured. A particular focus was on the development of a four-stage classification process that enables the assignment of data points to functional categories and maps them to a standardized vocabulary (Homogenization). This significantly reduced the need for manual configuration work and enabled monitoring applications to be implemented more quickly.

The developed methodology achieved a classification accuracy of over 98%, underscoring the effectiveness of the applied data processing and structuring methods. As a result, digital twins are generated based on the explored data points. Without additional sensors or actuators, the operating information of each asset is available in a homogenized form. Such digital twins serve as the basis for the automated detection of optimization potential and the monitoring of operating status.

Another contribution of the project is the development of interoperable interfaces and semantic mapping algorithms that facilitate the exchange of information between different systems. This creates the basis for the implementation of Industry 4.0 principles in building management.

In summary, the project makes a significant contribution to digitalization and automation in building management. It supports the reduction of energy consumption and contributes to the achievement of national climate targets. By minimizing the engineering effort required to retrofit monitoring applications and the associated improved scalability, it opens up new possibilities for the economical and resource-saving operation of buildings.

In addition to this report, the results of the research project were published as a peer-reviewed and open-access article in the journal *Energy & Buildings* [1]. Furthermore,

the university spin-off *ENTENDIX* was established as a continuation of the concepts developed. The project thus made a significant contribution to the transfer of knowledge between research and practice and ensured the sustainable use and exploitation of the results.

1. Einführung

Die Einführung gliedert sich in die Darstellung des Stands der Forschung und die Benennung des öffentlichen Interesses.

1.1. Stand der Forschung

In Gebäuden dient ein Technisches Monitoring (TMon) dazu, den Betreibern Informationen über den Anlagenbetrieb der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) zur Verfügung zu stellen. Das verantwortliche Personal kann mit Hilfe eines TMon Verbesserungspotenziale im Anlagenbetrieb erkennen und daraus Handlungsempfehlungen ableiten [2].

Die VDI-Richtlinie 6041 [2] beschreibt, die Anforderungen zur Durchführung eines Technischen Monitorings und geht besonders auf die Prozessdarstellung der Lebenszyklusphasen ein. Danach wird während des Planungsprozesses festgelegt, welches Ziel (bspw. Wirtschaftlichkeit im Betrieb oder Optimierung des Anlagenbetriebs) erfüllt werden soll. Für die wirtschaftliche Umsetzung eines TMon sind bestimmte Technologien, bspw. ein Gebäudeautomationsnetzwerk basierend auf standardisierten Kommunikationsprotokollen, zu verbauen.

Betriebsinformationen, die in TMon-Anwendungen visualisiert werden, stammen aus der Gebäudeautomation (GA), in der die Informationen der Anlagentechnik auf die Datenpunkte der Kommunikationsprotokolle abgebildet sind [3]. In den etablierten Kommunikationsprotokollen der Gebäudeautomation (bspw. BACnet, KNX, LON) ist es für einzelne Datenpunkte nicht möglich, Informationen über die Anlagenstruktur zu hinterlegen. Dies bedeutet beispielsweise, dass einem Datenpunkt, der eine Temperatur beschreibt, keine strukturelle Information darüber zugeordnet wird, ob die Temperatur in einem Heizkreis oder in einem Warmwasserspeicher gemessen wird. Informationen über den Anlagentyp oder den Messort einer Information werden innerhalb des Datenpunkts in Form von textuellen, für den Menschen zu verstehenden Beschreibungen festgehalten. Erst seit 2018 gibt es Bestrebungen, die etablierten Protokolle der TGA durch das Hinzufügen von Strukturinformationen informativ wertvoller zu gestalten [4].

1.2. Begründung und Benennung des öffentlichen Interesses

Der Gebäudesektor ist für rund ein Drittel des gesamten Energieverbrauchs Deutschlands verantwortlich [5]. Da ein Großteil der Energieerzeugung in Gebäuden auf fossilen Energieträgern basiert [6], werden rund 14% aller Treibhausgasemissionen durch

den Gebäudesektor verursacht [7]. Die in Gebäuden verursachten Emissionen müssen bis 2030 um über 40% reduziert werden [8]. Langfristiges Ziel der Bundesregierung ist ein nahezu klimaneutraler Gebäudebestand im Jahr 2050 [9]. Diese Ziele sollen durch eine Steigerung der Energieeffizienz und den Einsatz erneuerbarer Energien erreicht werden [10]. Neben höheren Standards und neuen Technologien in Neubauten, ist wegen der langen Lebensdauer von Gebäuden auch die Optimierung des Bestands entscheidend [11]. Eigentümer von Liegenschaften sollen in die Lage versetzt werden, technisch und wirtschaftlich optimale Lösungen zur Sanierung von Gebäuden zu ermitteln [7]. Auf der Basis eines TMon können Bauherrn und Immobilienbetreiber gezielte Maßnahmen zur Effizienz- und Behaglichkeitssteigerung ergreifen, um dadurch Energie einzusparen und die Wirtschaftlichkeit ihrer Anlagen zu steigern.

Zur Steigerung der Energieeffizienz in Gebäuden bedarf es einem breiten Einsatz von TMon-Anwendungen in Neubau- und Bestandsgebäuden. Besonders in großen Liegenschaften mit komplexen Energieerzeugungs- und Energieverteilungssystemen, liegen große Potenziale eines energieeffizienten und wirtschaftlichen Betriebs in TMon-Anwendungen [12]. Dies betrifft häufig Nichtwohngebäude, die wegen der durchschnittlich größeren Fläche und des größeren Bedarfs an Beleuchtung und Klimakälte rund ein Drittel der gesamten Gebäudeenergie verbrauchen [13]. In Bezug auf die Richtlinien der Zukunft Bau Forschungsförderung forcierte dieses Projekt u. a. Innovationen im Bereich der Energieeffizienz und in der Senkung von Lebenszykluskosten.

2. Problemstellung

Ein wirtschaftlich und energetisch optimierter Gebäudebetrieb basiert auf einer hochautomatisierten und effizienten Funktionsweise der TGA [11]. Wie in Kapitel 1 beschrieben, bieten TMon-Anwendungen eine Möglichkeit, Verbesserungspotenziale im Betrieb von Anlagen der TGA zu identifizieren und eine effiziente Funktionsweise zu realisieren [2]. Des Weiteren stammen die Betriebsinformationen, die in TMon-Anwendungen visualisiert werden, von Datenpunkten aus GA-Netzwerken. Strukturinformationen, wie Anlagentyp oder Messort, werden durch textuelle Beschreibungen innerhalb des Datenpunkts in heterogener Form festgehalten [3]. Aufgrund dieser Heterogenität ist mit den bestehenden technischen Möglichkeiten die automatisierte bzw. regelbasierte Erstellung von TMon-Anwendungen nicht möglich [11]. Stattdessen werden nutzerbezogene Dashboards in TMon-Plattformen dadurch erstellt, dass die Datenpunkte manuell den abzubildenden Anlagenkomponenten zugeordnet werden (Abbildung 1).

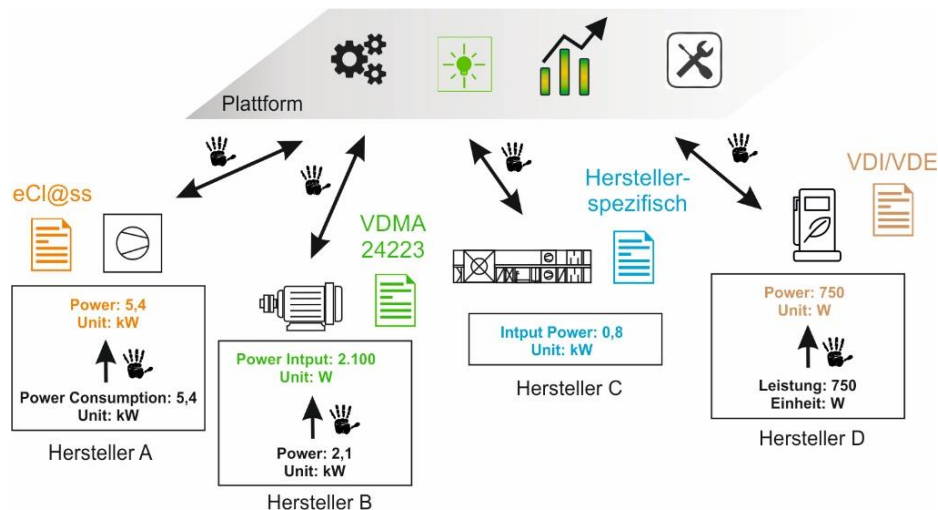


Abbildung 1: Manuelle Zuordnung von Datenpunkten in Monitoring-Anwendungen

Aufgrund der Heterogenität in den Informationen der GA-Netzwerke und dem damit verbundenen manuellen Aufwand für das Engineering, ist die Einrichtung eines TMon unter Verwendung bestehender technischer Möglichkeiten häufig unwirtschaftlich. Dies verhindert den breiten Einsatz von TMon-Anwendungen und steht damit einem energetisch optimierten Gebäudebetrieb entgegen [11]. Daher besteht der Bedarf für einfach zu implementierende TMon-Anwendungen in Neubau- und Bestandsgebäuden.

3. Zielstellung

Übergeordnetes Ziel des Projekts ist die Entwicklung einer Methode, um Gebäude mit vorhandenen GA-Netzwerken automatisiert in eine TMon-Plattform integrieren zu können. Zur Sicherstellung einer breiten Anwendbarkeit, soll der Implementierungsaufwand sowie das Datenengineering zur TMon-Integration minimiert werden. Im Vordergrund steht die Entwicklung eines Algorithmus, der unstrukturierte und semantisch heterogene Betriebsdaten den jeweiligen Anlagenkomponenten und Betriebszuständen zuordnet. Die auf diese Weise aus den GA-Netzwerken generierten Strukturinformationen bilden die Basis für die Erstellung automatisierter TMon-Anwendungen. Damit der Algorithmus bei der Generierung eine möglichst hohe Genauigkeit erreicht, werden die Daten in verschiedenen Zwischenschritten aufbereitet.

Basierend auf der installierten und identifizierten Anlagentechnik des jeweiligen Gebäudes werden in einer TMon-Plattform automatisiert anwendungsbezogene Dashboards erstellt. Diese Dashboards ermöglichen Betreibern einen einfachen Überblick der Anlagenstruktur inkl. der Betriebszustände. Mit dem Einblick in das Verhalten der

technischen Anlagen, können Optimierungspotenziale erkannt und gezielt als Maßnahmen umgesetzt werden.

4. Forschungsdesign

Das Forschungsdesign dieses Projekts ist auf die Gewinnung von Strukturinformationen aus semantisch heterogenen GA-Systeme (d. h. unterschiedliche Kommunikationsprotokolle) durch Mustererkennung mittels Künstlicher Intelligenz (KI) ausgerichtet. Abbildung 2 gibt eine Übersicht des entwickelten Forschungsdesigns. In einem ersten Schritt wird das GA-Netzwerk eines Gebäudes mittels eines Gateways („MonKI Box“) erkundet. Die dabei identifizierten heterogenen Datenpunkte werden anschließend auf ein einheitliches Informationsmodell abgebildet. Als Informationsmodell wird die Industrie 4.0 Verwaltungsschale (VWS) als standardisierter digitaler Zwilling verwendet. Die Verwaltungsschale stellt die heterogenen Datenpunkte der GA-Netze zur weiteren Verarbeitung durch KI-Algorithmen zur Verfügung. Basierend darauf werden die heterogenen Datenpunkte mit Hilfe eines KI-Algorithmus klassifiziert und auf ein homogenes Zielvokabular abgebildet. Die dabei identifizierten Strukturinformationen werden anschließend für die Erstellung von nutzerspezifischen TMon-Anwendungen verwendet. Die Visualisierung des TMon wird auf einer Cloud-Plattform umgesetzt.

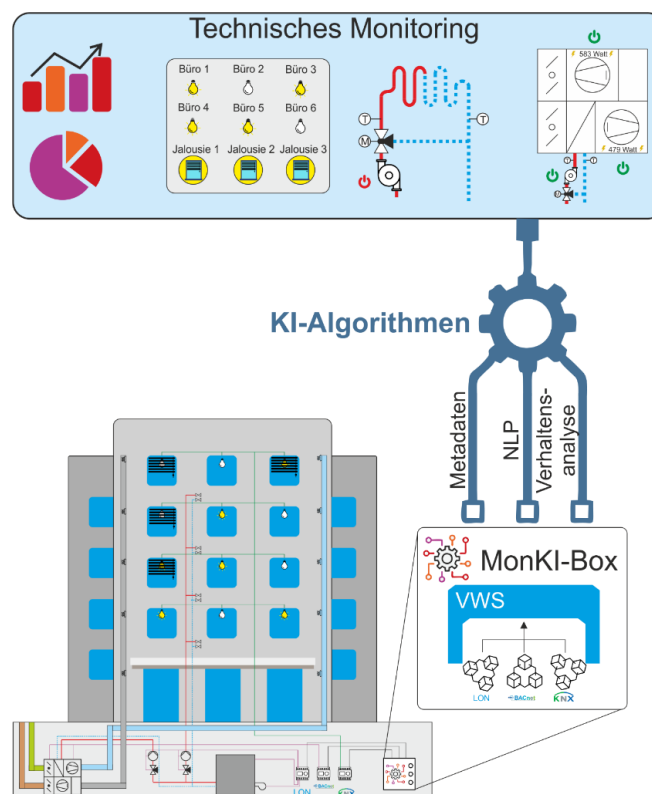


Abbildung 2: Übersicht Forschungsdesign

Der KI-Algorithmus verarbeitet die Datenpunkte in einer dreistufigen Pipeline (Abbildung 3). Im ersten Schritt werden Metadaten wie Datentyp oder Einheit verwendet, um die möglichen Klassifikationslabels einzugrenzen. Anschließend folgt im zweiten Schritt das zentrale Modul der Pipeline: die Mustererkennung mittels KI-Methoden aus dem Bereich Natural Language Processing (NLP). NLP ist ein Teilbereich der KI, der es Maschinen ermöglicht natürliche Sprache zu verarbeiten. In diesem Schritt werden Sprachmodelle entwickelt und trainiert, die basierend auf der semantischen Beschreibung der Datenpunkte eine Klassifikation hinsichtlich Bedeutung und Strukturinformation durchführen. Beispielsweise würden einem Datenpunkt mit der semantischen Beschreibung „MW VL-Temperatur“ die Bedeutung „Messwert Vorlauftemperatur“ und die strukturelle Zuordnung zu den Komponenten „Wärmeversorgungsanlage“ und „Vorlauf“ zugeordnet werden. In Schritt drei wird die NLP-basierte Klassifikation mit Hilfe einer Verhaltensanalyse von Zeitreihendaten verfeinert. Gibt es bspw. zwei analoge Datenpunkte, die als present value 55°C und 45°C haben und diese Werte einen typischen Verlauf aufweisen, kann es sich hierbei um die Vor- und Rücklauftemperatur eines Heizkreises handeln.

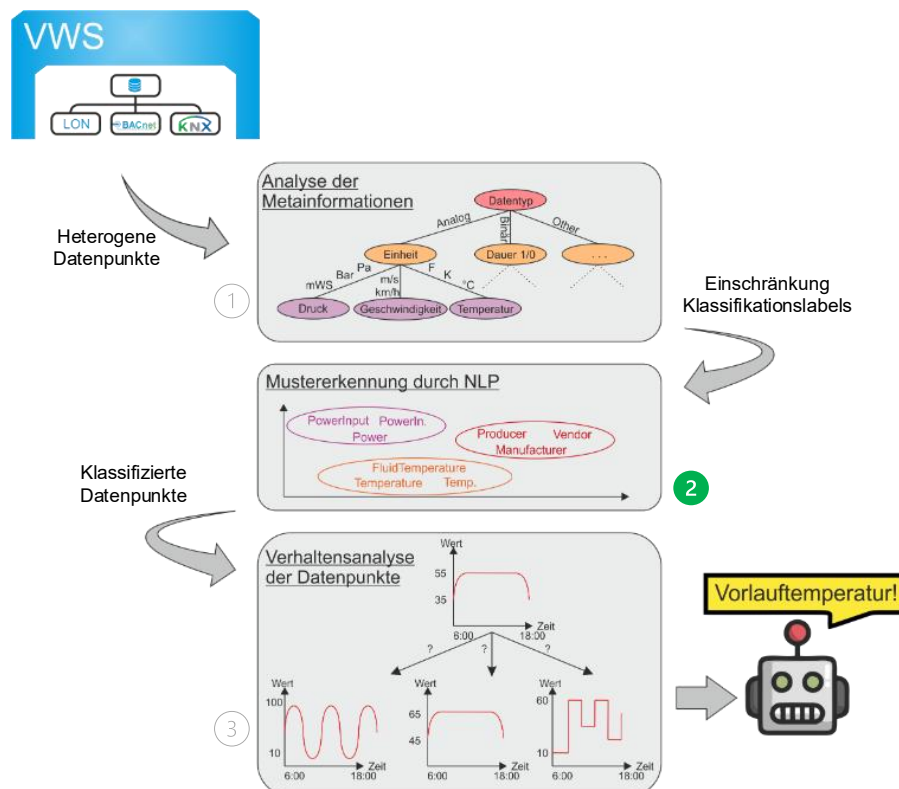


Abbildung 3: KI-Pipeline zur Klassifikation heterogener Datenpunkte

5. Projektverlauf

In diesem Kapitel wird auf die im Antrag formulierten Arbeitspakete eingegangen und eventuelle Abweichungen werden beschrieben. Die detaillierten Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete sind im nachfolgenden Kapitel 6 beschrieben.

5.1. Arbeitspaket 1 - Abbildung von Kommunikationsprotokollen der Gebäudeautomation auf das Informationsmodell der Verwaltungsschale

1. Analyse der Kommunikationsprotokolle

Untersuchung der etablierten GA-Kommunikationsprotokolle BACnet, KNX und Modbus hinsichtlich Möglichkeiten zur automatischen Erkundung und dem Vorhandensein von semantischen sowie strukturellen Informationen zur TGA.

2. Abbildung auf das Informationsmodell der Verwaltungsschale

Abbildung der GA-Kommunikationsprotokolle BACnet, KNX und Modbus auf das einheitliche Informationsmodell der Industrie 4.0 Verwaltungsschale.

3. Prototypische Implementierung in einem Gateway

Implementierung eines Gateways, das die Erkundung von GA-Netzwerken durchführt, semantische Informationen sammelt und auf das Informationsmodell der Verwaltungsschale abbildet. Aufgrund der informationsseitigen Limitierungen von Modbus und KNX (siehe Kapitel 6.1) wurde im Rahmen dieses Forschungsprojekts ausschließlich das Kommunikationsprotokoll BACnet auf einem Gateway implementiert.

5.2. Arbeitspaket 2 - Entwicklung des KI-Algorithmus

1. Aufbau Zielvokabular

Entwicklung einer Zielsemantik, die funktionale und strukturelle Zusammenhänge von Anlageninformationen einheitlich und semantisch eindeutig beschreibt. Mit Hilfe der Zielsemantik werden die heterogenen Datenpunkte der GA-Netzwerke homogenisiert dargestellt.

2. Erstellung Fragebogen

Erstellung eines Betreiberfragebogens, der Informationen zu vorhandener Anlagentechnik abfragt. Die Fragen an die Betreiber gebäudetechnischer Anlagen dienen der Verbesserung der Abbildungsgenauigkeit heterogener Datenpunkte durch Eingrenzung der Zielsemantik. Aufgrund der ausreichend hohen Abbildungsgenauigkeit mit den entwickelten KI-Methoden, wurde eine Einschränkung der Zielsemantik mittels

Fragebogen nicht weiterverfolgt. Eine beispielhafte Ausarbeitung des Betreiberfragebogen findet sich im Anhang.

3. KI-Part zu Metadaten

Nutzung von Metadaten zur Unterstützung der KI-basierten Abbildung heterogener Datenpunkte. Aufgrund der ausreichend hohen Abbildungsgenauigkeit der Sprachmodelle wurde die Nutzung von Metadaten nicht weiterverfolgt.

4. KI-Part Semantic Matching

Erstellung von Sprachmodellen aus dem Bereich NLP zur Abbildung der heterogenen Datenpunkte auf die Zielsemantik mittels Semantic Matching.

5. KI-Part Verhalten

Nutzung von Zeitreihendaten zur automatisierten Klassifikation von Datenpunkten in gebäudetechnischen Systemen. Aufgrund der ausreichend hohen Abbildungsgenauigkeit der Sprachmodelle wurde die Nutzung von Zeitreihendaten im vorliegenden Projekt nicht weiterverfolgt.

6. Kombination der drei KI-Parts

Entwicklung einer KI-Pipeline bestehend aus (1) der Klassifikation auf Basis von Metadaten, (2) einem NLP-basierten Semantic-Matching-Modul zur Zuordnung semantisch heterogener Datenpunkte, sowie (3) der Analyse von Zeitreihendaten. Wie in den vorherigen Abschnitten dargelegt, wurden zwei der drei geplanten Komponenten – die Nutzung von Metadaten und die Auswertung von Zeitreihen – im Projektverlauf nicht umgesetzt. Trotz des reduzierten Umfangs in Bezug auf die initial geplante Architektur konnte das übergeordnete Ziel des Forschungsprojekts erreicht werden: die automatisierte Identifikation von Strukturinformationen aus GA-Netzwerken. Die Ergebnisse belegen, dass ein semantisches Matching bereits ohne vorgelagerte Metadaten- oder Zeitreihenanalyse hinreichend belastbare Ergebnisse liefert (siehe Kapitel 6.2).

5.3. Arbeitspaket 3 - Konzeption und Aufbau des Technischen Monitorings

1. Erstellung des Technischen Monitoring Konzepts

Entwicklung des TMon-Konzepts auf der Basis der mittels KI-Pipeline identifizierten Strukturinformationen. Konkret wird das Informationsmodell der Industrie 4.0-Verwaltungsschale als digitaler Zwilling genutzt.

2. Implementierung des Konzepts in Dashboards

Regelbasierte Erstellung von Dashboards mit HTML, CSS und JavaScript zur Visualisierung des TMon.

3. Implementierung der Anwendung in ausgewählten Gebäuden

Netzwerkseitige Implementierung im Automatisierungsnetzwerk der TH Köln im Labor für GA. Die dort vorhandenen BACnet-Anlagen repräsentieren klassische Heizungs- sowie Lüftungsanlagen der TGA.

4. Testen und Optimieren der Anwendung

Evaluierung der Anwendung anhand von heterogenen Datenpunkten aus öffentlichen Gebäuden der Projektpartner Stadt Köln und Stadt Hamburg.

6. Ergebnisse

Angelehnt an die in Kapitel 5 dargestellten Arbeitspakete gliedert sich die nachfolgende Darstellung der Ergebnisse in die Abbildung der Kommunikationsprotokolle, den Entwurf des KI-Algorithmus, die Erstellung digitaler Zwillinge und die prototypische Implementierung des Technischen Monitoring. Die Ergebnisse wurden zusätzlich zu diesem Bericht als peer-reviewed und open-access Artikel in der Zeitschrift *Energy & Buildings* veröffentlicht [1].

6.1. Analyse Kommunikationsprotokolle und Abbildung auf den Standard der Verwaltungsschale

Das Kapitel 6.1 ist in die Arbeitspakete Analyse Kommunikationsprotokolle, Abbildung auf digitale Zwillinge und prototypische Implementierung Gateway unterteilt.

6.1.1. Analyse Kommunikationsprotokolle

In der GA werden verschiedene Kommunikationsprotokolle mit spezifischen Informationsmodellen angewendet. Für die Verarbeitung der spezifischen Informationen wurden die relevanten Kommunikationsprotokolle der GA hinsichtlich des jeweiligen Informationsgehalts und der Funktionalitäten (bspw. Erkundungsmechanismen) analysiert. Basierend auf der Verbreitung der Kommunikationsprotokolle wurden BACnet, KNX und Modbus in die Analyse aufgenommen. Die Tabelle zeigt eine Gegenüberstellung dieser Protokolle. Im weiteren Verlauf des Kapitels wird auf die einzelnen Protokolle spezifisch eingegangen.

Tabelle 1: Gegenüberstellung der etablierten Kommunikationsprotokolle der GA

Kriterium	BACnet	KNX	Modbus
Strukturierter Adressraum	✔ Device -> Object -> Property	⚠ Mit Gruppenadressen möglich, aber keine Vorgabe	⚠ frei definierbar
Maschinenlesbare Semantik	✔ Standardisierte Merkmale (z. B. <i>Unit</i> und <i>ObjectType</i>)	⚠ Semantik kann definiert werden, wird jedoch nicht in einzelne Geräte übertragen (verbleibt in Projektdatei oder in Gateways)	✘ Informationsmodell ohne Möglichkeit zur semantischen Beschreibung
Zugriff über offene Schnittstelle	✔ BACnet/IP	⚠ KNXnet/IP teils proprietär	✔ Modbus TCP

Kommunikationsprotokoll – BACnet:

In der GA kommt BACnet für den Informationsaustausch zwischen verschiedenen Systemteilnehmern der Automations- und Managementebene zum Einsatz. Ein BACnet-Device beschreibt einen Systemteilnehmer durch verpflichtende und optionale BACnet-Objects. Jedes BACnet-Device hat verpflichtend ein *DeviceObject*, wodurch es für andere Systemteilnehmer auffindbar ist. Hierdurch wird der Erkundungsmechanismus *BACnet-WhoIs* ermöglicht [3]. Optionale BACnet-Objects sind bspw. analoge und binäre Anlagenwerte (*Analog- und BinaryObjects*), komplexe Objects wie ein *CalendarObject* zur Realisierung von Zeitschaltprogrammen oder das *TrendObject* zum Historisieren von analogen oder binären Datenpunkten. Ein *BacnetObject* setzt sich wiederum aus verpflichtenden und optionalen BACnet-Properties zusammen. BACnet-Properties beschreiben die Informationen eines *BACnetObjects* wie bspw. die *Description* (Beschreibung), den *PresentValue* (Istwert) oder die *Unit* (physikalische Einheit).

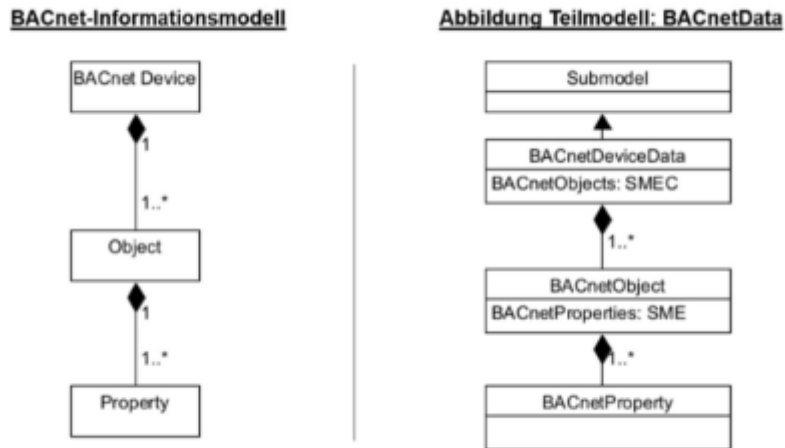


Abbildung 4: Informationsmodell BACnet und Abbildung als Industrie 4.0 Teilmodell

Die BACnet-Properties wurden auf ihren Informationsgehalt und die entsprechende Eignung für eine Mustererkennung mit KI-Methoden analysiert.

- **ObjectName:**

Das für alle *BACnetObjects* verpflichtende Property *ObjectName* eines Objects muss innerhalb eines *BACnetDevice* eindeutig sein und besteht aus einer Aneinanderreihung von Zeichen (Typ: CharacterString). In der GA wird für den *ObjectName* meist ein Anlagenkennzeichnungssystem (AKS) verwendet. Die Struktur eines solchen AKS kann wie folgt aussehen:



Abbildung 5: Beispielhafte Datenpunktbezeichnung

Wie dargestellt enthält der *ObjectName* in der Regel semantische Informationen über den Datenpunkt, wodurch sich dieses Property für Anwendungen von NLP-Methoden eignet.

- **Description:**

Das optionale Property *Description* eines Objects enthält eine Beschreibung des Datenpunkts, die in der Regel von dem ausführenden Automationsunternehmen vergeben wird. Analog zu dem Beispiel des *ObjectName* könnte eine entsprechende *Description* des gleichen Objects „Messwert Vorlauftemperatur Heizkreis

1“ sein. Die semantischen Informationen dieses Properties eignen sich für Anwendungen von NLP-Methoden.

- **ObjectType:**

Das für alle *BACnetObjects* verpflichtende Property *ObjectType* beschreibt die Objekttypklasse gemäß dem BACnet-Standard DIN EN ISO 16484-5 [14]. Entsprechend den zuvor gewählten Beispielen, wäre der Property-Wert „*AnalogInputType*“. Die Information über den Objekttypen eines Datenpunkts kann in die Metadaten-Klassifizierung miteinfließen. Hierfür eignen sich die Anwendungen von ML-Methoden (Maschine Learning, bspw. DecisionTrees).

- **Unit:**

Das optionale Property *Unit* eines Objects beschreibt die physikalische Einheit eines Datenpunkts gemäß dem BACnet-Standard DIN EN ISO 16484-5. Entsprechend den zuvor gewählten Beispielen, wäre der Property-Wert „°C“ oder „°F“ möglich. Die Information über die physikalische Einheit eines Datenpunkts kann in die Metadaten-Klassifizierung miteinfließen. Hierfür eignen sich die Anwendungen von ML-Methoden (bspw. Decision-Trees).

- **PresentValue:**

Das optionale Property *PresentValue* eines Objects wird benötigt, um KI-Methoden zur Analyse von Zeitreihendaten zu untersuchen.

Das Kommunikationsprotokoll BACnet eignet sich durch den breiten Informationsgehalt an semantischen Attributen und Metadaten für die in diesem Forschungsprojekt adressierten KI-Methoden zur Strukturerkundung.

Kommunikationsprotokoll – KNX:

KNX wird in der TGA besonders in der Licht- und Jalousiesteuerung in der Raumautomation verwendet. Im Gegensatz zu BACnet wird die Logik bei einer KNX-Automatisierung nicht in einer zentralen Automationsstation hinterlegt, sondern erfolgt dezentral in den jeweiligen KNX-Geräten. Eine KNX-Projektierung erfolgt ausschließlich über das Engineering-Tool *ETS*, welches von der KNX Association bereitgestellt und vertrieben wird [3]. Die Übertragung des Anlagenverhaltens in die KNX-Geräte geschieht einmalig von der ETS über den KNX-Bus. Eine anschließende Anpassung des Gesamtverhaltens ist ohne die projektspezifische ETS-Datei nicht möglich.

Ein KNX-System besteht aus maximal 16 Bereichen. Jeder Bereich kann wiederum aus maximal 16 Linien bestehen, an welche bis zu 256 KNX-Geräte angeschlossen sein können. Verschiedene Bereiche und Linien werden mit Bereichs- resp. Linienkopplern verbunden.

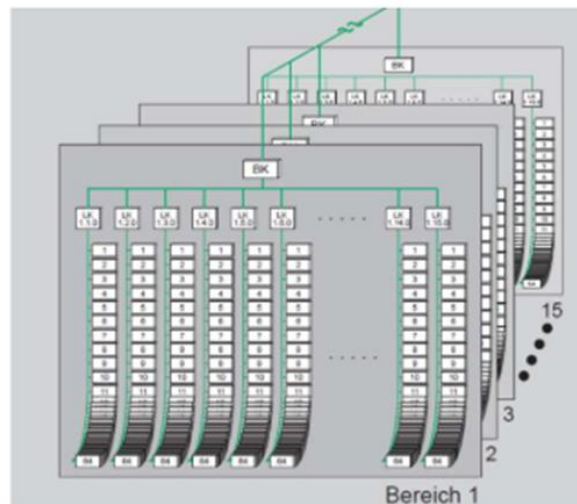


Abbildung 6: Systemarchitektur eines KNX-Systems bestehend aus Bereichen, Linien und Geräten [3]

Koppler können durch anwendungsspezifische Einstellungen den Datenverkehr von unberechtigten KNX-Geräten unterbinden. Dies erschwert die Erkundung eines Netzwerks. Um eine vollständige Erkundung eines KNX-Netzwerks sicherzustellen, muss entweder die Parametrierung aller Koppler angepasst oder in jedem Bereich / jeder Linie ein Gateway eingebaut werden. Das widerspricht dem verfolgten Ansatz dieser Arbeit, eine automatisierte Strukturerkundung ohne Eingriffe in das System und ohne manuellen Aufwand zu ermöglichen.

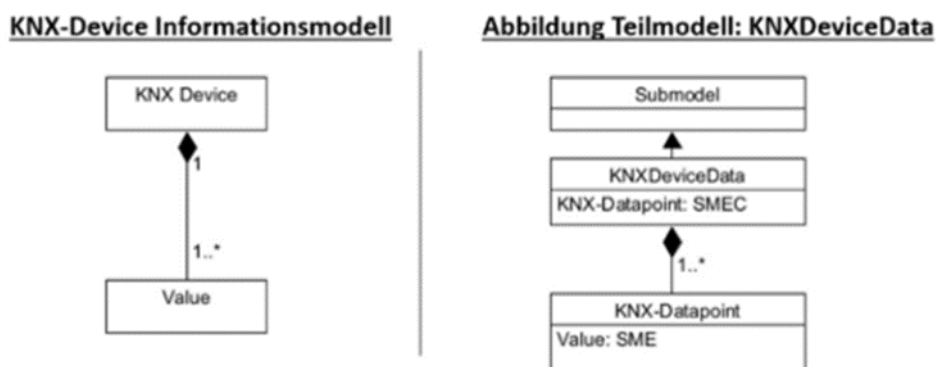


Abbildung 7: Informationsmodell KNX und Abbildung als Teilmodell

Die aus dem Informationsnetzwerk gewinnbaren Informationen eignen sich bedingt zur Anwendung von KI-Methoden. So erlaubt die Größe eines KNX-Datenpunkts (bspw. 1

Bit, 4 Bit, 1 Byte) nur eingeschränkte Rückschlüsse auf seinen Datentyp. Zudem existieren beschreibende *Name*-Attribute, welche zur Beschreibung von Kommunikationsobjekten genutzt werden können. Abbildung 8 zeigt einen Ausschnitt aus einer Aufzeichnung der Bus-Kommunikation in einem KNX-Netzwerk. Die hier mitlesbaren Informationen unterliegen der Einschränkung, dass sie die reale Kommunikation der Teilnehmer abbilden. Aufgrund der Bereichs- und Linienkoppler ist kein Rückschluss auf die Vollständigkeit der Datenpunkte möglich, da nicht sichergestellt ist, dass alle Kommunikationsobjekte im Betrachtungszeitraum gesendet oder empfangen haben.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Time	Source Address	Source Name	Destination Address	Destination Name	Type	DPT
2	24.07.2023 16:31	1.1.94	6190/10-101 Wetterzentrale,REG	0/3/12	Helligkeitswert Links	GroupValueWrite	9.004 Lux (Lux)
3	24.07.2023 16:31	1.1.94	6190/10-101 Wetterzentrale,REG	0/3/13	Dämmerungswert	GroupValueWrite	9.004 Lux (Lux)
4	24.07.2023 16:31	1.1.94	6190/10-101 Wetterzentrale,REG	0/3/11	Helligkeitswert Mitte	GroupValueWrite	9.004 Lux (Lux)
5	24.07.2023 16:31	1.1.94	Grundträger 3fach	13/1/3	RT Ist	GroupValueWrite	9. * 2-Byte Gleitkommawert
6	24.07.2023 16:31	1.1.94	6190/10-101 Wetterzentrale,REG	0/3/12	Helligkeitswert Links	GroupValueWrite	9.004 Lux (Lux)
7	24.07.2023 16:31	1.1.94	6190/10-101 Wetterzentrale,REG	0/3/13	Dämmerungswert	GroupValueWrite	9.004 Lux (Lux)
8	24.07.2023 16:31	1.1.94	6190/10-101 Wetterzentrale,REG	0/3/11	Helligkeitswert Mitte	GroupValueWrite	9.004 Lux (Lux)
9	24.07.2023 16:31	1.1.94	6190/10-101 Wetterzentrale,REG	0/3/12	Helligkeitswert Links	GroupValueWrite	9.004 Lux (Lux)
10	24.07.2023 16:31	1.1.94	6190/10-101 Wetterzentrale,REG	0/3/13	Dämmerungswert	GroupValueWrite	9.004 Lux (Lux)
11	24.07.2023 16:31	1.1.94	Anbindung WP	0/5/7	Heizbetrieb aktiv	GroupValueWrite	1.001 Schalten

Abbildung 8: Ausschnitt einer KNX-Telegramm-Aufzeichnung

Aufgrund dieser Einschränkungen ist die automatisierte Strukturerkundung basierend auf im Netzwerk verfügbaren Datenpunkten, wie Projekt fokussiert, nur mit Einschränkungen und Unsicherheiten zur Vollständigkeit möglich. Ohne Kenntnisse des Systems und ggf. Änderungen an der Installation und Parametrierung ist keine vollständige Erkundung möglich. Es bedarf semantischen Informationen, die sich nur in Projekt- und Dokumentationsdateien finden, um das System in Gänze erfassen zu können. Denkbar ist eine künftige Einbindung von ETS-spezifischen Analysemethoden und NLP-Anwendungen für die Nutzung von Informationen aus Dokumentationsunterlagen, um die in dieser Arbeit entwickelten Methoden auf KNX anwendbar zu machen.

Kommunikationsprotokoll – Modbus:

Modbus kommt sowohl in der GA als auch in der Industrieautomation zum Einsatz. Anders als das BACnet-Protokoll, wird Modbus in der Systemarchitektur für den Informationsaustausch zwischen verschiedenen Systemteilnehmern der Automations- und Feldebene eingesetzt. Die Datenpunkte eines Modbus-Device werden durch Register beschrieben. Jedes Register kann dabei einen Wert mit 16-Bit beschreiben.

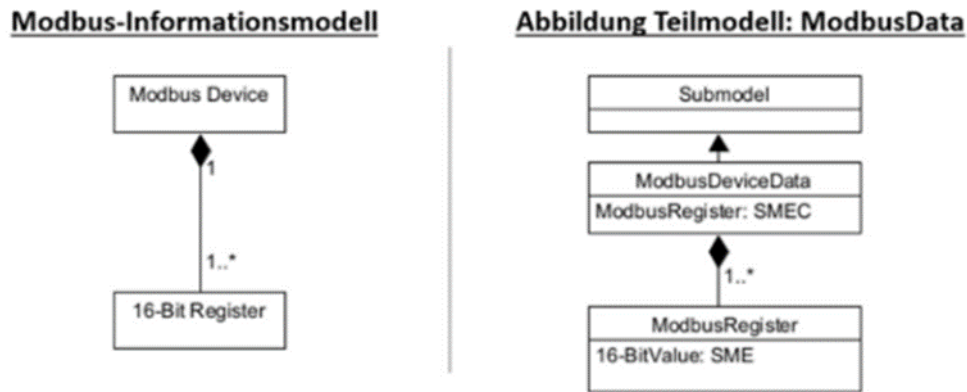


Abbildung 9: Informationsmodell Modbus und Abbildung als Industrie4.0-Teilmodell

Im Kommunikationsprotokoll Modbus sind keine semantischen Attribute vorhanden, die Rückschlüsse über die Bedeutung eines Datenpunkts zulassen. Die ModbusRegister beschreiben lediglich den Messwert des Datenpunkts mit 16-Bit. Die Information, was ein Modbus-Register beschreibt, liegt in der projekt- oder herstellerspezifischen Beschreibung eines Modbus-Device. In der Regel sind dies PDF-Dokumente, die einen hersteller- und gerätespezifischen Aufbau haben. Somit eignen sich die Informationen, die über das Kommunikationsprotokoll Modbus ausgetauscht werden, nicht für die Anwendung von NLP-Methoden; die semantische Erkundbarkeit fehlt.

Die Anwendung von ML-Methoden zur Metadaten-Klassifizierung oder Analyse von Zeitreihen auf die Werte der Modbus-Register ist ebenfalls nicht erfolgsversprechend. Da Messwerte durch ein oder mehr 16-Bit-Register beschrieben werden, sind zur Abbildung von bspw. Dezimalzahlen zusätzliche Festlegungen notwendig. So wird in der Praxis häufig ein auf den gelesenen Wert anzuwendender Faktor definiert, bspw. 0,1. Dieser ist nicht Teil des Informationsmodells und nur in der Dokumentation enthalten [3]. Der Registerwert für eine Raumtemperatur kann z. B. 213 sein, was durch den anzuwendenden Faktor 0,1 der Temperatur 21,3 °C entspricht.

Der Informationsgehalt in Modbus-Datenpunkten allein ist aufgrund des hohen Freiheitsgrades für einzelne Implementierungen und die in der Praxis gängigen zusätzlichen Festlegungen nicht ausreichend, um die in diesem Forschungsprojekt adressierten KI-Methoden zu nutzen. Denkbar für zukünftige Forschungsprojekte, ist die Analyse der projekt- oder herstellerspezifischen Dokumentationsunterlagen mittels NLP-Methoden.

6.1.2. Abbildung auf digitale Zwillinge

Als standardisierter digitaler Zwilling wird die Verwaltungsschale der Industrie 4.0 genutzt. Die Verwaltungsschale ist das Informationsmodell der Industrie 4.0 [15] und stellt die digitale Repräsentation eines Assets dar. Sie schafft eine standardisierte Schnittstelle für den Austausch und die Verarbeitung von Informationen entlang des gesamten Lebenszyklus eines Assets. Das zugrundeliegende Informationsmodell der Verwaltungsschale ist dabei abstrakt und branchenunabhängig gestaltet, um eine möglichst breite Anwendbarkeit zu gewährleisten – unabhängig von konkreten Industriezweigen, Anwendungsfällen oder Asset-Typen.

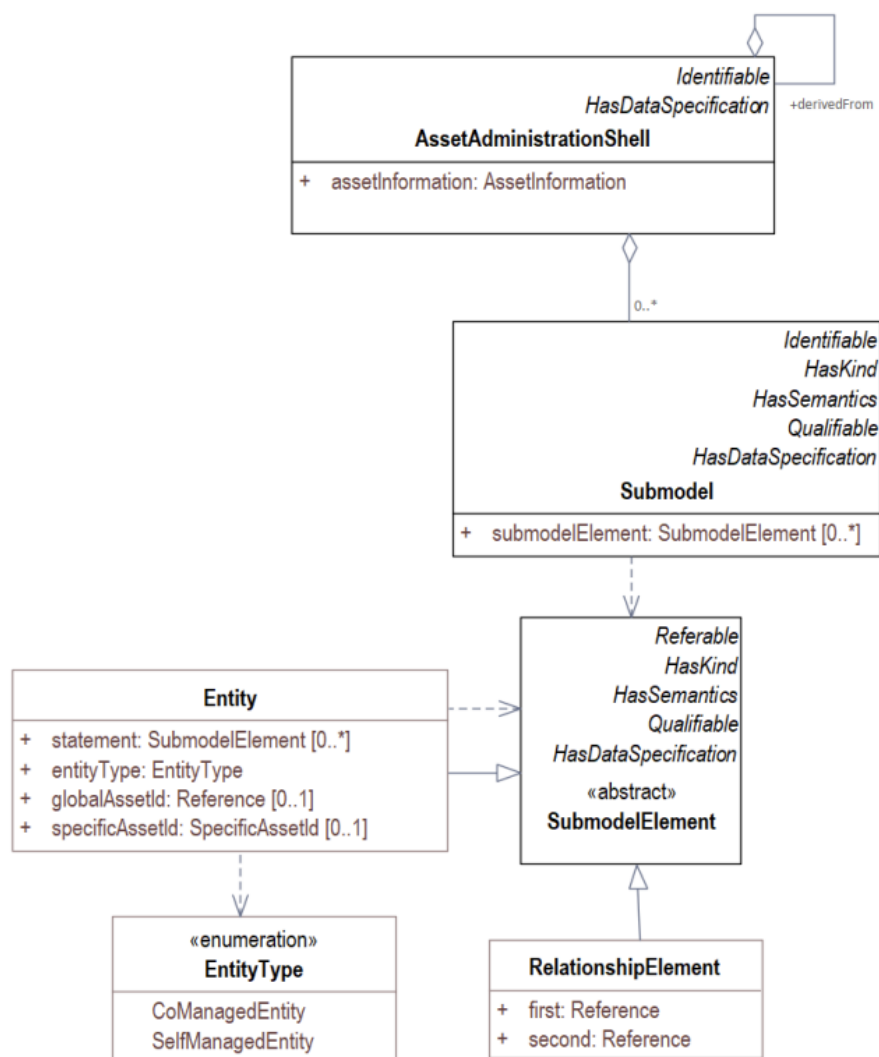


Abbildung 10: Informationsmodell der Verwaltungsschale [15]

Das Informationsmodell der Verwaltungsschale ist in mehreren Ebenen strukturiert. Im Kern steht das Teilmodell (engl. *Submodel*), welches thematisch zusammengehörige

Informationen beschreibt – etwa zur Geometrie, zu technischen Eigenschaften, zum Status oder zu Wartungsinformationen eines Assets. Ein Asset kann beliebig viele Teilmodelle enthalten, was eine hohe Flexibilität im Umgang mit unterschiedlichen Daten ermöglicht. Die Teilmodelle selbst bestehen aus sogenannten *Submodel Elements*, also einzelnen Informationsbausteinen wie Eigenschaften, Relationen, Zustände oder Operationen. Diese Elemente folgen definierten Metamodellen und semantischen Standards, was die Interoperabilität zwischen Systemen und Akteuren sicherstellt.

Abbildung 10 visualisiert die abstrahierte Struktur dieses Informationsmodells. Es zeigt, dass sich die Verwaltungsschale modular zusammensetzt und dabei eine klare Trennung zwischen der Identität des Assets, seinen Metadaten und den konkreten Teilmodellen vornimmt. Besonders hervorzuheben ist, dass das Modell nicht an bestimmte Domänen gebunden ist – es kann sowohl für ein Industrieprodukt, eine Maschine, eine Softwarekomponente oder auch einen kompletten Gebäudeabschnitt verwendet werden. Diese Domänenneutralität macht die Verwaltungsschale zu einem universellen Träger digitaler Zwillinge.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt des Informationsmodells ist die Semantik. Jeder Bestandteil der Verwaltungsschale kann mit standardisierten semantischen Beschreibungen versehen werden – etwa durch Referenzierung auf internationale Normen, Ontologien oder Klassifikationssysteme. Dadurch wird nicht nur die maschinelle Interpretierbarkeit sichergestellt, sondern auch die Wiederverwendbarkeit von Modellen über unterschiedliche Plattformen und Anwendungen hinweg. Darüber hinaus unterstützt das Informationsmodell Mechanismen zur Versionierung, Rechteverwaltung und Lebenszykluspflege, was insbesondere in kollaborativen und langfristigen Einsatzszenarien von Bedeutung ist. Die Offenheit und Modularität des Modells ermöglichen es, vorhandene Systeme schrittweise zu integrieren und gleichzeitig zukünftige Entwicklungen zu berücksichtigen. Das Informationsmodell der Verwaltungsschale ist eine robuste und skalierbare Grundlage für digitale Zwillinge. Es abstrahiert die relevanten Informationen eines Assets in strukturierter, maschinenlesbarer Form und bildet damit die Basis für Automatisierung, Analyse und Integration in digitale Ökosysteme.

In dem vorliegenden Forschungsprojekt wurden alle Informationen, die sich aus den erkundeten Daten der GA ergeben, auf das Informationsmodell der Verwaltungsschale

abgebildet. Dadurch entstehen digitale Zwillinge, als virtuelle Repräsentanten der gebäudetechnischen Systeme. Im folgenden Kapitel wird sich auf unterschiedliche Typen von Verwaltungsschalen (Liegenschaften, Gebäude, Komponenten) bezogen, die als Teil des Forschungsprojektes definiert wurden. Die definierten Verwaltungsschalen und zugehörigen Teilmodelle sind im Anhang aufgelistet. Die Abbildung der BACnet Teilnehmer auf das Informationsmodell der Verwaltungsschale erfolgt im ersten Schritt mittels dreier Teilmodelle pro BACnet-Device.

Asset Interfaces Description (AID):

Die AID ist ein vom IDTA veröffentlichtes Teilmodell [16]. Es dient der Beschreibung von Kommunikationsschnittstellen eines Assets. Ergänzende Properties finden sich ausschließlich in der *SubmodelElementCollection (SMC) forms*. Abbildung 11 zeigt den Aufbau der AID exemplarisch mit der Modbus-TCP-Ausprägung der SMC forms. Diese ist neben HTTP und MQTT in Version 1.0 des AID-Spezifikation enthalten.

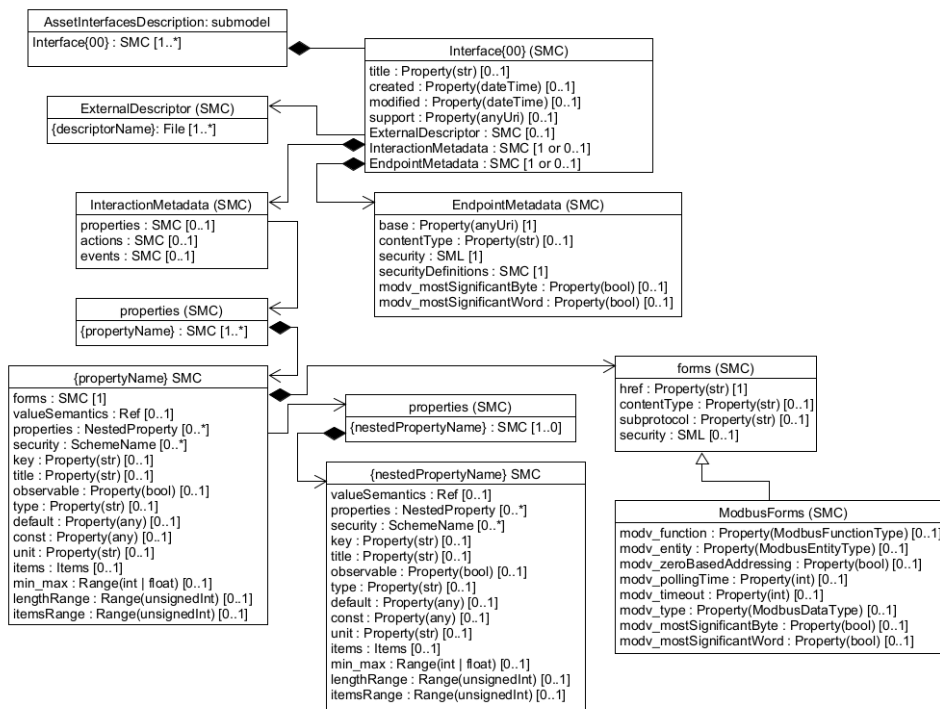


Abbildung 11: UML-Darstellung des IDTA-Teilmodells AssetInterfacesDescription [16]

Asset Interfaces Mapping Configuration (AIMC):

Die AIMC ist ein vom IDTA veröffentlichtes Teilmodell [17]. AIMC dient der Beschreibung von Abbildungspfaden und beinhaltet *MappingConfigurations*, dargestellt in Abbildung 12. Diese sind jeweils einer Interface-Description in einer AID zugeordnet und verweisen in der *InterfaceReference* hierauf. Die einzelnen *SourceSinkRelations* enthalten als *RelationshipElements* zwei Referenzen:

- *first*: referenziert eine Property-Description in der Interface-Description
- *second*: referenziert ein beliebiges *SubmodelElement*

Eine Anwendung kann diese Informationen nutzen, um auf die Kommunikationsschnittstelle zuzugreifen und die gelesenen Daten im *second* referenzierten *SubmodelElement* abzulegen.

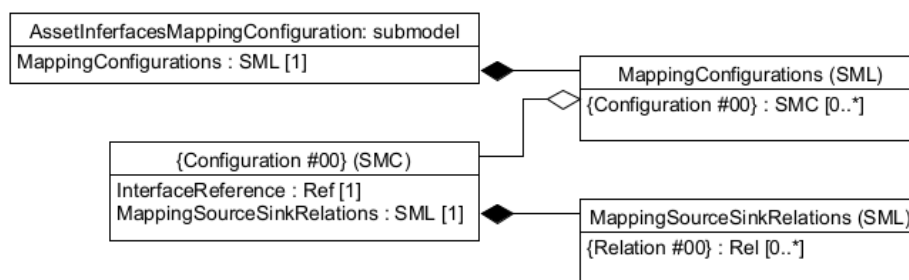


Abbildung 12: UML-Darstellung des IDTA-Teilmodells *AssetInterfacesMappingConfiguration* [17]

BACnetDatapointsInformation

Dieses Teilmodell wurde im Rahmen des Projekts entworfen. Es dient der Ablage der über die BACnet-Schnittstelle ausgelesenen Datenpunkte. Die Struktur folgt dem Datenmodell von BACnet und dient als Ausgangspunkt für Anwendungen, welche die Inhalte der Datenpunkte verarbeiten. Die Abbildung 13 zeigt die UML-Darstellung des Teilmodells. Die weiterführende Erläuterung zur Anwendung erfolgt in Abschnitt 6.1.3.

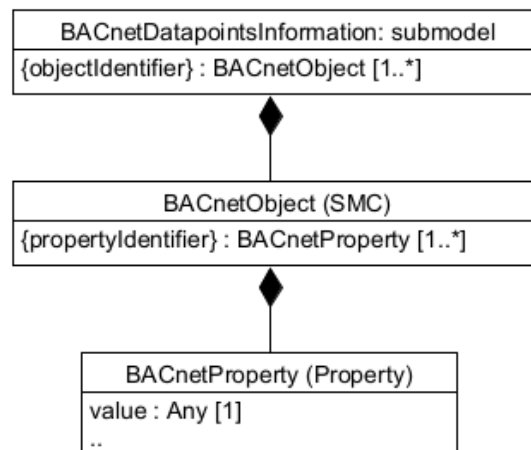


Abbildung 13: UML-Darstellung Teilmodells BACnetDatapointsInformation

6.1.3. Prototypische Implementierung in Gateway

Als Hardware wird für die prototypische Implementierung ein Raspberry Pi 4 genutzt. Er übernimmt sowohl Erstellung und Verwaltung der Verwaltungsschalen als auch die Kommunikation mit den BACnet-Teilnehmern via Ethernet-Schnittstelle. Zur Ablage und Verwaltung der AAS werden Software-Komponenten von Eclipse BaSyx genutzt. Hierbei handelt es sich um eine Open Source Plattform, die die Industrie 4.0 Konzepte in Form von grundlegenden Softwarekomponenten und Software Development Kits (SDKs) für gängige Programmiersprachen zur Verfügung stellt [18]. Die Softwarekomponenten werden als Docker Container bereitgestellt. In diesen Container sind die Komponenten zusammen mit anderen Softwareelementen, zu denen Abhängigkeiten bestehen, gekapselt. So können sie ohne weitere Konfigurationen, unabhängig vom Betriebssystem, direkt ausgeführt werden [19]. Die genutzten Komponenten sind:

- AAS-Environment: Hierin sind die Repositorien für die drei Toplevel-Elemente der AAS, (1) AssetAdministrationShells, (2) Submodels und (3) Concept-Descriptions, enthalten.
- AAS-Registry: In dieser Komponente werden beschreibende Descriptors für AAS abgelegt. Die Erstellung dieser erfolgt automatisch durch die AAS-Environment beim Hinzufügen einer AAS, ebenso die Löschung bei Entfernung einer AAS. Diese Descriptors enthalten nur die Metadaten einer AAS, ohne den mitunter großen Inhalt. So kann eine Erkundung der vorhandenen Elemente mit deutlich geringerem Datenumsatz erfolgen.
- SM-Registry: Erfüllt die Funktionen der AAS-Registry für Teilmodelle.

- AAS-GUI: Diese Komponente dient der grafischen Repräsentation von AAS. Sie muss nicht zusammen mit den anderen Elementen ausgeführt werden, sondern kann während der Laufzeit über entsprechende Konfigurationsfelder mit einer AAS-Environment und zugehörigen Registrys verbunden werden.

Im Projekt wurde eine weitere Softwarekomponente, die Basyx-Databridge als MonkiBridge, in Python adaptiert. Hierbei handelt es sich um eine Anwendung, die eine kommunikationsprotokollunabhängige Grundstruktur bietet, welche durch die Ausprägung von kommunikationsprotokollspezifischen Kommunikatoren und Endpunkten erweitert werden kann. Diese Endpunkte werden dann in Dateien in der JavaScript Object Notation (JSON) einzeln beschrieben und mit einer *uniqueId* versehen. In einer zentralen *routes*-Datei wird anhand dieser *uniqueId*s beschrieben, welche Daten gelesen und wohin sie geschrieben werden sollen. Zur Veranschaulichung ist das UML-Diagramm in Abbildung 14 dargestellt.

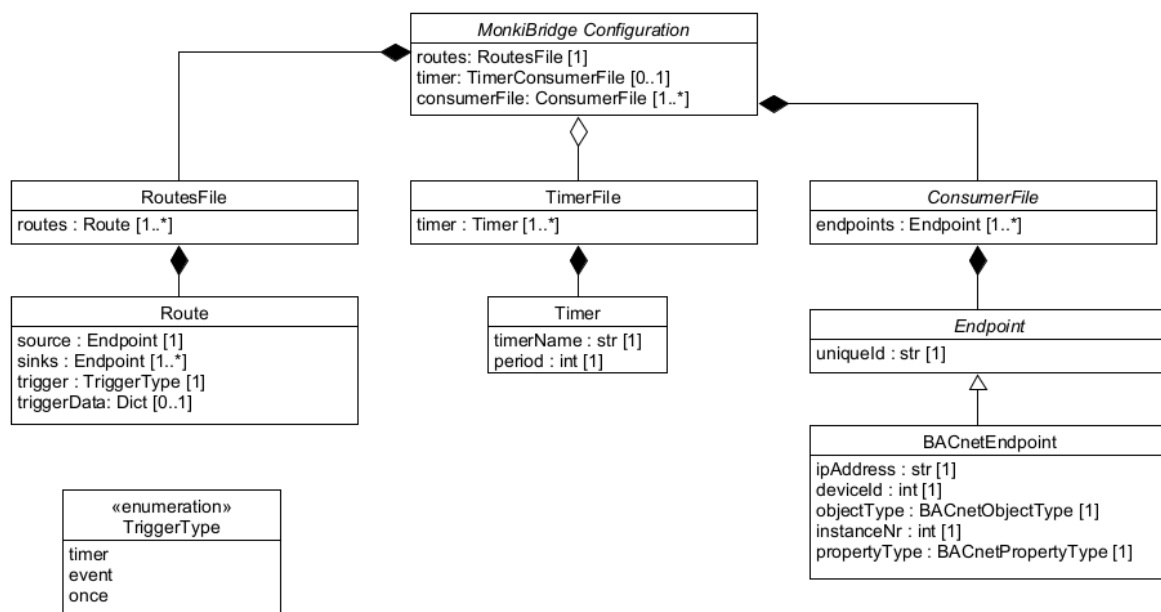


Abbildung 14: UML-Darstellung der MonkiBridge Konfiguration

Die entwickelte Softwarelösung erkundet das BACnet-IP Netzwerk. Hierfür wird zuerst ein „Who-Is“-Befehl ausgeführt. Alle BACnet-Teilnehmer müssen diesen mit einer „I-Am“-Rückmeldung beantworten. Diese beinhaltet u. a. die IP-Adresse und die *DeviceId*. Mit diesen kann aus dem verpflichtenden *DeviceObject* das *Property ObjectList* gelesen werden. Dieses beinhaltet eine Liste aller Objekte, die im Teilnehmer existieren.

Für jedes Objekt wird das optionale Property *PropertyList* gelesen. Sollte es nicht ausgeprägt sein, so werden die in DIN EN ISO 16484-5 genormten Propertys gelesen. Kann kein Wert gelesen werden, so ist das entsprechende Property nicht ausgeprägt.

Die gewonnenen Informationen werden in Form einer AID- und BACnetDatapointInformation-Instanz in der AAS-Environment abgelegt. Gleichzeitig wird eine AIMC erstellt und auf ihrer Grundlage eine *MonkiBridge*-Instanz konfiguriert und gestartet. So wird das Teilmodell BACnetDatapointInformation automatisch und zyklisch mit Gerätedaten befüllt.

Die BaSyx-Data-Bridge ermöglicht den Zugriff auf Asset-Daten aus Informationsnetzwerken und deren Übertragung an einen AAS-Server mithilfe von Teilmodellen. Sie wurde speziell um das BACnet-Kommunikationsprotokoll erweitert, um Daten aus diesem Protokoll zu verarbeiten und zu integrieren. Für die Konfiguration der Data-Bridge sind sowohl Schnittstelleninformationen des physischen Assets als auch Mapping-Informationen der AAS erforderlich. Diese Informationen werden in den standardisierten IDTA-Teilmodellen AID und AIMC beschrieben.

Durch die Darstellung dieser Teilmodelle innerhalb einer AAS kann die Data-Bridge auf sämtliche benötigte Informationen zugreifen. Dies ermöglicht den Abruf von BACnet-Daten aus einem Netzwerk und deren Übertragung an eine AAS.

Mit einem BaSyx-AAS-Server werden die AAS in einer HTTP-Laufzeitumgebung ausgeführt. Dies gewährleistet eine flexible Integration in bestehende Systeme und ermöglicht die Bereitstellung von Informationen für weitere Systemteilnehmer innerhalb des Netzwerks.

Anwendung des Teilmodells BACnet Datapoints Information

Eine Asset Administration Shell (AAS) stellt Informationen über die BACnet-Datenpunkte einer Automationsstation im Teilmodell BACnet-Datapoints-Information bereit. Die Data-Bridge übernimmt dabei die Übertragung der BACnet-Informationen aus dem GA-Netzwerk an dieses Teilmodell.

Das Teilmodell wurde entsprechend dem Informationsmodell von BACnet spezifiziert. Jedes BACnet-Objekt wird innerhalb des Teilmodells als *SubmodelElementCollection* (SMC) dargestellt. Die einzelnen Eigenschaften der BACnet-Objekte, wie beispielsweise Name, Beschreibung oder Einheit, werden als Submodel Elements abgebildet.

Durch diese Struktur ermöglicht das Teilmodell eine präzise und standardisierte Repräsentation der Datenpunkte, wodurch diese für die weitere Verarbeitung und Integration in Monitoring- und Steuerungssysteme zugänglich gemacht werden.

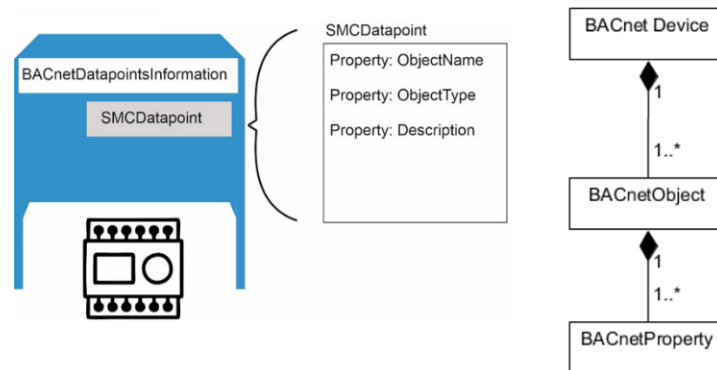


Abbildung 15: Visualisierung Teilmodell BACnet Datapoints Information

Durch die Verfügbarkeit des BACnet-Teilmodells können Informationen und Eigenschaften der BACnet-Datenpunkte strukturiert erfasst und bereitgestellt werden. Das Teilmodell ermöglicht eine präzise Abbildung der Fähigkeiten und Daten eines Teilnehmers in einem digitalen Format.

Die Integration des Teilmodells in eine Asset Administration Shell (AAS) sorgt dafür, dass die Daten in einer standardisierten und maschinenlesbaren Form verfügbar sind. Mithilfe des BaSyx AAS-Servers werden diese Informationen in einer HTTP-Laufzeitumgebung ausgeführt, was eine nahtlose Integration und Interoperabilität innerhalb eines Netzwerks ermöglicht.

Damit wird eine digitale Repräsentation geschaffen, die sowohl die Verwaltung als auch die Weiterverarbeitung der Daten unterstützt und eine Grundlage für die Erweiterung und Anpassung an zukünftige Anforderungen bietet.

6.2. Entwurf des KI-Algorithmus zur Abbildung heterogener Semantik

Die Daten der Automationsstationen werden durch das Teilmodell BACnet-Datapoints-Information in syntaktisch einheitlicher Weise bereitgestellt. Diese Informationen müssen nicht nur verfügbar sein, sondern auch von anderen Systemen interpretierbar sein, damit sie für weiterführende Prozesse und Anwendungen genutzt werden können. Das alleinige Bereitstellen der Daten durch das BACnet-Datapoints-Information-Teilmodell genügt dafür jedoch nicht alleine. Ergänzend werden daher das AID-Teilmodell (Asset-Interface-Description) und das AIMC-Teilmodell (Asset-Interfaces-Mapping-Configuration) genutzt, um die relevanten Daten der Gebäudeautomation (GA) in die Verwaltungsschale zu integrieren. Allerdings fehlt bislang eine semantische Abbildung dieser Daten auf einen anerkannten Standard, sodass die Datenpunkte weiterhin semantisch heterogen vorliegen und zusätzliche Schritte zur Harmonisierung erforderlich sind.

Zur Integration der Datenpunkte in TMon-Anwendungen müssen nicht nur die Objektbezeichnungen (Object-Name), sondern gleichermaßen andere BACnet-Eigenschaften (Present Value, Description, Status-Flags etc.) analysiert und interpretiert werden. Dies ist auch dann notwendig, wenn die Datenpunkte bereits in einer AAS verfügbar gemacht wurden. Das Fehlen standardisierter semantischer Modelle erfordert zusätzliche Verarbeitungsschritte. Solche semantischen Modelle sind beispielsweise dann verfügbar, wenn standardisierte Anlagenkennzeichnungssysteme (AKS) verwendet werden, wie sie in der VDI 3814 beschrieben werden [20]. Allerdings besteht keine gesetzliche Verpflichtung zur Einhaltung solcher Standards, sodass in der Praxis häufig hersteller- oder betreiberspezifische AKS verwendet werden. Diese Vielfalt führt zu einer weiteren Fragmentierung der semantischen Modelle, was deren Anwendung erschwert.

Ein Mechanismus ist erforderlich, der diese unterschiedlichen Modelle automatisiert aufeinander abbildet. Zur Lösung dieser Problematik wurde eine Methode entwickelt, die es ermöglicht, die semantischen Informationen von Datenpunkten effizient zu verarbeiten. Dieser Ansatz basiert auf einem vierstufigen Klassifikationsprozess, der die Datenpunkte systematisch analysiert und klassifiziert. Zunächst erfolgt eine Zuweisung zu einer funktionalen Ordnungsmethode, gefolgt von der Identifikation spezifischer Komponenten und deren Eigenschaften. Die Zuordnung erfolgt auf Grundlage von Sprachmodellen (Natural Language Processing, NLP), die speziell für diesen

Zweck trainiert wurden. Die Trainingsdaten wurden aus verschiedenen Automationsstationen extrahiert und manuell annotiert, um eine möglichst hohe Genauigkeit bei der Klassifikation zu gewährleisten [1].

Ein zentrales Ziel der entwickelten Methode ist die Vereinheitlichung der semantischen Beschreibungen, sodass die Datenpunkte in standardisierte Vokabulare integriert werden können. Dies ermöglicht nicht nur eine effiziente Verarbeitung der Daten, sondern auch die automatisierte Erstellung von Monitoring-Dashboards und Analysen. Die Einhaltung hoher Klassifikationsgenauigkeiten – beispielsweise ein F1-Score von über 95 % – wurde durch umfangreiche Tests sichergestellt. Dabei zeigte sich, dass mit vergleichsweise wenigen Trainingsdaten eine hohe Genauigkeit erreicht werden kann. Für Anwendungen, die eine noch höhere Präzision erfordern, ist es möglich, die Trainingsdaten entsprechend zu erweitern.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Kombination aus standardisierten Teilmodellen, NLP-gestützten Klassifikationsmethoden und einer strukturierten Ordnungsmethode einen leistungsfähigen Ansatz zur Integration und Verarbeitung semantisch heterogener Datenpunkte darstellt. Dies bildet die Grundlage für die Entwicklung automatisierter Anwendungen im Bereich des technischen Monitorings und trägt gleichzeitig zur Reduzierung des Konfigurationsaufwands bei. Damit wird eine zentrale Voraussetzung für die breitere Nutzung von Monitoring-Systemen geschaffen, die insbesondere im Kontext von Industrie 4.0 und der Digitalisierung in der Gebäudetechnik und des Gebäudesektors eine wichtige Rolle spielen.

6.2.1. Entwurf vierstufiger Klassifizierungsprozess

Ziel ist es jeden Datenpunkt aus diversen BACnet-Netzwerken in ein einheitliches Vokabular zu überführen. Zur Umsetzung wurde ein Klassifizierungsalgorithmus mit vier Ebenen entwickelt.



Abbildung 16: Überblick über den vierstufigen Klassifizierungsprozess mit den Stufen Grundfunktion, Unterfunktion, Komponente und Datenpunkt

Ein Gebäude setzt sich aus einer Vielzahl technischer Systeme zusammen, die unterschiedliche Funktionen zur Sicherstellung des Betriebs und des Nutzerkomforts erfül-

len. Ein zentrales Beispiel hierfür ist die Wärmeversorgung, die in den meisten Gebäuden notwendig ist, um behagliche Raumtemperaturen zu gewährleisten. Die grundlegende Funktion, die ein Gebäude in diesem Zusammenhang erfüllen muss, wird als *Wärme versorgen* bezeichnet.

Der Klassifizierungsprozess von Datenpunkten beginnt mit der Zuweisung zu einer solchen Grundfunktion. Diese erste Zuordnung bildet die Basis für eine weitere, detailliertere Unterteilung der Funktionen. Die Funktion *Wärme versorgen* lässt sich beispielsweise in die vier Unterfunktionen *Wärme erzeugen*, *Wärme verteilen*, *Wärme beziehen* und *Wärme speichern* differenzieren. Jede dieser Unterfunktionen beschreibt eine spezifische Aufgabe innerhalb des Gesamtsystems der Wärmeversorgung.

Zur Ausführung dieser Funktionen kommen unterschiedliche technische Systeme oder Komponenten zum Einsatz. Die Wärmeerzeugung kann beispielsweise durch verschiedene Arten von Wärmeerzeugern wie Wärmepumpen, Pelletkessel oder Blockheizkraftwerke realisiert werden. Der Klassifizierungsprozess ordnet daher auf der dritten Ebene jedem Datenpunkt eine Entität zu, die für die Erfüllung der jeweiligen Funktion verantwortlich ist.

Der Begriff Entität wird an dieser Stelle bewusst gewählt, da die Datenpunkte nicht ausschließlich technischen Einzelkomponenten, wie Pumpen oder Ventilen, zugeordnet werden. Vielmehr können sie auch größeren Systemstrukturen, wie einem Heizkreis oder einer Lüftungsanlage, zugewiesen werden. Die Verwendung des Begriffs Entität ermöglicht somit eine flexiblere und umfassendere Kategorisierung der Datenpunkte, die sowohl einzelne Bauteile als auch komplexe Systemeinheiten berücksichtigt.

Auf der vierten und letzten Ebene des Klassifizierungsprozesses erfolgt die Zuweisung einer eindeutigen Bezeichnung für jeden Datenpunkt. Diese Bezeichnung basiert auf einem einheitlich definierten Standard, der eine konsistente Benennung ermöglicht und Missverständnisse durch unterschiedliche Beschreibungen vermeidet. Die Verwendung standardisierter Datenpunktbezeichnungen ist entscheidend für die Integration der Daten in übergeordnete Systeme und deren Weiterverarbeitung in automatisierten Anwendungen wie Monitoring- oder Steuerungsplattformen.

Die hierarchische Struktur der Klassifizierung – von der Grundfunktion über die Unterfunktionen und Entitäten bis hin zur eindeutigen Bezeichnung – schafft die Grundlage für eine systematische und maschinenlesbare Erfassung von Gebäudeinformationen. Dadurch wird nicht nur die Zuordnung von Datenpunkten vereinfacht, sondern auch deren Integration in digitale Zwillinge und moderne Gebäudeautomationssysteme ermöglicht.

In Abbildung 17 ist dieser Klassifizierungsprozess anschaulich dargestellt und zeigt die schrittweise Vorgehensweise von der funktionalen Einordnung bis hin zur finalen Bezeichnung der Datenpunkte.

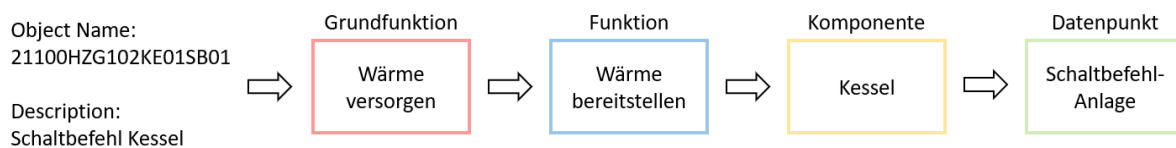


Abbildung 17: Beispielhafte Klassifizierung eines Datenpunkts bestehend aus Object Name und Description

Die Eingabe für den vierstufigen Klassifikationsprozess basiert auf dem Objektname (Object-Name) und der Beschreibung (Description) aus BACnet. Im ersten Schritt wird der Datenpunkt einer Grundfunktion, wie *Wärme versorgen* oder *Kälte versorgen*, zugeordnet. Danach erfolgt die Unterteilung in eine spezifische Unterfunktion, z. B. *Wärme erzeugen* oder *Wärme verteilen*.

Im dritten Schritt wird dem Datenpunkt eine Entität zugewiesen, die entweder eine technische Komponente wie eine Pumpe oder ein übergeordnetes System wie ein Heizkreis sein kann. Abschließend erhält der Datenpunkt eine standardisierte Bezeichnung aus einem vordefinierten Vokabular, um eine einheitliche und maschinenlesbare Struktur zu gewährleisten.

Die Methode erfordert das Training von NLP-Modellen, für das ein Datensatz erstellt wurde. Dieser Trainingsdatensatz enthält BACnet-Datenpunkte, die manuell in die Klassifikationskategorien eingeteilt werden. Der strukturierte Datensatz dient als Grundlage für das Training und die Validierung der Modelle, um eine präzise und automatisierte Verarbeitung der Datenpunkte zu ermöglichen.

6.2.2. Datensatz zum Training der Modelle

Für den Datensatz wurden Datenpunkte (BACnet-Objekte) aus bestehenden Gebäudeautomationssystemen der Städte Köln und Hamburg verwendet. Die Auswahl der

Objekttypen beschränkte sich auf Analog-Input, Analog-Output, Analog-Value, Binary-Input, Binary-Output, Binary-Value und Accumulator.

Insgesamt umfasst der Datensatz 54.125 klassifizierte Datenpunkte, die als Grundlage für das Training und die Validierung der NLP-Modelle dienen. Eine Übersicht über die Verteilung der Datenpunkte ist in Tabelle 2 dargestellt.

Zur Sicherstellung der Labeling-Qualität und -Konsistenz wurden die Datenpunktklassen stichprobenweise geprüft und optimiert. Darüber hinaus wurde die Terminologie der Datenpunktbeschreibungen auf redundante Ausprägungen untersucht und vereinheitlicht. Beispielsweise konnten doppelte Datenpunktbeschreibungen wie „Sollwert Stellsignal“ und „Stellsignal Sollwert“ identifiziert und zusammengeführt werden. Als Ergebnis liegt ein vereinheitlichter Datensatz mit konsistenten Datenpunktlabeln vor.

Tabelle 2: Übersicht über den erstellten Datensatz mit Namen und Anzahl der Vorkommnisse aus den drei Ebenen: Grundfunktion, Unterfunktion, Entität/Komponente

Grundfunktion	Unterfunktion	Entität/Komponente
Wärme versorgen (22.540)	Wärme erzeugen (2.147)	BHKW (304), Kessel (1.182), Pelletkessel (33), Wärmepumpe (46), Wärmerversorger 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), Frischwassermodul, (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)

Grundfunktion	Unterfunktion	Entität/Komponente
Medien versorgen (736)	Medien verteilen (488)	Druckhaltestation (15), Hygienespülung (257), Kraftstoffpumpe (6), Rohrbe- gleitheizung (5), Ventil (29), Wasserzähler (18), Zirkulation allgemein (34), Zir- kulationspumpe (124)
Kälte versorgen (1.319)	Kälte erzeugen (722)	Kälteanlage (29), Kältekreis allgemein (6), KältemaschineWär (284), Kälte- mengenzähler (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), Um- luftkühlggerät (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)	-	-

Für jeden Datenpunkt wurde ein vierstufiger Labelingprozess durchgeführt. Die möglichen Grundfunktionen umfassten *Wärme-, Luft-, Kälte-, Medien- und Strom versorgen* sowie *Transport* und *Sichern* (vgl. Tabelle 2). Datenpunkte mit unklaren Bezeichnungen oder Beschreibungen, die keiner Funktion zugeordnet werden konnten, wurden der Gruppe *Andere Anlagen* zugewiesen. Dies ermöglichte den Modellen, solche Datenpunkte als Sonstige zu klassifizieren, anstatt sie zu löschen.

Die Grundfunktionen wurden in Unterfunktionen unterteilt. Eine Ausnahme bildet die Funktion *Sichern*, die keine Unterfunktionen besitzt und direkt auf der Entitätsebene klassifiziert wurde. Für die Funktionen *Transport*, mit *Strom versorgen* und *Andere Anlagen* wurden aufgrund fehlender oder nicht zuordenbarer Daten keine weiteren Ebenen definiert.

Innerhalb jeder Unterfunktion erfolgte die Zuweisung der Datenpunkte zu einer Entität. Im letzten Schritt wurde die konkrete Funktion der Datenpunkte standardisiert beschrieben. Dabei wurde eine einheitliche Terminologie verwendet, um die Wiederverwendbarkeit von Labels zu erhöhen und den Klassifizierungsprozess zu vereinfachen. Beispielsweise wurde ein Schaltbefehl für einen Abluftventilator allgemein als Schaltbefehl bezeichnet, sodass dieses Label auch für andere Komponenten wie Pumpen oder Ventilatoren genutzt werden konnte.

Insgesamt wurden 38.708 Datenpunkten jeweils eines von 467 verfügbaren Labels zugeordnet. Eine vollständige Übersicht der möglichen Datenpunkte und ihrer Zuordnungen zu den Entitäten ist im Anhang dokumentiert.

Bei der Klassifikation der Datenpunkte auf vierter Ebene wurde ein Natural-Language-Inference-Ansatz (NLI) angewendet (Abbildung 18). Der NLI-Ansatz verwendet den Namen und die Beschreibung eines Datenpunkts als Prämisse (Premise) und vergleicht diese mit einer Hypothese (Hypothesis). Die Hypothese besteht aus einer statischen Einleitung – *Der Datenpunkt beschreibt:* – und einem variablen *Candidate-Label*, beispielsweise *Alarmmeldung*. Das Modell lernt anschließend, vorherzusagen, ob die Hypothese zur Prämisse passt (Entailment) oder nicht (Contradiction).

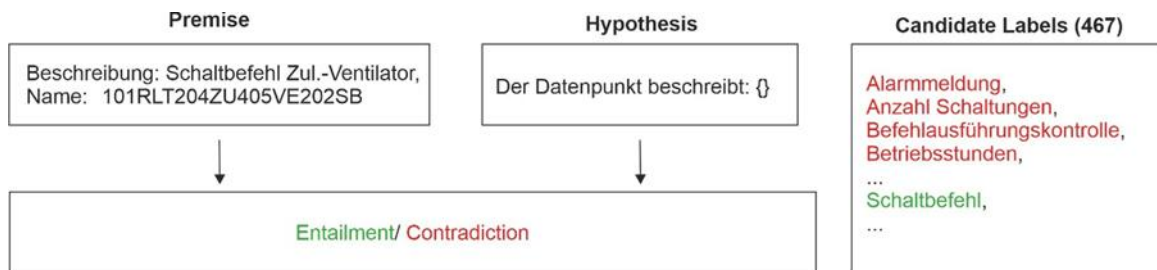


Abbildung 18: Beispiel für die entwickelte Methodik zur Klassifizierung eines Datenpunkts

Da 467 Labels berücksichtigt werden müssen, könnte jede Prämisse theoretisch mit 467 Hypothesen verglichen werden, was zu etwa 19 Millionen Trainingsbeispielen führen würde. Um die Anzahl der Trainingsdaten zu reduzieren, wurde die Anzahl der Contradictions variiert (5, 10, 20), um die optimale Menge an negativen Beispielen für ein leistungsstarkes Modell zu bestimmen.

Der vierstufige Klassifizierungsprozess ermöglicht eine Einschränkung der relevanten Candidate-Labels im Anwendungsfall. Ein Datenpunkt der Entität *Pumpe* wird beispielsweise nur mit 43 möglichen Labels verglichen (z. B. *Alarmmeldung*, *Schaltbefehl*, *Messwert Leistungsaufnahme*), anstatt mit allen 467 Labels. Diese Reduktion verringert den Rechenaufwand erheblich. Die Zuordnung der möglichen Datenpunkte zu den jeweiligen Entitäten ist im Anhang dokumentiert.

Zur Ermittlung der optimalen Modellvariante wurden mehrere Varianten für jede Klasse und Ebene trainiert. Dabei wurde untersucht, wie viele Trainingsbeispiele erforderlich sind, um einen F1-Score von 95 % bzw. 99 % zu erreichen. Zusätzlich wurden Variationen in der Anzahl an Trainingsdaten mit unterschiedlichen Epochenzahlen und

Batch-Größen kombiniert, um die Trainingsparameter weiter zu optimieren (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Variation von Hyperparametern für jeden Klassifizierungsschritt, die zum

Parameter	Grundfunktion	Unterfunktion	Entität	Datenpunkt
Anzahl Trainingsbeispiele	500, 1.000, 2.500, 5.000, 10.000, 20.000, 30.000, 43.444	500, 1.000, 2.500, 5.000, 10.000, Maximum	100, 500, 1.000, 2.500, 5.000, 10.000, Maximum	1.000, 5.000, 10.000, 25.000, 30.966
Epochen	3, 5	3, 5	3, 5	2
Batch-Size	64, 128	32, 64	8, 16, 32, 64	128
Contradictions	-	-	-	5, 10, 20

Bei der NLI-Klassifizierung auf Datenpunktebene wurden die Anzahl der Epochen und die Batch-Size konstant gehalten. Dies wurde aufgrund der hohen Anzahl an Trainingsdaten entschieden, da keine signifikanten Verbesserungen durch Variationen dieser Parameter zu erwarten waren. Stattdessen konzentrierte sich die Optimierung auf die Variation der Anzahl an Trainingsdaten und der Anzahl an Contradictions, um die besten Ergebnisse zu erzielen.

Die Daten wurden in Trainings-, Test- und Validierungssätze aufgeteilt, wobei 80 % für das Training, 10 % für Tests und 10 % für die Validierung verwendet wurden. Der F1-Score des Validierungssatzes diente dabei als Bewertungsmaßstab für die Vorhersagegenauigkeit auf unbekanntem Daten, die nicht in das Training eingeflossen waren.

Tabelle 4 zeigt eine Übersicht über die Anzahl der erforderlichen Trainingsbeispiele, um F1-Scores von 95 % oder 99 % zu erreichen. Diese Ergebnisse bieten eine Grundlage zur Bewertung der Effizienz der Trainingsstrategie und zur Identifizierung optimaler Modellkonfigurationen für verschiedene Entitäten und Klassifizierungsebenen.

Tabelle 4: Übersicht über die Anzahl der Trainingsbeispiele und anderer Hyperparameter, die zum Erreichen der angegebenen Schwellenwerte erforderlich sind

Ebene	Klasse	Modell	F1-Score	Anzahl Trainingsbeispiele
Grundfunktion	Grundfunktion	GBERT	0,95	1.000
		GBERT	0,99	10.000
		IDiS	0,95	500
		IDiS	0,99	10.000
Funktion	Wärme Versorgen	GBERT	0,95	500
		GBERT	0,99	5.000
		IDiS	0,95	500
		IDiS	0,99	5.000
Funktion	Luft Versorgen	GBERT	0,95	500
		GBERT	0,99	2.500
		IDiS	0,95	500
		IDiS	0,99	2.500
Funktion	Medien Versorgen	GBERT	0,95	610
		GBERT	0,99	-
		IDiS	0,95	-
		IDiS	0,99	-
Funktion	Kälte Versorgen	GBERT	0,95	500
		GBERT	0,99	-
		IDiS	0,95	500
		IDiS	0,99	-
Funktion	Sichern	GBERT	0,95	100
		GBERT	0,99	1.000
		IDiS	0,95	100
		IDiS	0,99	500
Komponente	Wärme Erzeugen	GBERT	0,95	100
		GBERT	0,99	1.000
		IDiS	0,95	100
		IDiS	0,99	1.000
Komponente	Wärme Verteilen	GBERT	0,95	1.000
		GBERT	0,99	15.816
		IDiS	0,95	500
		IDiS	0,99	10.000
Komponente	Luft Bereitstellen	GBERT	0,95	2.500
		GBERT	0,99	-
		IDiS	0,95	2.500
		IDiS	0,99	-
Komponente	Luft Verteilen	GBERT	0,95	500
		GBERT	0,99	2.500
		IDiS	0,95	500
		IDiS	0,99	2.500
Komponente	Kälte Erzeugen	GBERT	0,95	500
		GBERT	0,99	-
		IDiS	0,95	500
		IDiS	0,99	-

Es wurden ausschließlich Modelle für Klassen trainiert, die über mindestens 500 Trainingsbeispiele verfügten. Aufgrund einer unzureichenden Datenmenge, konnte für die Klassen *Kälte verteilen*, *Kälte speichern*, *Medien bereitstellen*, *Medien entsorgen*, *Medien verteilen* und *Medien speichern* keine Modelle trainiert werden.

Zur Analyse des durchschnittlichen Bedarfs an Trainingsbeispielen über alle Klassen hinweg, um eine Genauigkeit von 95 % bzw. 99 % zu erreichen, wurden der Median und der Mittelwert berechnet. Diese Berechnungen erfolgten separat für die Modelle gBERT und IDiS sowie für die Kombination beider Varianten.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 dargestellt. Sie liefern wichtige Hinweise auf die erforderliche Datenmenge für die Erreichung hoher Genauigkeitswerte und unterstützen die Bewertung der Skalierbarkeit der entwickelten Modelle.

Tabelle 5: Benötigte Trainingsbeispiele für Grenzwerte des F1-Scores

Modell	Mittelwert 95 %	Median 95 %	Mittelwert 99 %	Median 99 %
GBERT	107	109	828	1.217
IDiS	93	81	755	827
Kombination	100	100	791	993

Um Unterschiede zwischen den Klassifizierungsebenen auszugleichen, wurden neben dem Mittelwert auch die Mediane der Trainingsdaten berücksichtigt. Beispielsweise benötigte das gBERT-Modell für die Grundfunktion *Sichern* nur 13 Trainingsbeispiele für einen F1-Score von 95 % und 125 Beispiele für 99 %. Dies ist darauf zurückzuführen, dass innerhalb der Klasse *Sichern* etwa 95 % der Datenpunkte auf die *Brand-schutzklappe* entfallen. Im Gegensatz dazu erfordert die Klasse *Wärme verteilen* deutlich mehr Trainingsdaten, um vergleichbare Genauigkeitswerte zu erzielen.

Ein Vergleich zwischen den gBERT- und IDiS-Modellen zeigt, dass die IDiS-Modelle im Durchschnitt weniger Trainingsdaten benötigen, um 95 % bzw. 99 % Genauigkeit zu erreichen. Dies deutet darauf hin, dass die Erweiterung des Pretrainings auf deutschen Normen zu einer besseren Anpassung an technische Domänen führt.

Ein kombinierter Median beider Modelltypen liefert eine praktische Einschätzung der erforderlichen Datenpunkte. Für einen F1-Score von 95 % werden etwa 100 Daten-

punkte pro Label und Klasse benötigt, während für 99 % rund 1.000 Datenpunkte erforderlich sind. Auffällig ist, dass zur Steigerung des F1-Scores um vier Prozentpunkte die Anzahl der Trainingsdaten verzehnfacht werden muss.

Da vollständig automatisierte TMon-Anwendungen nahezu 100 % Genauigkeit erfordern, ist ein deutlich erhöhter Aufwand für den initialen Labelingprozess notwendig. Dies stellt eine wichtige Voraussetzung für die spätere Skalierbarkeit solcher Anwendungen dar.

Im Folgenden Kapitel wird die Abbildung 19 eingefügt, die die Beziehung zwischen der Anzahl der Trainingsbeispiele und der Steigerung des F1-Scores am Beispiel der Grundfunktionen des gBERT-Modells zeigt und den nichtlinearen Zusammenhang zwischen Trainingsdaten und Modellleistung verdeutlicht.

6.2.3. Training und Evaluation der Modelle

Für das Finetuning wurde zunächst ein geeignetes Pretrained Language Model (PLM) ausgewählt. Da der Datensatz aus deutschen Namen und Beschreibungen besteht, wurden ausschließlich deutsche Modelle berücksichtigt. Basierend auf Tests mit einem Ausschnitt des Datensatzes wurde das gBERT-base-Modell gewählt, da es die besten Ergebnisse erzielte. Dieses Modell basiert auf einer BERT-Architektur und ist ein Encoder-Modell, das sich besonders für Klassifizierungsaufgaben wie Text Classification (TC) eignet. Um die Vorhersagegenauigkeit weiter zu verbessern, wurde ein erweitertes Pretraining auf domänenspezifischen Texten durchgeführt. Während das gBERT-base-Modell auf allgemeinen Texten wie Wikipedia trainiert wurde und daher nur grundlegende technische Kenntnisse besitzt, erfolgte im Rahmen eines Projekts mit den Verbänden DIN und VDE ein zusätzliches Training auf rund 25.000 DIN-Normen und 7.000 VDE-Richtlinien. Das daraus entstandene Modell, bezeichnet als IDiS, wurde als Vergleichsvariante zu gBERT-base herangezogen. Die Modelle für die ersten drei Klassifikationsebenen (Grundfunktion, Unterfunktion und Entität) wurden mittels *Text-Classification* trainiert. Für die letzte Ebene, die Datenpunktebene, kam ein NLI-Ansatz zum Einsatz. Diese Anpassung war notwendig, da für die 111 möglichen Entitäten in der dritten Klassifikationsebene (siehe Tabelle 2) andernfalls jeweils ein separates Modell trainiert werden müsste. Zudem zeigte sich, dass die Datenpunkte ungleichmäßig verteilt sind. Beispielsweise wurden der Entität Heizkreis allgemein 3.734 Datenpunkte zugeordnet, während die Entität Abluftklappe nur 87 Datenpunkte

aufweist. Aufgrund dieser Ungleichverteilung wären viele Modelle für unterrepräsentierte Entitäten nicht ausreichend trainierbar gewesen. Der NLI-Ansatz ermöglichte dagegen die Nutzung eines einzigen Modells, das flexibel für alle Entitäten eingesetzt werden kann. Abbildung 19 illustriert den Ansatz und die Integration der NLI-Methode in den Klassifizierungsprozess.

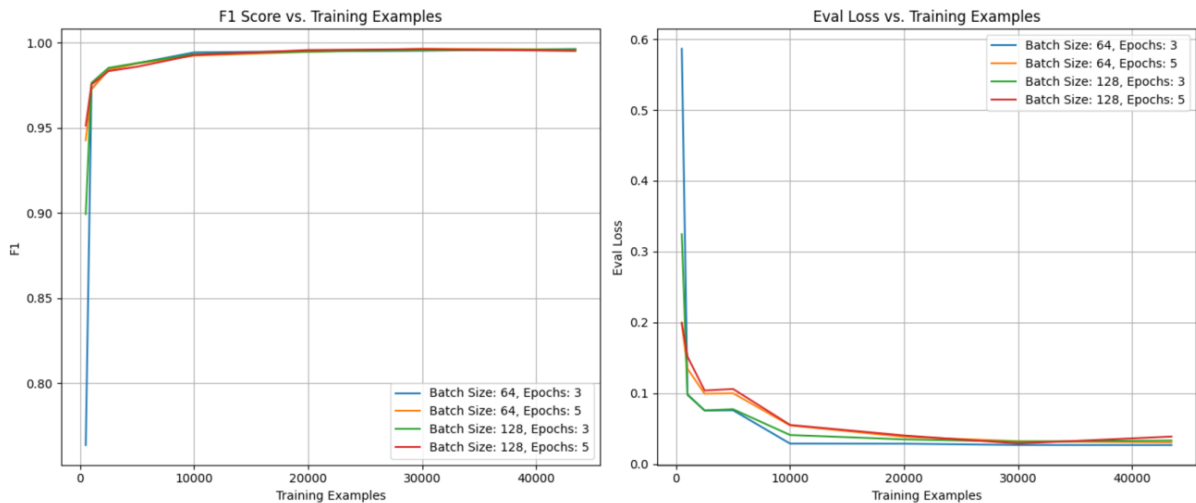


Abbildung 19: Entwicklung des F1-Score und Evaluation-Loss in Kombination mit zunehmender Anzahl von Trainingsbeispielen (gBERT Grundfunktionen)

Die linke Seite der Abbildung zeigt den Verlauf des F1-Scores in Abhängigkeit von der Anzahl der Trainingsbeispiele. Zu Beginn steigt der F1-Score bei einer Erhöhung der Trainingsdaten stark an, was auf die Hohe Anpassungsfähigkeit der Modelle bei kleinen Datenmengen hinweist. Ab etwa 10.000 Trainingsbeispielen verlangsamt sich der Anstieg dagegen deutlich, und weitere Verbesserungen sind nur noch geringfügig erkennbar.

Ein ähnliches Verhalten zeigt der Evaluation-Loss (Verlustfunktion). Während der Verlust zunächst stark abnimmt, flacht dieser Rückgang mit zunehmender Anzahl an Trainingsdaten ab. Dies deutet darauf hin, dass ab einem bestimmten Punkt zusätzliche Trainingsdaten keine signifikanten Verbesserungen mehr liefern.

Die Ergebnisse der unterschiedlichen Modelle (IDiS und gBERT) in Bezug auf F1-Scores und Evaluation-Loss sind im Anhang dokumentiert.

Für die Klassifikation der Datenpunkte wurde der NLI-Trainingsansatz verwendet. Abbildung 20 zeigt, dass der F1-Score in Abhängigkeit von der Anzahl der Trainingsbeispiele und der Anzahl der Contradictions variiert. Dabei führte eine Erhöhung sowohl der Trainingsdaten als auch der Contradictions zu besseren Ergebnissen, wobei sich

insbesondere bei geringeren Datenmengen eine stärkere Sensitivität gegenüber diesen Parametern beobachten ließ.

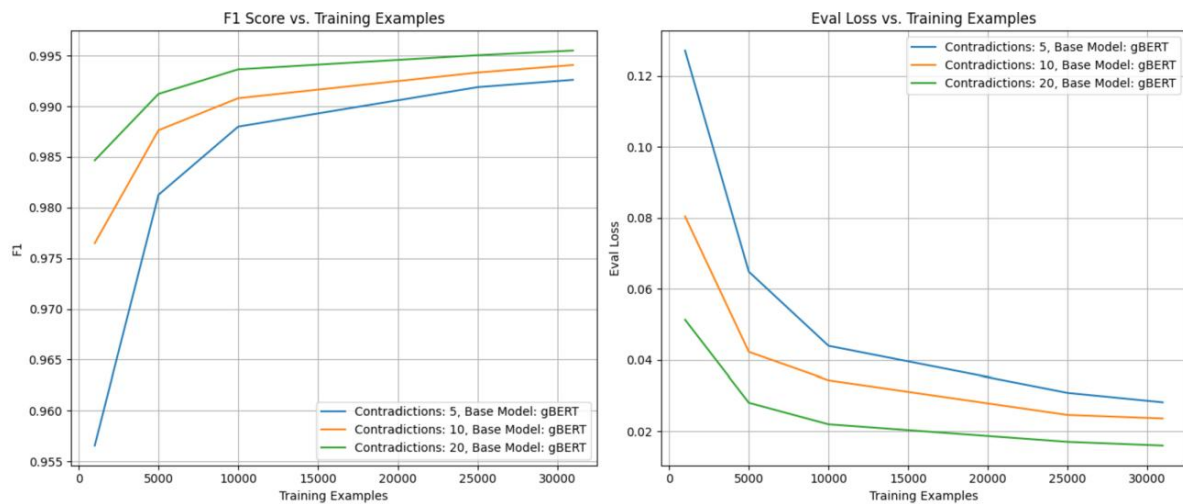


Abbildung 20: Entwicklung des F1-Score und Evaluation-Loss in Kombination mit zunehmender Anzahl von Trainingsbeispielen (gBERT Datenpunkte)

Die Abbildung zeigt, dass eine Erhöhung der Anzahl an Trainingsbeispielen und Contradictions zu verbesserten Ergebnissen führt. Bereits mit 1.000 Trainingsdaten lässt sich ein F1-Score von 95 % erzielen. Für eine Steigerung auf 99 % sind jedoch deutlich mehr Datenpunkte erforderlich. Besonders die Erhöhung der Contradictions trägt zur Verbesserung des F1-Scores bei. Über den gesamten Trainingsverlauf hinweg lieferten Modelle mit 20 Contradictions die besten Ergebnisse, während 5 Contradictions die schwächsten Resultate erzielten.

Innerhalb aller Klassifizierungsebenen zeigt sich eine ungleiche Datenverteilung. Häufig vertreten sind beispielsweise die Klassen *Wärme versorgen* (22.540 Datenpunkte) und *Luft versorgen* (14.849 Datenpunkte) in der Grundfunktionsebene, während die Klasse *Medien versorgen* nur 736-mal vorkommt. Um dieser Unausgeglichenheit entgegenzuwirken, wurde der F1-Score als Metrik gewählt, da er im Gegensatz zur Genauigkeit die Verteilung der Datenpunkte berücksichtigt und robuster gegenüber unausgewogenen Datensätzen ist.

Der Datensatz basiert auf realen Gebäuden und spiegelt somit typische Gegebenheiten wider. Dennoch wurden zusätzliche Versuche unternommen, um die Auswirkungen einer gleichmäßigeren Verteilung der Daten auf die Vorhersagegenauigkeit zu untersuchen. Hierfür wurde die Methode des Undersampling verwendet. Dabei wurden die vorhandenen Daten auf die Anzahl der am wenigsten vertretenen Kategorie skaliert, um einen ausgewogenen Datensatz zu erzeugen.

Für jeden Modelltyp wurden Trainingsläufe mit maximal 50, 100 und 200 Trainingsbeispielen pro Kategorie durchgeführt. Allerdings standen nicht in allen Klassen ausreichend Datenpunkte zur Verfügung. Beispielsweise enthält die Klasse *Transport* nur 15 Datenpunkte (davon 12 im Trainingsdatensatz). Entsprechend wurden die Versuche in der Grundfunktionsebene mit 362 ($7 \times 50 + 12$ für *Transport*), 712 und 1.412 Datenpunkten durchgeführt.

Ein ähnliches Vorgehen wurde auf den weiteren Klassifizierungsebenen angewandt, wobei Klassen mit unzureichender Datenmenge entsprechend angepasst wurden. Die Ergebnisse dieser Tests sind in Tabelle 6 dokumentiert und bieten detaillierte Einblicke in die Auswirkungen von Datensatzgrößen und Ausgleichsmethoden auf die Modellleistung.

Tabelle 6: Ergebnisse für den Validierungsdatensatz des *undersampled Ansatzes* mit 50, 100 und 200 Beispielen pro Klasse

Ebene lassifikation	Datensatz	Basismodell	F1-Score in %, max. 50 Beispiele pro Klasse (Trainings- beispiele)	F1-Score in %, max. 100 Beispiele pro Klasse (Trainings- beispiele)	F1-Score in %, max. 200 Bei-spiele pro Klasse (Trainingsbei- spiele)	
Grund- funktion	Grundfunktion	gBERT-base	90,83 (362)	94,13 (712)	96,18 (1.412)	
		IDiS	93,70 (362)	93,86 (712)	96,74 (1.412)	
Unter- funktion	Wärme versorgen	gBERT-base	90,50 (200)	96,17 (400)	97,08 (733)	
		IDiS	91,72 (200)	95,82 (400)	97,37 (733)	
	Luft versorgen	gBERT-base	81,08 (100)	93,18 (200)	96,09 (400)	
		IDiS	85,59 (100)	93,93 (200)	96,41 (400)	
	Medien versorgen	gBERT-base	80,68 (188)	88,13 (303)	92,35 (403)	
		IDiS	90,25 (188)	93,84 (303)	93,84 (403)	
	Kälte versorgen	gBERT-base	94,30 (112)	97,73 (212)	97,73 (412)	
		IDiS	92,01 (112)	96,97 (212)	98,48 (412)	
	Sichern	gBERT-base	98,23 (193)	99,23 (337)	99,52 (537)	
		IDiS	95,79 (193)	99,44 (337)	99,70 (537)	
	Entität/ Komponente	Wärme erzeugen	gBERT-base	97,30(209)	97,30 (359)	99,09 (659)
			IDiS	97,76 (209)	96,90 (359)	99,09 (659)
		Wärme verteilen	gBERT-base	92,63 (540)	96,35 (1.020)	97,65 (1.920)
			IDiS	95,9 (540)	96,92 (1.020)	97,74 (1.920)
Luft bereitstel- len		gBERT-base	89,94 (982)	93,63 (1.788)	95,73 (2.797)	
		IDiS	93,30 (982)	94,43 (1.788)	96,10 (2.797)	
Luft verteilen		gBERT-base	90,70 (237)	98,89 (403)	99,18 (703)	
		IDiS	97,75 (237)	99,19 (403)	99,43 (703)	
Kälte erzeugen		gBERT-base	94,08 (293)	98,02 (367)	98,02 (467)	
		IDiS	94,43 (293)	96,60 (367)	98,02 (467)	

Für die verschiedenen Modelle wurden drei Epochen und eine Batch-Size von 8 oder 16 verwendet. Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit zwischen dem Originaldatensatz und dem angepassten Datensatz blieb der Validierungsdatsatz unverändert.

Die Trainingsdurchläufe bestätigten die Ergebnisse der vorherigen Untersuchungen: Um einen F1-Score von 95 % zu erreichen, wird sowohl im Originaldatensatz als auch im angepassten Datensatz eine ähnliche Anzahl an Trainingsdaten benötigt. Dies deutet darauf hin, dass die erzielten guten Resultate nicht durch die ursprüngliche, unausgeglichene Verteilung der Datenpunkte beeinflusst wurden.

Ein Blick auf die Ergebnisse der verschiedenen Klassifizierungsstufen zeigt, dass für alle Stufen eine vergleichbare Menge an Trainingsbeispielen erforderlich ist, um einen Score von 95 % zu erzielen. Zudem bestätigen die Daten, dass das IDiS-Modell, das durch Pretraining auf deutschen Normen erweitert wurde, im Durchschnitt schneller zu besseren Ergebnissen führt.

Mit zunehmender Anzahl an Trainingsdaten nähern sich jedoch die Leistungen der IDiS- und gBERT-Modelle an, was auf eine Konvergenz der Ergebnisse bei größeren Datensätzen hinweist. Dies verdeutlicht, dass das erweiterte Pretraining insbesondere bei kleineren Datensätzen Vorteile bietet, während bei umfangreichen Trainingsdaten die Unterschiede zwischen den Modellen geringer ausfallen.

Die Ergebnisse des angepassten Datensatzes belegen somit, dass die Klassifizierungsmodelle robust gegenüber Datenverteilungen sind und auch auf ausgeglichenen Datensätzen hohe Genauigkeiten erzielen. Tabelle 7 enthält eine Übersicht der besten Modelle pro Klassifizierungsaufgabe, einschließlich der jeweiligen Trainingsparameter und Ergebnisse.

Tabelle 7: Übersicht der besten Modellvarianten

Ebene	Klasse	Modell	Anzahl Trainingsbeispiele	Epochen	Batchgröße	F1-Score
Grundfunktion	Grundfunktion	GBERT	43.300	3	128	99,69%
		IDiS	43.300	3	64	99,63%
Funktion	Wärme Versorgen	GBERT	18.032	3	32	99,60%
		IDiS		3	64	99,65%
Funktion	Luft Versorgen	GBERT	11.879	3	64	99,39%
		IDiS		3	32	99,80%
Funktion	Medien Versorgen	GBERT	588	3	8	95,88%
		IDiS		3	8	93,13%
Funktion	Kälte Versorgen	GBERT	1055	5	16	98,48%
		IDiS		3	64	97,72%
Funktion	Sichern	GBERT	5.000	3	32	99,32%
		IDiS		3	64	99,82%
Komponente	Wärme Erzeugen	GBERT	1.718	3	32	99,53%
		IDiS		3	32	99,53%
Komponente	Wärme Verteilen	GBERT	15.806	3	32	99,15%
		IDiS		3	32	99,03%
Komponente	Luft Bereitstellen	GBERT	9.065	3	32	98,84%
		IDiS		3	64	98,58%
Komponente	Luft Verteilen	GBERT	2.814	3	64	99,70%
		IDiS		3	8	99,70%
Komponente	Kälte Erzeugen	GBERT	650	3	64	98,54%
		IDiS		3	64	98,54%
Datenpunkte	Datenpunkte	GBERT	30.966	2	128	99,55%
		IDiS		2	128	99,53%

Für jede Klasse konnte mindestens ein Modell mit einem F1-Score von über 95 % trainiert werden. Mit Ausnahme der Klasse *Medien versorgen* erreichten alle anderen Klassen sogar Werte von über 98 %.

Neben der Analyse der notwendigen Trainingsbeispiele wurden in den Experimenten auch die Anzahl der Epochen und die Größe der Batch-Size untersucht. Dabei zeigte sich, dass drei Epochen in den meisten Fällen ausreichten, um optimale Ergebnisse zu erzielen. Ein längeres Training mit fünf Epochen führte in einigen Fällen zu schlechteren Ergebnissen, was auf eine Überanpassung (Overfitting) der Modelle auf den Trainingsdatensatz hindeutet.

Bei der Auswahl der Batch-Size ergab sich der Trend, dass größere Trainingssätze auch größere Batch-Sizes erlauben, um gute Ergebnisse zu erzielen. Dies deutet auf eine bessere Verarbeitung größerer Datenmengen bei entsprechend angepasster Batch-Size hin.

Ein Vergleich der gBERT- und IDiS-Modelle zeigt insgesamt nur geringe Unterschiede in der Vorhersagegenauigkeit. Während gBERT bei Kategorien wie *Grundfunktion* oder *Wärme verteilen* leicht bessere Ergebnisse lieferte, schnitt IDiS in Bereichen wie *Luft versorgen* oder *Sichern* etwas besser ab.

Besonders bei kleineren Datensätzen bewies das IDiS-Modell, das auf domänenspezifischen Normtexten vortrainiert wurde, Vorteile. Aus Tabelle 7 geht hervor, dass IDiS bei wenigen Trainingsbeispielen bessere Ergebnisse als gBERT erzielte. Dieser Vorteil nahm jedoch mit zunehmender Anzahl an Trainingsbeispielen ab oder verschwand ganz. Dies bestätigt, dass ein erweitertes Pretraining vor allem dann sinnvoll ist, wenn nur begrenzte Daten für das Finetuning zur Verfügung stehen.

Zur Visualisierung der Verteilung von korrekt und fehlerhaft klassifizierten Daten wurden für jedes Modell Wahrheitsmatrizen erstellt. Beispieldarstellungen für die Stufe *Grundfunktion* (gBERT) und *Wärme verteilen* (IDiS) sind in Abbildung 21 und Abbildung 22 zu sehen. Weitere Matrizen für andere Modelle sind im Anhang dokumentiert

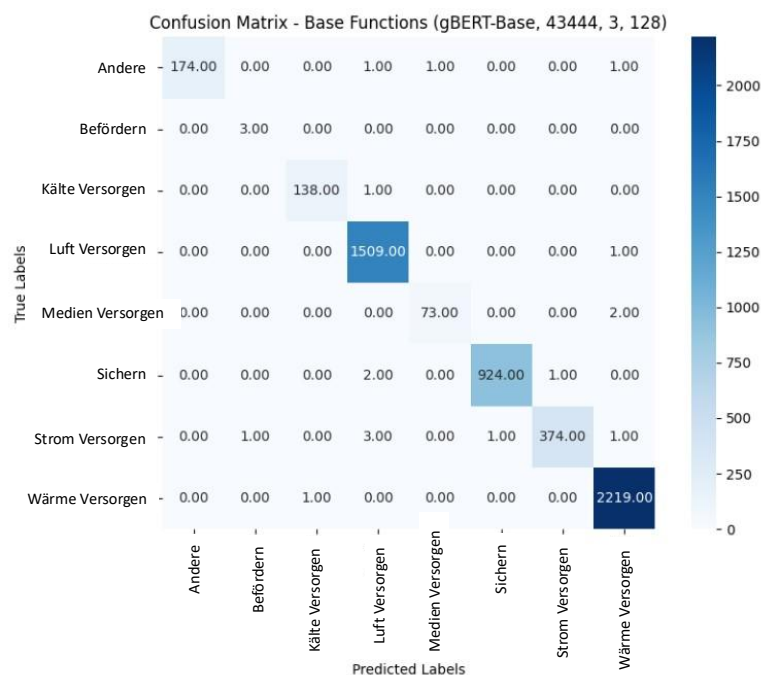


Abbildung 21: Konfusionsmatrix Grundfunktion gBERT Modell

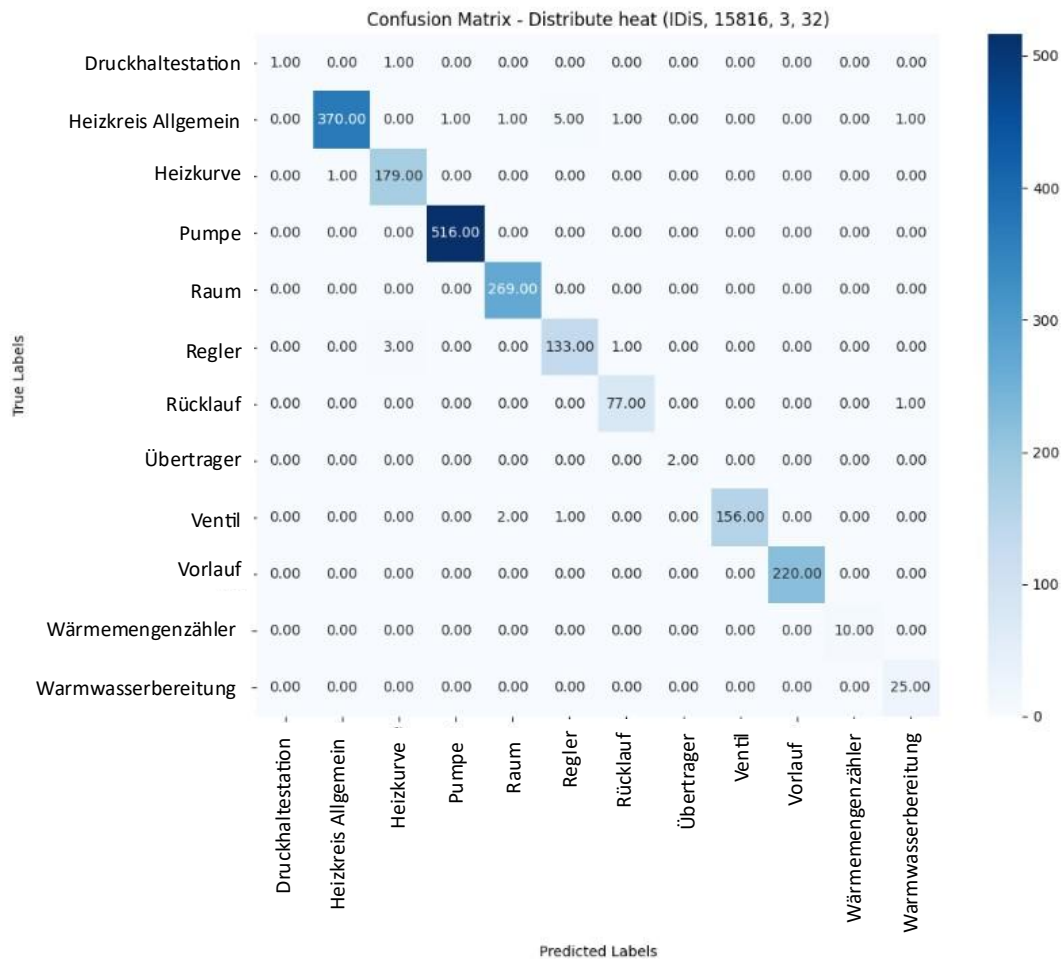


Abbildung 22: Konfusionsmatrix Wärme Verteilen IDiS-Modell

Die Ergebnisse werden durch die beiden beispielhaften Wahrheitsmatrizen belegt. Fast alle Datenpunkte im Validierungssatz wurden korrekt ihren jeweiligen Klassen zugeordnet. Nur vereinzelt traten Fehlklassifizierungen auf, die jedoch keinen signifikanten Einfluss auf die Gesamtergebnisse hatten. Die Evaluierungsdaten bestanden aus gemischten Datenpunkten der Stadt Köln und Hamburg, um eine möglichst heterogenen Testbasis zu gewährleisten. Trotzdem besitzen die Datenpunkte im Vergleich zur Praxis eine hohe Homogenität. Die Generalisierungsfähigkeit der trainierten Modelle wurde nur im Rahmen der vorliegenden Datenpunkte analysiert und kann in weiterführenden Untersuchungen vertieft werden.

Die trainierten Modelle bieten damit eine verlässliche Grundlage für die semantische Interoperabilität zwischen Systemen. Sie ermöglichen eine präzise und automatisierte Verarbeitung von Datenpunkten und tragen wesentlich zur nahtlosen Integration von Verwaltungsschalen in TMon-Anwendungen bei. Durch die hohe Vorhersagegenauig-

keit der Modelle wird nicht nur der manuelle Aufwand bei der Systemkonfiguration reduziert, sondern auch die Grundlage für die skalierbare und flexible Anwendung in heterogenen Systemumgebungen geschaffen.

6.2.4. Nutzung von Metadaten

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts wurde die Nutzung von Metadaten zur Unterstützung der Klassifikation von Automatisierungsdaten nicht weiterverfolgt, weil die Ergebnisse der NLP-basierten Klassifikation bereits hinreichend genau genug waren. Dennoch zeigen aktuelle Studien deutlich, dass, falls notwendig, der Einbezug von Metadaten die Genauigkeit bei der semantischen Klassifikation technischer Systeme erhöhen kann.

In [21] wird ein Verfahren zur automatisierten semantischen Zuordnung von digital repräsentierten Komponenten vorgestellt, bei dem sowohl semantische Attribute als auch Metadaten wie physikalische Einheit, Datentyp oder Lebenszyklusstatus berücksichtigt werden. Durch die Kombination eines vortrainierten Sprachmodells mit einem *Decision-Tree* zur Metadatenklassifikation, konnte die Klassifikationsgenauigkeit von ca. 70 % auf 85,8 % gesteigert werden. In Bezug auf die entwickelte NLP-basierte Klassifikation könnte Metadatenklassifikation in zukünftigen Forschungsarbeiten dazu eingesetzt werden, die Auswahl der möglichen Klassifikationsklassen einzugrenzen. Beispielweise könnte die Metainformation Datentyp (Analog/Binär) dafür verwendet werden, um zu identifizieren, ob es sich bei einem Datenpunkt um einen Messwert handeln kann. Ein weiteres Beispiel ist die Nutzung von Metainformationen wie „Konstanter Wert“ vs. „Variabler Wert“, mit Hilfe derer zwischen Soll- und Ist-Werten unterschieden werden kann. Eine Integration entsprechender Methoden könnte bei besonders heterogenen Datenbeständen den Aufwand die Klassifikationsgenauigkeit verbessern.

6.2.5. Verhaltensanalyse von Zeitreihendaten

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts wurde die Nutzung von Zeitreihendaten zur automatisierten Klassifikation von Datenpunkten in gebäudetechnischen Systemen nicht weiterverfolgt, weil die Ergebnisse der NLP-basierten Klassifikation bereits hinreichend genau genug waren. Dennoch belegen aktuelle Forschungsarbeiten, dass Zeitreihen ein großes Potenzial für die Klassifikation von Datenpunkten in der TGA besitzen. In einer Übersichtsarbeit [22] werden verschiedene KI-basierte Methoden zur Typklassifikation und Beziehungsinferenz auf Basis von Zeitreihendaten

aus der Gebäudeautomation analysiert. Die Autoren zeigen, dass sich durch statistische Merkmale wie Mittelwert, Varianz oder Saisonalität, Informationen über die Funktion, das Medium oder die Systemzugehörigkeit eines Datenpunkts extrahieren lassen. Die Klassifikationsgenauigkeit hängt jedoch stark von der Datenlänge, der Anzahl an Trainingsbeispielen und der Saisonalität ab. Zudem wird betont, dass eine effektive Klassifikation ohne die zusätzliche Kenntnis physikalischer Einheiten, wie z. B. Temperatur in °C oder Volumenstrom in m³/h, kaum möglich ist. Dies verdeutlicht, dass Zeitreihenmodelle zwar prinzipiell zur Strukturierung und semantischen Anreicherung von TGA-Daten beitragen können, ihre praktische Anwendung jedoch weiterhin von der Qualität und Vollständigkeit begleitender Metadaten abhängt. Zukünftige Arbeiten sollten daher die Kombination von Zeitreihenauswertung mit verfügbaren Metainformationen gezielt untersuchen.

Zur Verdeutlichung der theoretischen Methodik ist in Abbildung 23 eine exemplarische Zeitreihe dargestellt. Der Verlauf weist ein typisches Verhalten für eine Anlage mit Nachtabsenkung auf (abgesenkter Verlauf in der Nacht). Unter Berücksichtigung der Einheit Grad Celsius (°C) wird deutlich, dass es sich bei der Zeitreihe um einen Temperaturverlauf im Bereich von 21 bis 22,5°C handelt. Der Temperaturbereich lässt vermuten, dass es sich bei dem zur Zeitreihe gehörenden Datenpunkt, um eine Raumtemperatur handelt. Diese Art der Analyse lässt sich mit ausreichend manuell klassifizierten Zeitreihen als Trainingsdaten auch durch KI-Modelle erlernen. Auf diese Weise lassen sich Datenpunkte durch Verhaltensanalysen automatisiert klassifizieren.



Abbildung 23: Exemplarische Verhaltensanalyse

6.3. Digitale Zwillinge technischer Systeme als Grundlage für ein technisches Monitoring

Dieses Kapitel bietet eine detaillierte Darstellung der Entwicklung digitaler Zwillinge, die die Informationen des KI-Algorithmus als Grundlage für TMon bereitstellt. Als standardisierter digitaler Zwilling wird die Industrie 4.0 Verwaltungsschale verwendet. Konkret wird ein Teilmodell für Verwaltungsschalen entwickelt, welches die Ergebnisse des KI-Algorithmus bereitstellt. Darauf aufbauend wird die Ableitung relevanter Strukturinformationen und die Integration zusätzlicher Teilmodelle zur Erfassung von Betriebsinformationen sowie TMon-Daten beschrieben.

6.3.1. Teilmodell NLP Classification Result

Die trainierten NLP-Modelle werden in eine NLP-Pipeline integriert, um im laufenden Betrieb Daten aus dem BACnet-Datapoints-Information-Teilmodell zu klassifizieren. Die Pipeline gibt bei diesem Prozess das Teilmodell NLP-Classification-Result aus, welches die Ergebnisse der Klassifizierung enthält.

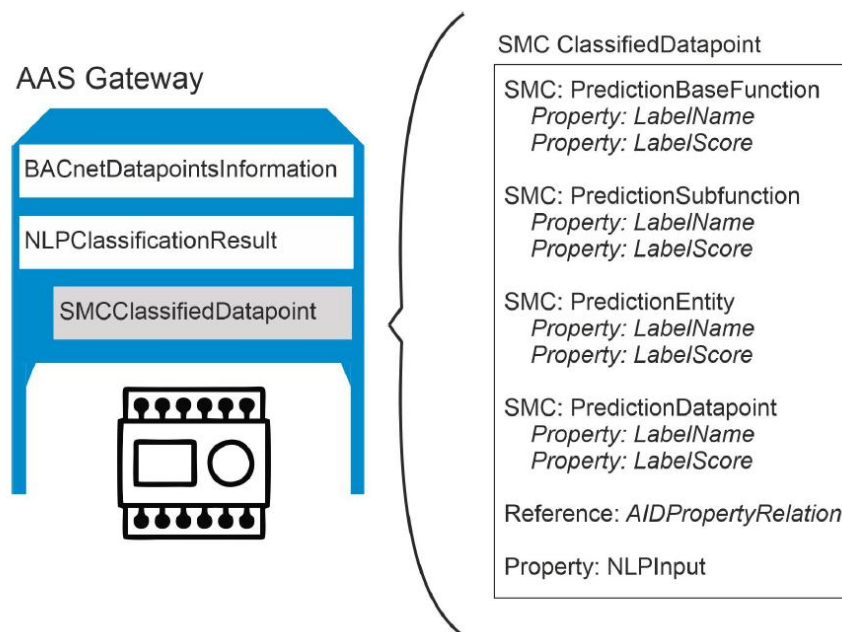


Abbildung 24: Visualisierung des Teilmodells NLP Classification Result

Im Rahmen der entwickelten NLP-Pipeline wird für jeden Datenpunkt das *BACnet-Datapoints-Information-Teilmodells* eine strukturierte Repräsentation der Klassifikationsergebnisse erstellt. Diese wird im *NLP-Classification-Result-Teilmodell* als *SMC Classified-Datapoint* abgelegt (Abbildung 24). Die folgende Beschreibung erläutert die Struktur und Funktionalität dieser Klassifikationseinheiten im Detail.

Struktur der SMC Classified-Datapoint:

Jeder *SMC Classified-Datapoint* dient als zentrale Einheit zur Speicherung der Klassifikationsergebnisse und enthält 2 Aspekte:

1. Referenz zur Datenquelle:

Über die AID-Property-Relation wird eine direkte Verknüpfung zur entsprechenden Sammlung im *BACnet-Datapoints-Information-Teilmodell* hergestellt. Dies gewährleistet eine konsistente Rückverfolgbarkeit der Ursprungsdaten.

2. Hierarchische Unterstruktur:

Der *Classified-Datapoint* umfasst vier zusätzliche SMCs, die die Ergebnisse der einzelnen NLP-Klassifikationsebenen hierarchisch abbilden:

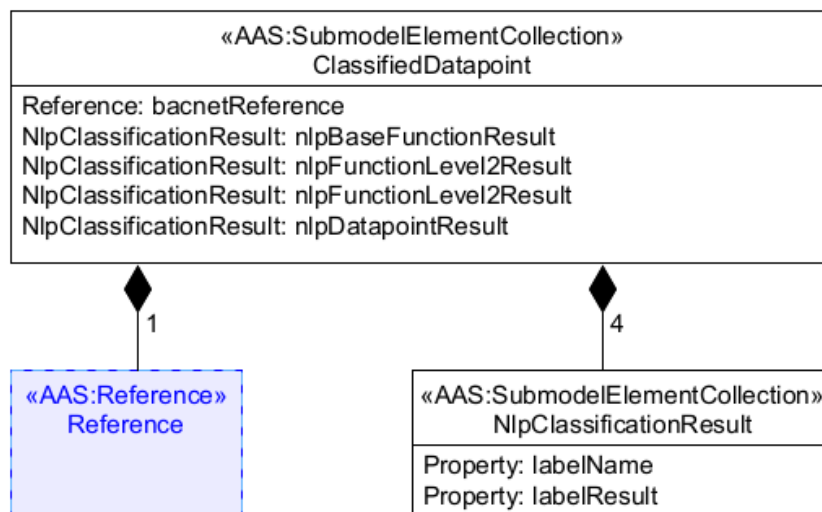


Abbildung 25: SubmodelElementCollection "ClassifiedDatapoint"

In der nachfolgenden Tabelle 8 werden die vier SMCs *PredictionBaseFunction*, *PredictionSubfunction*, *PredictionEntity* und *PredictionDatapoint* hinsichtlich semantischer Beschreibung und Informationsgehalt beschrieben.

Tabelle 8: Aufbau eines NLP-ClassificationResults

Level	Beschreibung	Inhalt
Grundfunktion	Speichert die vorhergesagte Grundfunktion (z. B. Wärmeversorgung oder Luftversorgung).	<ul style="list-style-type: none"> • Label-Name: Der Name der vorhergesagten Klasse. • Label-Score: Der numerische Wahrscheinlichkeitswert für die Vorhersage (z.B. 0,98).
Funktionsebene	Verfeinert die Grundfunktion in spezifische Teilfunktionen (z. B. Wärmeerzeugung oder Luftbereitstellung).	<i>analog zur Grundfunktion</i>
Komponentenebene	Ordnet den Datenpunkt einer konkreten Komponente zu (z. B. Kessel oder Wärmepumpe).	<i>analog zur Grundfunktion</i>
Datenpunktebene	Klassifiziert spezifische Parameter oder Messwerte innerhalb der Komponente (z. B. Temperaturmesswert oder Schal-befehl).	<i>analog zur Grundfunktion</i>

Prozessintegration und Verknüpfung

Die durch die NLP-Pipeline erstellten Ergebnisse sind nicht isoliert, sondern tief in die digitale Zwillingsstruktur integriert. Dies wird durch die Verknüpfung der Classified-Data-point-SMCs mit dem BACnet-Datapoints-Information-Teilmodell über die AID-Property-Relation erreicht. Dadurch können Anwendungen direkt auf die Klassifikationsergebnisse zugreifen und diese beispielsweise für Überwachungs- und Steuerungssysteme verwenden. Ein BACnet-Datenpunkt mit dem Namen "*Heizkreis1_TempSoll*" könnte im NLP-Classification-Result-Teilmodell beispielsweise folgendermaßen strukturiert sein:

- **Grundfunktion:** Wärmeversorgung (Score: 0,99)
- **Funktionsebene:** Wärmeerzeugung (Score: 0,97)
- **Komponentenebene:** Kessel (Score: 0,95)
- **Datenpunktebene:** Sollwert-Temperatur (Score: 0,98)

6.3.2. Generierung Strukturinformationen

Neben der beschriebenen AAS der Automationsstation, die Teilmodelle mit Informationen zu den BACnet-Datenpunkten und den Klassifikationsergebnisse der NLP-Pipeline enthält, werden weitere AAS zur Abbildung von Strukturinformationen benötigt (Abbildung 26).

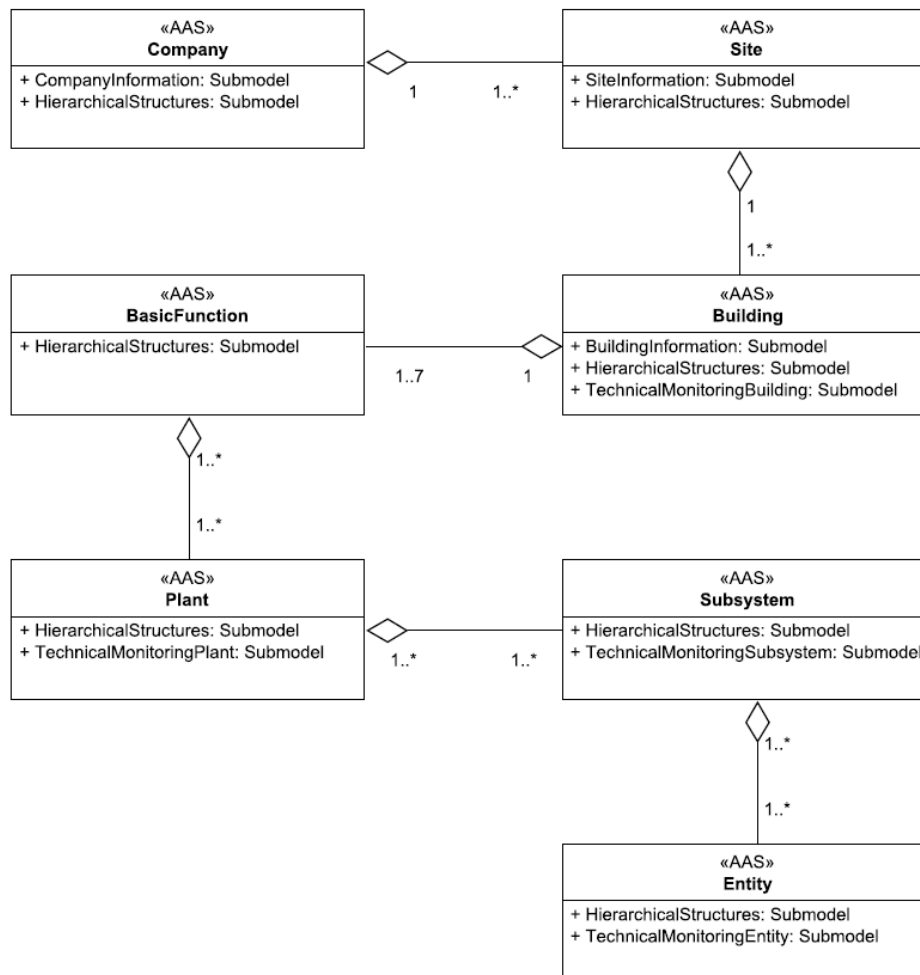


Abbildung 26: Überblick über das entwickelte Konzept für Strukturinformationen

Die ersten drei AAS bilden Unternehmen, Standorte und Gebäude ab. Zur Strukturierung der Informationen dieser drei Ebenen wurden spezifische Teilmodelle entwickelt: Company-Information, Site-Information und Building-Information. Das IDTA-Teilmodell Hierarchical-Structures ermöglicht es, hierarchische Beziehungen zwischen den Verwaltungsschalen abzubilden. Mit diesem Teilmodell können Gebäude einem Standort und Standorte einem Unternehmen klar zugeordnet werden. Die Erstellung dieser Verwaltungsschalen erfolgt manuell durch den Nutzer der Anwendung.

Das NLP-Classification-Result-Teilmodell ist direkt den Verwaltungsschalen der jeweiligen Automationsstation zugeordnet. Zur Ableitung von Strukturinformationen werden die Teilmodelle aller Stationen innerhalb eines Gebäudes herangezogen. Für jede im Gebäude identifizierte Grundfunktion wird eine separate AAS erstellt. Wenn beispielsweise die Klassifizierungsergebnisse Grundfunktionen für die Versorgung mit Luft und Wärme ausweisen, werden dafür jeweils zwei AAS erzeugt.

Darüber hinaus werden AAS für die Klassen Anlage, Teilanlage und Entität basierend auf den Klassifizierungsergebnissen erstellt. Verfügt ein Gebäude beispielsweise über drei separate Heizungssysteme, werden drei AAS des Typs Anlage benötigt. Jede Anlage kann mehrere Teilanlagen umfassen, die funktional miteinander verbunden sind. Bei einem Heizungssystem können Teilanlagen beispielsweise Wärmeerzeuger oder Verteilkreise darstellen.

Die Teilanlagen setzen sich wiederum aus Entitäten zusammen. Diese können sowohl physische Komponenten wie Pumpen oder Ventile als auch Bereiche innerhalb der Anlagen, etwa Vorlauf- und Rücklaufsektionen, repräsentieren. Der hierarchische Aufbau der AAS und die daraus abgeleiteten Beziehungen werden durch den NLP-Algorithmus automatisiert generiert.

Der Algorithmus ist in der Lage, Grundfunktionen, die nächste Funktionsebene, Entitäten und zugehörige Datenpunkte zu klassifizieren. Die Zuordnung von Teilanlagen zu übergeordneten Anlagen erfolgt derzeit jedoch noch nicht automatisiert. Für diese Funktionalität sind zusätzliche Modelle erforderlich. Betriebsinformationen und Monitoring-Daten werden in den Teilmodellen Operating-Information und Technical-Monitoring gespeichert, die die Grundlage für die weiteren Analysen bilden.

6.3.3. Teilmodelle Operating Information

Die Teilmodelle BACnet-Datapoints-Information und NLP-Classification-Result dienen der Bereitstellung, Klassifikation und Darstellung von Datenpunkten eines Gebäudes innerhalb von Verwaltungsschalen. Nach der Klassifikation erfolgt die Zuordnung dieser Daten zu den jeweiligen Anlagen und Systemen.

Das Teilmodell Operating-Information spezifiziert, welche Datenpunkte aus den zuvor erstellten Teilmodellen übernommen und integriert werden. Sofern in einem vorherigen

Schritt beispielsweise mehrere Pumpen identifiziert wurden, wird für jede dieser Pumpen ein eigenes Teilmodell des Typs Operating-Information-Pump erstellt. Dieses Modell enthält alle relevanten Informationen, die für die jeweilige Pumpe erforderlich sind.

Die Instanzen dieser Teilmodelle werden dabei durch die Informationen ergänzt, die in den NLP-Classification-Result-Teilmodellen vorliegen. Wurden etwa Betriebsstunden, Schaltbefehle und Betriebsrückmeldungen für eine bestimmte Pumpe zugeordnet, dann werden ausschließlich diese Daten im entsprechenden Teilmodell Operating-Information-Pump erfasst.

Im Zuge dieses Prozesses entstehen somit mehrere individuelle Teilmodelle, deren Inhalte sich an den bereitgestellten Informationen orientieren und entsprechend variieren. Auf diese Weise verfügen die Komponenten und Anlagen über spezifische Betriebsinformationen, die für die weitere Verarbeitung und Analyse bereitgestellt werden können.

6.3.4. Teilmodelle Technical Monitoring

Das Teilmodell *Technical-Monitoring* stellt relevante Informationen für TMon-Anwendungen bereit. Es wurde in Anlehnung an die *AMEV Empfehlung für Technisches Monitoring* zur Qualitätssicherung entwickelt. In Abbildung 27 ist das Teilmodell *Technical-Monitoring* exemplarisch für einen Heizkreis dargestellt.

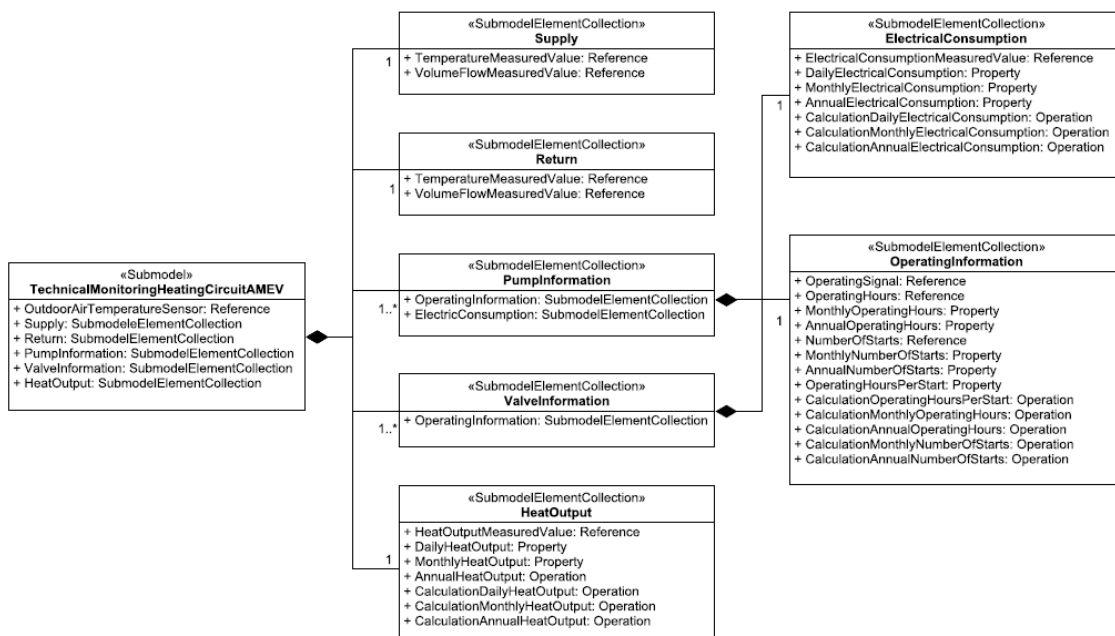


Abbildung 27: Teilmodell Technical Monitoring Heating Circuit AMEV

Das Teilmodell besteht aus fünf Submodel Element Collections (SMCs) und einer Referenz. Einige enthaltenen Informationen der SMCs (bspw. *Supply TemperaturMeasuredValue*) werden aus dem Teilmodell *Operating-Information* referenziert. Zusätzlich zu diesen Werten speichern die SMCs weitere Informationen, die eine detaillierte Analyse und Bewertung der Betriebszustände ermöglichen.

Die strukturierte Organisation innerhalb von SMCs fördert die Wiederverwendbarkeit von Daten über verschiedene Teilmodelle hinweg. Beispielsweise greifen sowohl die SMC Pump-Information als auch die SMC Valve-Information auf die SMC Operating-Information zu. Diese enthält allgemeine Betriebsdaten, wie die Anzahl der Starts oder Betriebsstunden. Da einige dieser Werte optional sind, müssen sie nicht in jeder Teilmodellinstanz vollständig vorhanden sein. So können für ein Ventil nur bestimmte Daten bereitgestellt werden, während für eine Pumpe ein vollständiger Satz an Betriebsinformationen verfügbar ist.

Zusätzlich zu den aktuellen Werten werden Berechnungen direkt innerhalb der jeweiligen SMCs im Monitoring-Teilmodell durchgeführt. Ein Beispiel hierfür ist die SMC Calculation-Annual-Operating-Hours, die die jährlichen Betriebsstunden einer Komponente ermittelt. Diese Berechnungen werden durch Submodel Elements (SEs) vom Typ Operation abgebildet. SEs verfügen über klar definierte Ein- und Ausgänge, die präzise Datenströme innerhalb des Modells gewährleisten.

Das Design der verschiedenen TMon-Teilmodelle folgt diesem modularen und flexiblen Aufbau. Dadurch wird sichergestellt, dass neue Berechnungsmethoden oder zusätzliche Parameter problemlos integriert werden können, ohne die bestehende Struktur zu verändern. Diese Flexibilität erleichtert die Anpassung an spezifische Anwendungsfälle und gewährleistet eine nachhaltige Nutzbarkeit der Teilmodelle.

6.3.5. Fazit Bestandsanlagen

In diesem Kapitel wurde eine Methode zur Repräsentation bestehender TGA-Anlagen durch Verwaltungsschalen vorgestellt. Dabei wurden heterogene Datenpunktbeschreibungen mittels NLP klassifiziert. Hierzu kommt ein vierstufiger Klassifikationsprozess zum Einsatz, der die Zuordnung der Datenpunkte zu grundlegenden Funktionen der TGA, zu Entitäten und zu den konkreten Funktionen der Datenpunkte ermöglicht. Auf Basis der klassifizierten Datenpunkte wurde ein Konzept entwickelt, das die Generie-

zung von Strukturinformationen für Gebäude erlaubt. Diese Strukturinformationen können anschließend von Anwendungen für das TMon ausgewertet und weiterverarbeitet werden.

Die erarbeitete Methode adressiert die Herausforderung, bestehende technische Systeme durch digitale Zwillinge zu repräsentieren. Hierfür wurde ein Konzept zur Erreichung syntaktischer Interoperabilität durch den Einsatz von Verwaltungsschalen entwickelt. Konzepte aus dem Industrie-4.0-Bereich wurden genutzt, um Bestandsanlagen mit digitalen Zwillingen zu versehen. Dies schafft die Grundlage für eine standardisierte Datenintegration und eine einheitliche Informationsstruktur.

Darüber hinaus wurden spezielle Teilmodelle und ein Klassifizierungsalgorithmus entwickelt, die eine systematische Abbildung heterogener Datenpunktbeschreibungen auf die Struktur der Teilmodelle ermöglichen. Diese Methode stellt sicher, dass die Daten konsistent und für die weitere Analyse zugänglich sind.

Die vorgestellte Lösung bildet damit eine robuste Basis für die Integration und Analyse von Betriebsdaten bestehender technischer Systeme und ermöglicht die Erstellung digitaler Zwillinge, die eine einheitliche Verwaltung und Auswertung der Daten gewährleisten. Die nächste Stufe umfasst die prototypische Implementierung einer TMon-Anwendung, die auf diesen Konzepten aufbaut und deren praktische Umsetzung demonstriert.

6.4. Konzeption, Aufbau und prototypische Implementierung eines technischen Monitorings

In diesem Kapitel wird die prototypische Umsetzung eines automatisierten Technischen Monitorings (TMon) vorgestellt, welches ohne manuellen Aufwand erstellt wird. Die Abbildung 28 zeigt die Softwarearchitektur des entwickelten Gateways inkl. einer Implementierung in die Feldebene und der Konnektivität zur Cloud.

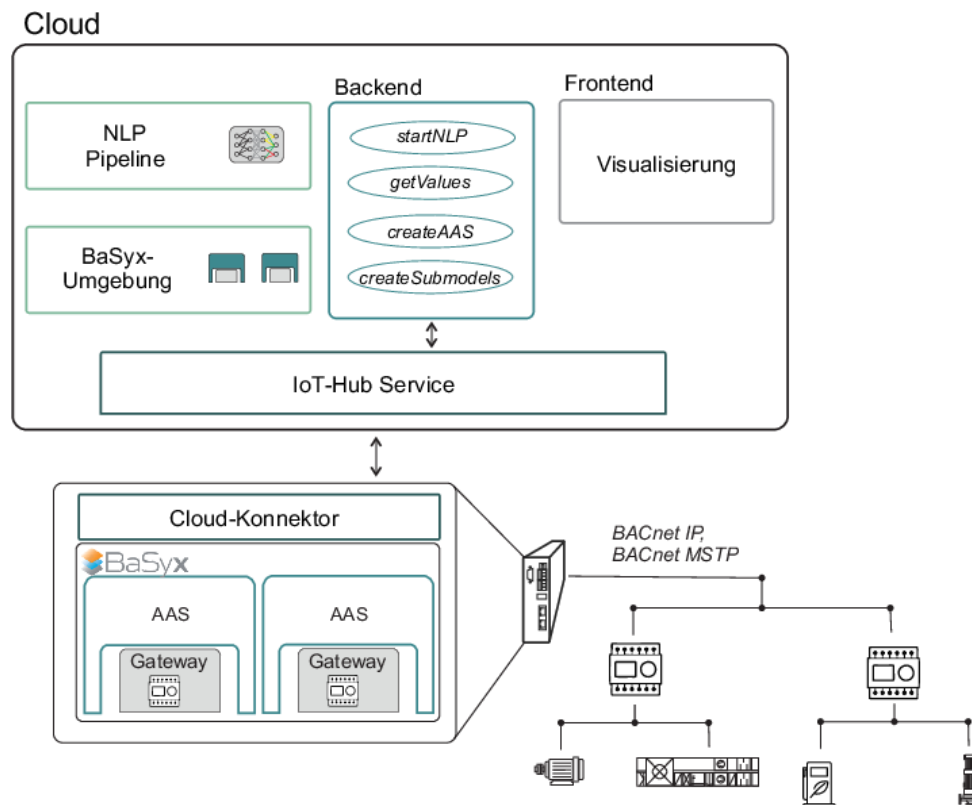


Abbildung 28: Softwarearchitektur inkl. Feldimplementierung

Die Daten, die in der Feldebene erfasst werden, stammen von den BACnet-Automationsstationen. Diese Daten werden zunächst an ein Gateway übertragen, das die Grundlage für die Generierung der AAS der jeweiligen Stationen bildet. Nachdem die AAS erstellt wurden, werden deren Informationen zur weiteren Verarbeitung an eine Cloud-Infrastruktur übermittelt. Innerhalb dieser Cloud-Umgebung erfolgt die Verteilung der Daten über das Backend, sodass sie an verschiedene Services weitergeleitet oder zur Visualisierung im Frontend aufbereitet werden können.

Ein erster Schritt in diesem Prozess besteht darin, über das Backend eine NLP-Pipeline zu starten, die eine automatisierte Verarbeitung der bereitgestellten Daten ermöglicht. Auf Basis dieser Pipeline werden die AAS erstellt und ihre Informationen für den

Zugriff aus dem Frontend vorbereitet. Dadurch wird es Nutzern ermöglicht, die Daten komfortabel abzufragen und visuell darzustellen.

Das Backend spielt in diesem Kontext eine zentrale Rolle, da es als Schnittstelle zwischen der Cloud, den verschiedenen Services und dem Frontend fungiert. Es stellt sicher, dass die Datenströme zuverlässig verarbeitet, verteilt und bereitgestellt werden. Obwohl die Implementierung des Backend für den Gesamtprozess von Bedeutung ist, war sie nicht Teil dieses Projekts. Aus diesem Grund wird die technische Umsetzung des Backend-Systems in den folgenden Abschnitten nicht weiter beschrieben.

6.4.1. Generierung von Verwaltungsschalen für Automationsstationen

Jedes BACnet-Gerät (Device), das in einem Gebäudeautomationsnetzwerk eingebunden ist, wird durch eine eigene Asset Administration Shell (AAS) repräsentiert. Die Erstellung dieser AAS erfolgt auf Grundlage der im BACnet-Protokoll festgelegten, verpflichtenden Netzwerk-Erkundungsmechanismen. Dabei kommen insbesondere die Befehle „Who-Is/I-Am“ zum Einsatz, die eine automatische Erkennung und Identifikation von Geräten im Netzwerk ermöglichen.

Eine Client-Anwendung initiiert diesen Prozess, indem sie eine „Who-Is“-Anfrage in das IP-Netzwerk sendet. Als Antwort darauf übermitteln alle im Netzwerk vorhandenen BACnet-Geräte eine „I-am“-Nachricht. Diese Antwort enthält alle erforderlichen Informationen, die benötigt werden, um Daten aus einem BACnet-Gerät auszulesen und weiterzuverarbeiten. Dazu gehören insbesondere:

1. Die IP-Adresse des BACnet-Gerätes
2. Der Objekt-Typ eines Datenpunkts, z. B. Analog-Input oder Analog-Output
3. Die Instanznummer des jeweiligen BACnet-Objekts
4. Der Name des auszulesenden Properties

Die von den BACnet-Geräten erhaltenen „I-am“-Nachrichten dienen als Grundlage für die Erstellung entsprechender Verwaltungsschalen auf einem BaSyx-AAS-Server. Dabei wird für jedes erkannte BACnet-Gerät eine eigene AAS generiert.

Basierend auf den aus den Geräten ausgelesenen Informationen wird zunächst für jede AAS das AID-Teilmodell angelegt. Dieses Teilmodell beschreibt die Kommunikationsschnittstelle eines physischen Assets und bildet somit die Grundlage für die Datenintegration. Zusätzlich erstellt die Client-Anwendung für jede AAS ein weiteres Teilmodell, das als BACnet-Datapoints-Information bezeichnet wird. Dieses Teilmodell

enthält spezifische Informationen zu den erfassten Datenpunkten und deren Eigenschaften.

Ein drittes Teilmodell, das als AIMC bezeichnet wird, wird ebenfalls für jede AAS generiert. Dieses Teilmodell beschreibt die Zuordnung (Mapping) zwischen den Schnittstellenmerkmalen, die im AID-Teilmodell definiert wurden, und den Datenpunkten, die im BACnet-Datapoints-Information-Teilmodell enthalten sind. Das AIMC-Teilmodell ermöglicht es, präzise festzulegen, welche Schnittstellenmerkmale mit welchen Datenpunkten verknüpft werden.

Durch die Kombination der Erkundungsmechanismen des BACnet-Kommunikationsprotokolls mit den modularen BaSyx-Komponenten lässt sich eine vollautomatisierte Erstellung von Verwaltungsschalen umsetzen. Diese Verwaltungsschalen stellen die relevanten Informationen aus einem GA-Netzwerk zentral bereit und ermöglichen eine strukturierte Verarbeitung sowie eine nahtlose Integration in übergeordnete Systeme und Anwendungen.

6.4.2. Verarbeitung heterogener Datenpunkte

Das Teilmodell *BACnet-Datapoints-Information* bildet die Grundlage für die Verarbeitung heterogener Datenpunkte innerhalb der NLP-Pipeline. Hierbei werden die einzelnen Submodel Elements, die die BACnet-Properties repräsentieren, schrittweise von der Pipeline analysiert und verarbeitet.

Jedes Submodel Element durchläuft dabei nacheinander die vier Stufen des speziell entwickelten und zuvor beschriebenen Klassifikationsalgorithmus. Dieser Algorithmus greift auf trainierte NLP-Modelle zurück, die auf einem separaten Server gehostet werden. Die Pipeline kommuniziert mit diesem Server und ruft die benötigten Modelle dynamisch ab, um die Klassifikationsschritte durchzuführen.

Der Prozess beginnt damit, dass die erste Stufe des Algorithmus das Submodel Element einer grundlegenden Funktion zuordnet. Ein Beispiel hierfür ist die Klassifikation als „Luft versorgen“. Basierend auf diesem Ergebnis ruft die Pipeline im nächsten Schritt das spezifische Modell für die Funktion „Luft versorgen“ vom Server ab. Dieses Modell führt anschließend eine detailliertere Klassifikation auf der zweiten Ebene durch.

Dieser iterative Prozess setzt sich fort, wobei die Ergebnisse einer Stufe die Auswahl des Modells für die nächste Stufe bestimmen. Dies ermöglicht eine schrittweise Verfeinerung der Klassifikation. Die Zwischenergebnisse jedes Submodel Elements werden während der Verarbeitung in einem temporären Speicher abgelegt, um konsistente und nachvollziehbare Übergänge zwischen den Klassifikationsstufen sicherzustellen.

Nachdem alle Submodel Elements die Pipeline vollständig durchlaufen haben, wird auf Basis der gespeicherten Klassifikationsergebnisse ein neues Teilmodell mit der Bezeichnung NLP-Classification-Result erstellt. Dieses Teilmodell fasst die Ergebnisse der Klassifikationsschritte zusammen und strukturiert sie gemäß den Anforderungen für die Integration in die Verwaltungsschale.

Das generierte NLP-Classification-Result wird von der Pipeline an das System zurückgegeben und der entsprechenden AAS zugeordnet. Dadurch steht es unmittelbar für weitere Abfragen und Analysen bereit und kann über die vorgesehenen Schnittstellen abgerufen werden.

Die strukturierte Verarbeitung durch die NLP-Pipeline ermöglicht eine automatisierte und präzise Klassifikation heterogener Datenpunkte. Dies bildet die Grundlage für eine effiziente Integration und Nutzung der Daten innerhalb der AAS-basierten Architektur.

Abbildung 29 zeigt exemplarisch die Verarbeitung des heterogenen Datenpunkts „Betriebsmeldung Pumpe Heizkreis Fußbodenheizung Bauteil D“ (Object Name „21062HZG404PU01BM01“). Mit Hilfe des NLP-Algorithmus wird der Datenpunkt der Grundfunktion „Wärme versorgen“, der zweiten Grundfunktion „Wärme verteilen“ und der Komponente „Pumpe“ zugeordnet und als „Rückmeldung Betrieb“ klassifiziert. Auf diese Weise wird der heterogene Datenpunkt homogenisiert und damit semantisch eindeutig beschrieben.

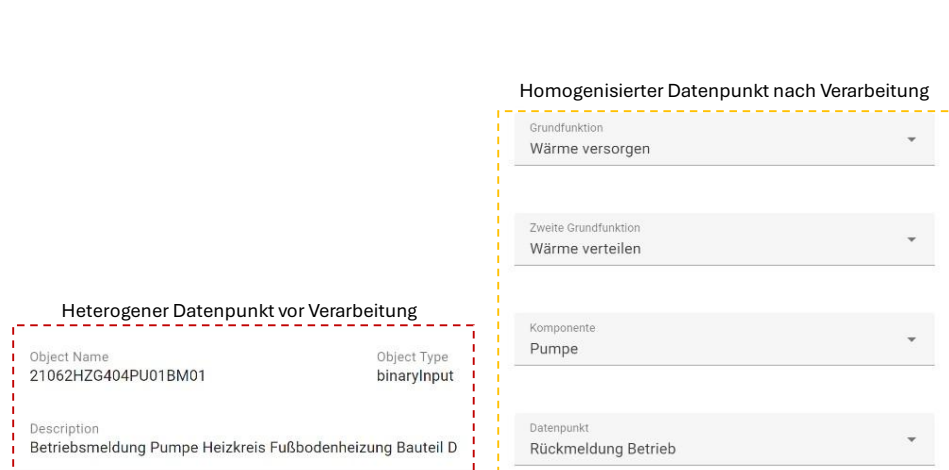


Abbildung 29: Verarbeitung eines exemplarischen heterogenen Datenpunkts

6.4.3. Technische Monitoring Anwendung

Damit die Strukturinformationen eines Gebäudes korrekt zugeordnet und verarbeitet werden können, ist es zunächst erforderlich, dass der Anwender grundlegende Angaben zu den relevanten organisatorischen Einheiten bereitstellt. Dazu gehören Informationen über das Unternehmen, die zugehörigen Liegenschaften sowie die einzelnen Gebäude innerhalb dieser Liegenschaften. Der gesamte Registrierungsprozess, einschließlich der Eingabe von Unternehmens- und Gebäudestrukturen, wird über das Benutzerinterface im Frontend durchgeführt. Das Frontend bietet speziell entwickelte Eingabemasken, die den Nutzer Schritt für Schritt durch die Datenerfassung führen und eine fehlerfreie Eingabe sicherstellen. Dadurch sind auch nicht-technische Nutzer in der Lage, die erforderlichen Daten zu erfassen und zu pflegen. In Abbildung 30 und Abbildung 31 werden exemplarisch die Eingabemasken zur Erfassung der Unternehmensangaben und Gebäudeinformationen dargestellt. Diese Abbildungen verdeutlichen, wie Nutzer über das Frontend strukturiert Informationen eingeben können. Für die Registrierung von Liegenschaften steht eine ähnliche Eingabemaske zur Verfügung.

The screenshot shows a mobile application interface for 'GART-Labor'. At the top, there is a dark green navigation bar with the text 'GART-Labor' on the left and 'HOME', 'DIGITAL TWINS', 'MONITORING', and 'SIGN OUT' on the right. Below the navigation bar is a sidebar with a home icon and a refresh icon. The main content area displays a form titled 'Registrierung Unternehmen'. The form contains several input fields: 'Name der Organisation', 'Sitz des Unternehmens (Land)' (a dropdown menu), 'Sitz des Unternehmens (Stadt)', 'Sitz des Unternehmens (Postleitzahl)', and 'Straße und Hausnummer'. At the bottom of the form are two buttons: 'SUBMIT' and 'RESET'. Below the form is a mobile navigation bar with three red dots, the first of which is circled in red.

Abbildung 30: Erstellung AAS Unternehmen

The screenshot shows a mobile application interface for 'GART-Labor' displaying a form titled 'Registrierung Gebäude'. The form is divided into sections: 'CAMPUS SÜDSTADT', 'CAMPUS DEUTZ', and 'HINZUFÜGEN GEBÄUDE'. Under 'CAMPUS DEUTZ', there are two buttons: 'HALLE WEST' and 'IWZ'. Below these is a red button labeled 'HINZUFÜGEN GEBÄUDE'. The form contains input fields for 'Name des Gebäudes' (with the value 'Halle Ost') and 'Standort des Gebäudes' (with the value 'Betzdorfer Straße, Köln, Deutschland'). At the bottom of the form is a red 'SUBMIT' button. Below the form is a mobile navigation bar with three red dots, the third of which is circled in red.

Abbildung 31: Erstellung AAS Gebäude

Auf Basis der vom Nutzer bereitgestellten Angaben, erfolgt die Erstellung der entsprechenden AAS automatisch im Backend. In Abbildung 32 ist exemplarisch die AAS eines Unternehmens abgebildet, die zwei spezifische Teilmodelle enthält:

- **Company-Information** – Dieses Teilmodell speichert alle relevanten Informationen über das Unternehmen, einschließlich Name, Adresse, Kontaktinformationen und weitere organisatorische Details. Es dient als zentrale Informationsquelle für die Unternehmensstruktur.
- **Hierarchical-Structures** – Dieses Teilmodell beschreibt die hierarchische Struktur des Unternehmens und bildet die Beziehungen zwischen den einzelnen Ebenen der Organisation ab.

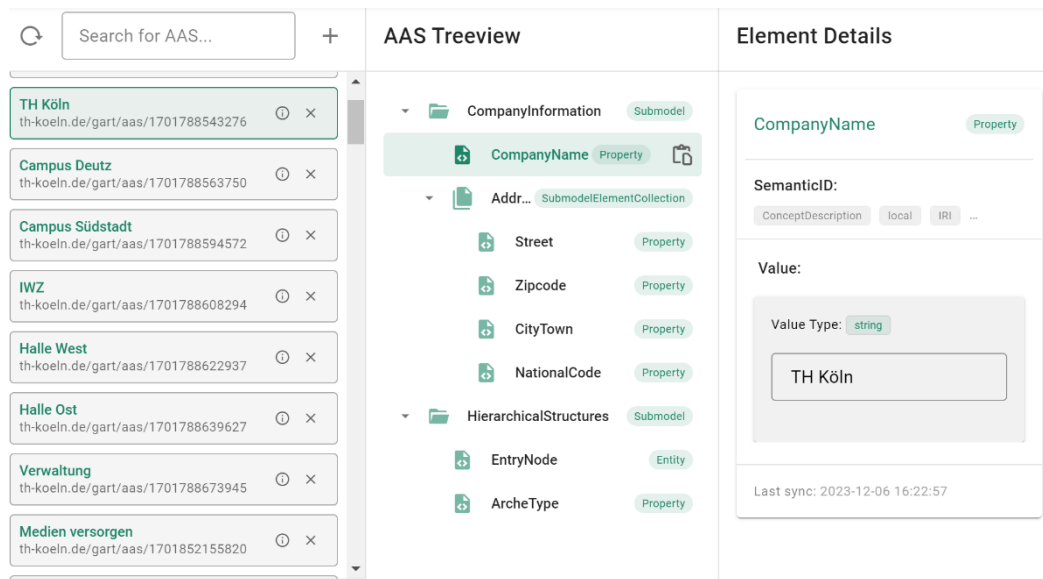


Abbildung 32: Beispielhaft AAS des Unternehmens im Backend

Durch diese hierarchische Organisation und die Integration der relevanten Informationen in die jeweiligen Teilmodelle wird eine strukturierte Verwaltung und Analyse der Gebäudedaten gewährleistet. Die in Abbildung 33 dargestellte Oberfläche dient als zentraler Einstiegspunkt, um die erstellten digitalen Zwillinge der Anlagen zu erkunden und deren Struktur und Inhalte im Detail zu analysieren. Von hier aus können Nutzer auf einfache Weise von einer übergeordneten Ebene, wie einer Liegenschaft (Campus Deutz), zu den untergeordneten Ebenen, wie Gebäuden (IWZ, Halle West etc.), wechseln.

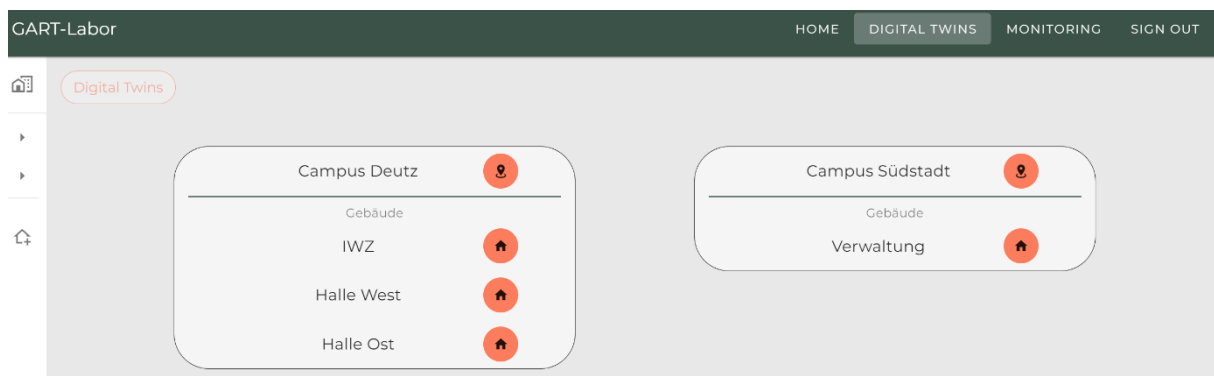


Abbildung 33: AAS der Liegenschaften und Gebäude im Frontend

Die Erstellung der Verwaltungsschalen im Backend berücksichtigt die vom Nutzer bereitgestellten Angaben und die durch die NLP-Pipeline identifizierten Strukturinformationen (Teilmodell *NLP-Classification-Result*). Konkret werden die übergeordneten Verwaltungsschalen auf Gebäudeebene mit den identifizierten Strukturinformationen

direkt verknüpft. Beispielsweise wurden innerhalb des Gebäudes IWZ die drei Grundfunktionen *Medien versorgen*, *Luft versorgen* und *Wärme versorgen* erkannt. Für jede dieser Grundfunktionen wurde eine eigene AAS generiert, die hierarchisch der AAS des Gebäudes IWZ zugeordnet ist. Die Darstellung im Frontend gruppiert die klassifizierten Datenpunkte funktionsbezogen (Abbildung 34). Diese Darstellung wurde gewählt, um einen möglichst benutzerfreundlichen Einstieg zu ermöglichen. Darstellungsformen hingegen, wie der GA-Datenbaum, wurde nicht gewählt, weil er bereits ein gewisses technisches Wissen über Anlagengruppierungen voraussetzt. In Abhängigkeit des Use-Case können weiterführende Darstellungsformen für bestimmte Nutzergruppen oder Gebäudephasen, wie die Inbetriebnahme untersucht werden.

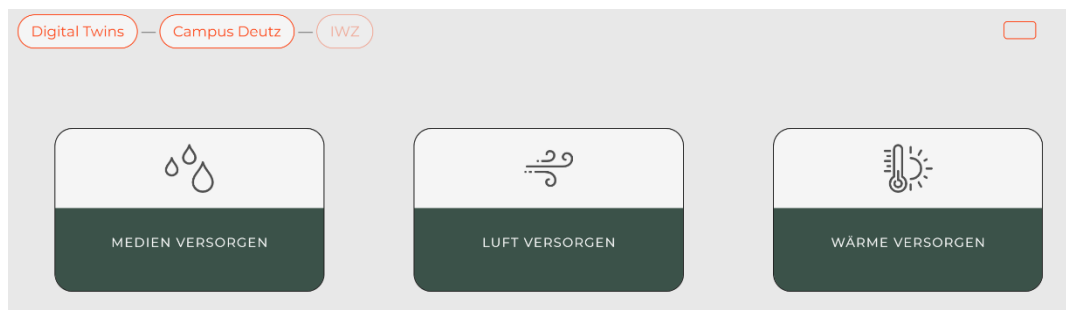


Abbildung 34: Visualisierung der erkannten Grundfunktionen eines Gebäudes

Innerhalb der Grundfunktionen der AAS wurden zusätzlich die ermittelten zweiten Funktionen (*Wärme erzeugen*, *Wärme verteilen*, *Wärme speichern*) als eigenständige, untergeordnete AAS erfasst (Abbildung 35). Gleiches gilt für die identifizierten Entitäten (z. B. Heizkreis 1, 2, 3, etc.) und die Komponenten (z.B. Rücklauf, Pumpe etc.). Die hierarchische Verknüpfung von Verwaltungsschalen ermöglicht auf diese Weise eine detaillierte und strukturierte Abbildung der Funktionalitäten und der Abhängigkeiten unterschiedlicher Systeme.

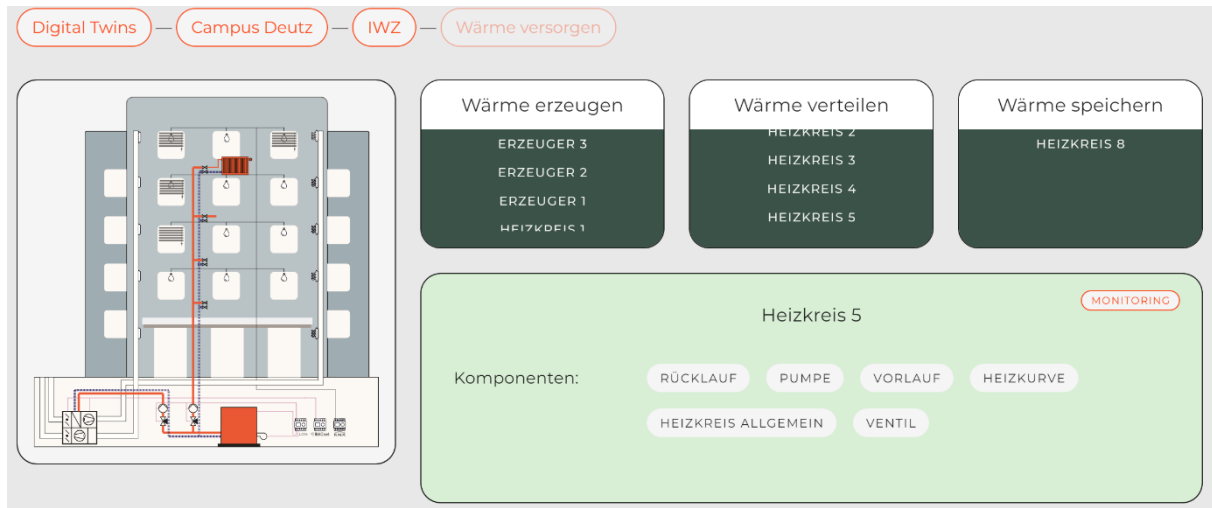


Abbildung 35: Visualisierung eines Heizkreises mit zugehörigen Komponenten

Die spezifischen Datenpunkte für Informationen wie Betriebszustände, Messwerte und Regelparameter werden innerhalb der jeweiligen AAS der Komponenten verwaltet. In Abbildung 36 ist eine Pumpe eines Heizkreises als exemplarische Komponente mit den dazugehörigen Datenpunkten dargestellt. Neben der Darstellung der Datenpunkte bietet die TMon-Anwendung Möglichkeiten zur Korrektur der NLP-basierten Klassifikation. Konkret stehen dem Nutzer zwei Korrekturmöglichkeiten zur Verfügung:

1. Manuelle Korrektur aller Ebenen:

Der Nutzer kann die Klassifikation auf allen Ebenen des hierarchischen Prozesses vollständig manuell über eine Eingabemaske anpassen. Dies bietet maximale Flexibilität, erfordert aber detaillierte Kenntnisse der Datenstruktur.

2. Teilweise Korrektur und Pipeline-Neustart:

Alternativ kann die Korrektur auf einer bestimmten Klassifikationsstufe vorgenommen werden. Nach dieser Anpassung wird die NLP-Pipeline auf Basis der korrigierten Daten erneut gestartet. Dadurch werden alle nachfolgenden Stufen der Klassifikation automatisch aktualisiert.

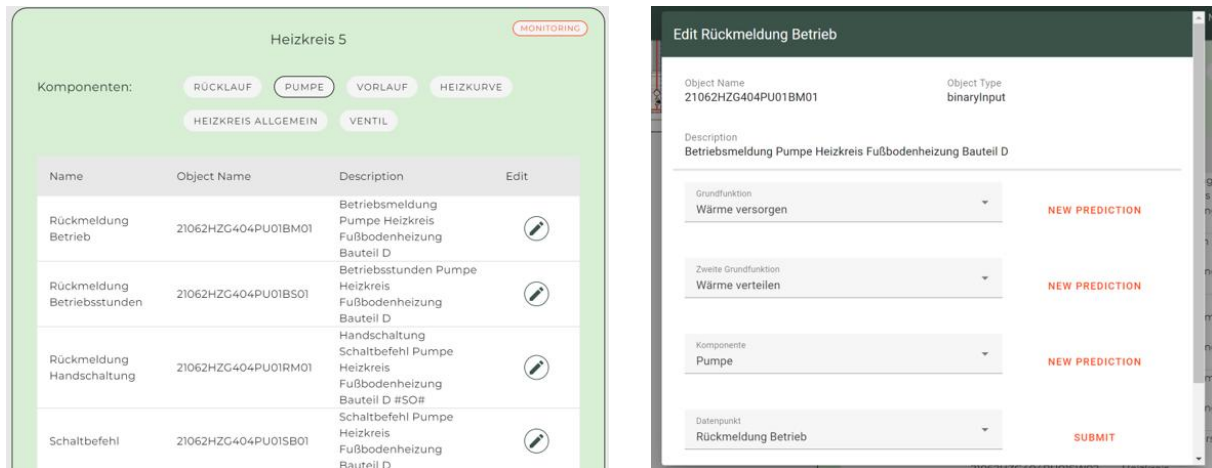


Abbildung 36: Beispielhafte AAS einer Komponente mit Datenpunkten und Korrekturmöglichkeiten

Das erstellte Frontend bietet die Möglichkeit intuitiv durch die verschiedenen AAS zu navigieren, gezielt auf Informationen zuzugreifen und komplexe Gebäudestrukturen präzise darzustellen. Das Frontend ist in dem GitHub Repository [23] online verfügbar.

Visualisierung von Trends

Das Trend-Monitoring wird über den Reiter Monitoring in der Anwendung erreicht. Der grundlegende Aufbau der Monitoring-Seite ähnelt der Digital-Twin-Seite. Ab der Ebene der Anlagen-AAS unterscheidet sich die Monitoring-Seite jedoch deutlich, da sie auf die spezifischen Anforderungen von Betriebsüberwachung und Fehlererkennung ausgerichtet ist.

In der Abbildung 37 wird die Monitoring-Seite für einen Heizkreis dargestellt. Diese Seite bietet eine detaillierte Übersicht über den Verlauf von Betriebsdaten des Heizkreises. Nutzer können hier gezielt auf historische Werte zugreifen, Anomalien identifizieren und Maßnahmen zur Optimierung ableiten. Die Messwerte der dargestellten Zeitverläufe stammen aus dem Teilmodell *Time-Series*. Die gespeicherten Verlaufsdaten im Time-Series-Teilmodell sind über eine Referenz mit den Werten aus dem *Operating-Information*-Teilmodell verbunden. Diese Verknüpfung ermöglicht einen schnellen Zugriff auf aktuelle Werte und historische Trends aus einer einheitlichen Oberfläche heraus.

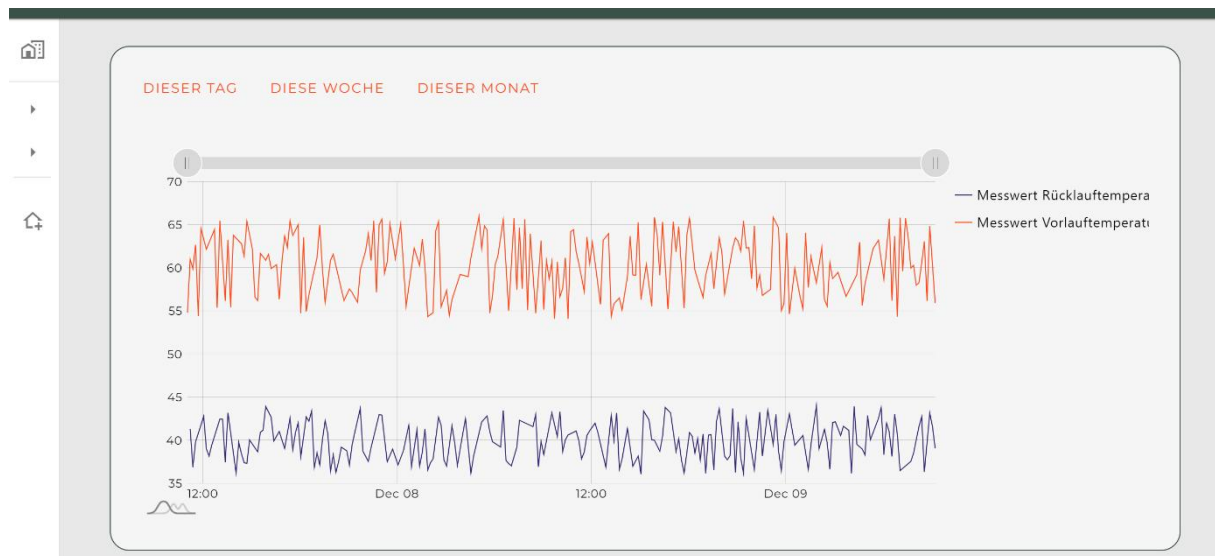


Abbildung 37: Trend der Vor- und Rücklauftemperatur eines Heizkreises

Sollte ein bestimmter Wert, wie z. B. die Vorlauftemperatur, nicht verfügbar sein, wird dieser automatisch ausgelassen. Dies stellt sicher, dass die Darstellung auch bei unvollständigen Daten konsistent bleibt und keine Fehler verursacht. Fehlende Werte beeinträchtigen somit nicht die Gesamtvisualisierung der Trends.

Der Nutzer kann den anzuzeigenden Zeitraum flexibel einstellen und dabei zwischen verschiedenen Ansichten wählen:

- Tag – für detaillierte Kurzzeittrends
- Woche – für mittelfristige Beobachtungen
- Monat – für langfristige Analysen und saisonale Vergleiche

Diese Anpassungsmöglichkeit erlaubt eine gezielte Analyse von Betriebszuständen und Veränderungen über verschiedene Zeiträume hinweg.

Zusätzlich zur Verlaufsgrafik werden im Interface stets die aktuellen Werte der einzelnen Datenpunkte angezeigt. Dies erleichtert die direkte Bewertung der aktuellen Betriebsbedingungen und unterstützt den Nutzer dabei, schnell auf Auffälligkeiten zu reagieren. Die Kombination aus Trendvisualisierung und aktuellen Betriebswerten bietet eine umfassende Grundlage für:

- Fehlererkennung – z. B. ungewöhnliche Temperaturschwankungen
- Optimierungspotenzial – Identifizierung ineffizienter Betriebszustände
- Vergleichende Analysen – Überprüfung von Soll-Ist-Werten und historischen Abweichungen

In der Abbildung 38 werden alle einem Heizkreis zugeordneten Komponenten übersichtlich dargestellt. Über die integrierte Navigationsfunktion können Nutzer gezielt einzelne Komponenten auswählen, um deren zugehörige Datenpunkte und die aktuellen Werte einzusehen. Für jeden ausgewählten Datenpunkt wird der aktuelle Wert direkt aus dem *Operating-Information*-Teilmodell abgerufen. Zusätzlich kann der Verlauf des Wertes aus dem *Time-Series*-Teilmodell visualisiert werden. Dies ermöglicht eine detaillierte Analyse historischer Trends und Veränderungen im Betrieb.

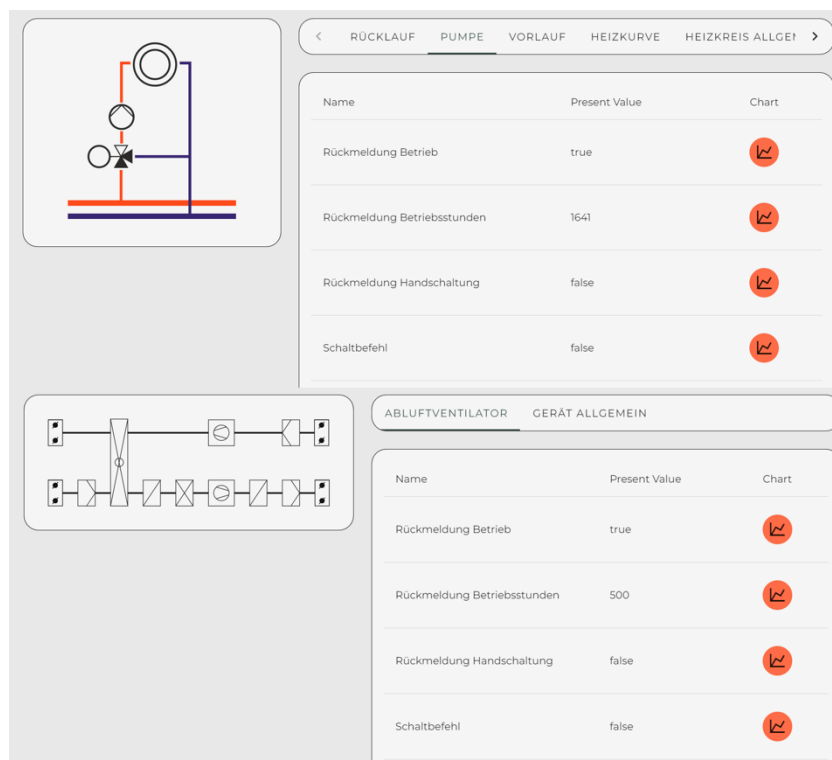


Abbildung 38: Visualisierung des Monitorings zweier Anlagen - Oben: Monitoring eines Heizkreises - Unten: Monitoring einer RLT-Anlage

6.4.4. Backend-Struktur und Instanz-AAS

Abbildung 39 veranschaulicht den strukturellen Aufbau der verschiedenen Entitäten-AAS im Backend exemplarisch für die Komponente *Rücklauf*. Hier werden die Beziehungen zwischen den einzelnen AAS, die Zuordnung der Teilmodelle und die Hierarchien innerhalb der Datenorganisation visualisiert. Diese strukturierte Darstellung im Backend sorgt dafür, dass Anpassungen und Korrekturen im Frontend direkt übernommen und konsistent in den Datenstrukturen aktualisiert werden. Dies gewährleistet eine dynamische und flexible Verwaltung der digitalen Zwillinge sowie deren kontinu-

ierliche Anpassung an neue Anforderungen oder Änderungen in der Systemkonfiguration. Durch diese Funktionalitäten bietet das System nicht nur eine hohe Genauigkeit bei der automatisierten Klassifikation, sondern auch die Möglichkeit zur nachträglichen Optimierung, was die Praxistauglichkeit und Benutzerfreundlichkeit erheblich verbessert.

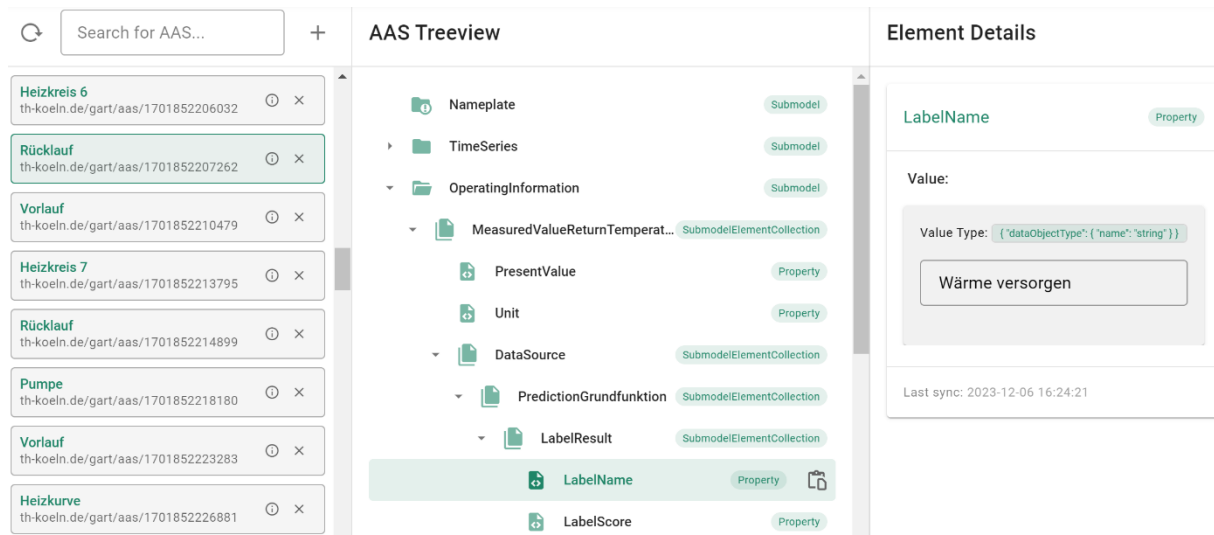


Abbildung 39: AAS einer Komponente mit dazugehörigen Teilmodellen im Backend

Die AAS eines Rücklaufs umfasst die vier Teilmodelle *Nameplate*, *Time-Series*, *Operating-Information* und *Hierarchical-Structures*. Dabei wurde das Teilmodell *Hierarchical-Structures* in Abbildung 39 bewusst nicht dargestellt, da es primär zur internen Strukturierung und zur hierarchischen Verknüpfung innerhalb des Systems dient. Das Teilmodell *Nameplate* beinhaltet Informationen über die verbauten Komponenten im Rücklauf wie die technischen Details. Das Teilmodell *Operating-Information* beinhaltet aktuelle Werte der Datenpunkte, die dem Rücklauf mittels NLP-Pipeline zugeordnet werden. Zusätzlich werden die Einheit und weitere Ergebnisse der Klassifikation gespeichert. Diese Daten wurden zudem in der SMC Data-Source gespeichert, um den Zugriff im Frontend zu erleichtern und die Nutzerfreundlichkeit zu erhöhen. Im Teilmodell *Time-Series* werden die Trenddaten der aufgenommenen Werte gespeichert. Das Teilmodell ermöglicht es, historische Daten zu analysieren, Trends zu identifizieren und langfristige Entwicklungen zu beobachten. Nutzer können über das Frontend auf diese Zeitreihen zugreifen, um detaillierte Auswertungen und Vergleiche vorzunehmen.

Das erstellte Backend realisiert die folgenden Anforderungen:

- **Automatisierte Bereitstellung:** Die AAS und Teilmodelle werden dynamisch und ohne manuelle Konfiguration erstellt.
- **Minimierter Konfigurationsaufwand:** Abgesehen von den Nutzereingaben zu Unternehmen, Liegenschaften und Gebäuden erfolgt die Generierung der Datenstrukturen und Klassifikationen vollständig automatisiert.
- **Effiziente Integration heterogener Daten:** Das bisher übliche, zeitaufwändige Datenengineering zur Verarbeitung und Integration unterschiedlich bezeichneter Datenpunkte entfällt.

Das Backend ist in dem GitHub Repository [24] online verfügbar.

6.4.5. Prototypische Implementierung

Zur Prototypischen Implementierung verwendeten das Projektteam Gebäude der Städte Köln und Hamburg. Konkret wurden die heterogenen Datenpunkte der Gebäude extrahiert und mittels der entwickelten NLP-Methodik auf ein homogenes Zielvokabular abgebildet. Die Erstellung und Validierung des Datensatzes sind in Kapitel 6.2 ausführlich beschrieben. Tabelle 9 stellt exemplarisch eine Auswahl der untersuchten Gebäude der Stadt Köln dar. Neben einem großen Anteil an Schulgebäuden sind auch Datenpunkte von Verwaltungsgebäuden (bspw. Bezirksrathaus und Bürgerzentrum), Kindertagesstätten, Schwimmbädern und einem Bauhof enthalten.

Tabelle 9: Übersicht untersuchte Gebäudetypen und derer Datenpunkte

Gebäudetyp	Anzahl Gebäude	Anzahl Datenpunkte
Bürgerzentrum	2	2.257
Bezirksrathaus	2	1.165
Verwaltung Musikhochschule	1	125
Verwaltung Volkshochschule	1	426
Sonstige Verwaltungsgebäude	2	5.553
Kindertagesstätte	3	559
Schule mit Schwimmbad	2	1.040
Schule	69	ca. 30.000
Bauhof	1	209

7. Zusammenfassung

Das Forschungsprojekt mit dem Titel „Gewinnung von Strukturinformationen aus semantisch heterogenen Gebäudeautomationsnetzen durch Mustererkennung mittels Künstlicher Intelligenz“ hatte das Ziel, die Integration und Nutzung von Betriebsdaten der technischen Gebäudeausrüstung zu vereinfachen. Vor dem Hintergrund wachsender Anforderungen an Energieeffizienz und Digitalisierung im Gebäudesektor, wurde eine Methodik entwickelt, die semantisch heterogene Datenpunkte aus bestehenden Gebäudeautomationssystemen automatisiert analysiert, strukturiert und in standardisierte Informationsmodelle überführt. Das Projekt liefert einen Beitrag zur kosteneffizienten und skalierbaren Einführung von technischem Monitoring und unterstützt damit die übergeordneten gesellschaftlichen Ziele der Dekarbonisierung und Digitalisierung im Gebäudesektor.

Die zentrale Herausforderung bestand darin, die Vielfalt an Kommunikationsprotokollen und proprietären Datenstrukturen in GA-Systemen in eine einheitliche, maschinenlesbare Struktur zu überführen. Während das BACnet-Protokoll über reichhaltige semantische Eigenschaften verfügt, zeigten sich bei KNX und Modbus Einschränkungen hinsichtlich der verfügbaren Metadaten und semantischen Beschreibungen. Daher wurde BACnet als führendes Kommunikationsprotokoll für die Implementierung ausgewählt. Die Erfassung und Modellierung der Datenpunkte erfolgte über die sogenannte Verwaltungsschale, ein Industrie-4.0-konformes Informationsmodell, das eine modulare und domänenunabhängige Repräsentation physischer und digitaler Assets ermöglicht.

Für die semantische Klassifikation der Datenpunkte wurde ein vierstufiger KI-basierter Klassifikationsansatz entwickelt, der auf Methoden des Natural Language Processing basiert. Die Klassifikation erfolgte entlang funktionaler Hierarchien: von der Grundfunktion (z. B. „Wärme versorgen“) über Unterfunktionen und zugehörige Entitäten (z. B. „Pumpe“, „Heizkreis“) bis hin zur konkreten Datenpunktbezeichnung (z. B. „Schaltbefehl“, „Messwert Temperatur“). Grundlage dieses Prozesses bildete ein umfangreicher, manuell gelabelter Datensatz mit über 54.000 BACnet-Datenpunkten aus realen GA-Systemen in Köln und Hamburg.

Die trainierten NLP-Modelle, darunter auch domänenspezifisch angepasste Varianten wie gBERT und IDiS, erreichten Klassifikationsgenauigkeiten von über 98 % (F1-Score) – ein Ergebnis, das die Wirksamkeit der entwickelten Methodik eindrucksvoll

bestätigt. Durch gezielte Reduktion der Klassifizierungsräume, etwa durch Einschränkung der möglichen Labels auf Basis der erkannten Entität, konnte der Rechenaufwand signifikant minimiert werden, ohne die Qualität der Ergebnisse zu beeinträchtigen.

Die technische Umsetzung erfolgte prototypisch auf einem Raspberry Pi 4, der als Edge-Gateway fungiert. Mithilfe von Open-Source-Komponenten aus dem Eclipse BaSyx-Ökosystem wurden die Verwaltungsschalen erzeugt, registriert, visualisiert und mit Daten aus dem BACnet-Netzwerk befüllt. Die eingesetzte Architektur ermöglichte es, BACnet-Datenpunkte automatisch zu erkennen, als digitale Zwillinge zu modellieren und zyklisch mit aktuellen Werten zu versorgen. Für die Visualisierung wurde ein Dashboard entwickelt, das auf den generierten Strukturdaten aufbaut und individuell auf die Gebäudetechnik und die Nutzerbedürfnisse zugeschnittene Monitoring-Ansichten bietet.

Neben der technischen Innovation ist auch der gesellschaftliche und wirtschaftliche Nutzen des Projekts hervorzuheben. Durch die drastische Reduktion des Engineering-Aufwands – insbesondere beim Aufbau individueller TMon-Systeme in Bestandsgebäuden – wird ein entscheidender Beitrag zur Marktdurchdringung solcher Systeme geleistet. Gerade in großen Liegenschaften mit komplexer Infrastruktur (z. B. Schulen, Museen oder Verwaltungsgebäuden) sind die Potenziale erheblich: Automatisiert generierte Dashboards erlauben eine fundierte Analyse des Anlagenbetriebs, zeigen Optimierungspotenziale auf und bilden die Grundlage für Maßnahmen zur Energieeinsparung.

Ein bemerkenswerter Vorteil der entwickelten Lösung ist ihre Unabhängigkeit von zusätzlicher Sensorik oder neuer Hardware. Bestehende Systeme können mithilfe der KI-basierten Strukturierung ohne tiefgreifende Eingriffe digitalisiert und in moderne TMon-Lösungen überführt werden. Dies eröffnet neue Perspektiven für die kosteneffiziente Nachrüstung und das Retrofit im Gebäudebestand – ein Aspekt, der angesichts der langen Lebenszyklen im Bauwesen von enormer Bedeutung ist.

Die prototypische Umsetzung und die validierten Modelle zeigen, dass eine robuste, skalierbare und praxisnahe Lösung zur automatisierten Strukturierung von GA-Daten möglich ist. Die bereits erzielten Ergebnisse stellen eine belastbare Grundlage dar, auf der zukünftige Erweiterungen – etwa durch Integration von ETS-Dateien bei KNX oder

durch semantische Analyse von herstellerspezifischen Modbus-Dokumentationen – aufbauen können.

Insgesamt stellt das Projekt einen richtungsweisenden Beitrag zur digitalen Transformation im Gebäudemanagement dar. Es kombiniert aktuelle Erkenntnisse aus KI, Gebäudeautomation und Informationsmodellierung zu einem integrierten Ansatz, der sowohl technologisch als auch wirtschaftlich überzeugt. Die erarbeitete Lösung bietet eine hohe Übertragbarkeit, unterstützt die Umsetzung von Industrie-4.0-Prinzipien und fördert die nachhaltige Entwicklung durch einen effizienteren Ressourceneinsatz.

Fazit

Das Forschungsprojekt hat gezeigt, dass die automatisierte Gewinnung von Strukturinformationen aus semantisch heterogenen Gebäudeautomationssystemen mittels KI nicht nur theoretisch möglich, sondern praktisch umsetzbar ist. Die entwickelten Verfahren und Systeme ermöglichen eine intelligente, flexible und zukunftsichere Integration technischer Gebäudedaten in Monitoring-Plattformen – und das ohne zusätzliche Hardware oder hohe Investitionen.

Das positive Fazit ist deshalb eindeutig: Die Ergebnisse des Projekts stellen eine zukunftsweisende Innovation dar, die die Digitalisierung des Gebäudesektors vorantreiben. Mit der erfolgreichen Implementierung einer funktionsfähigen, KI-gestützten Lösung wurde ein entscheidender Meilenstein erreicht. Die breite Anwendung solcher Systeme verspricht nicht nur erhebliche Einsparungen im Betrieb, sondern leistet auch einen substanziellen Beitrag zur Erreichung der Klimaziele und zur Modernisierung der gebäudetechnischen Infrastruktur.

Literaturverzeichnis

- [1] M. Borh, B. Kämper, A. Cartus, J. Beermann, T. Fessler, J. Müller und C. Diedrich, „Automated monitoring applications for existing buildings through natural language processing based semantic mapping of operational data and creation of digital twins,“ *Energy and Buildings*, 2023.
- [2] *VDI 6041 - Facility-Management. Monitoring von Gebäuden und gebäudetechnischen Anlagen*, 2017.
- [3] T. Hansemann und C. Hübner , *Gebäudeautomation. Kommunikationssysteme mit EIB/KNX, LON und BACnet*, München: Carl Hanser Fachbuchverlag, 2016.
- [4] J. Petze, B. Isler, G. Fierro und J. Koh, „ASHRAE's BACnet Committee, Project Haystack and Brick Schema Collaborating to Provide Unified Data Semantic Model-ing Solution,“ [Online]. Available: <https://www.ashrae.org/about/news/2018/ashrae-s-bacnet-com-mittee-project-haystack-and-brick-schema-collaborating-to-provide-unified-data-semantic-modeling-solution>. [Zugriff am 21 05 2021].
- [5] „Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Gesamtausgaben der Energiedaten. Datensammlung des BMWi,“ 2021. [Online]. Available: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html>. [Zugriff am 17 05 2021].
- [6] „Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Sanierungsbedarf im Gebäudebestand. Ein Beitrag zur Energieeffizienzstrategie Gebäude,“ Berlin 2014. [Online]. Available: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/sanierungsbedarf-im-gebaeudebestand.html>. [Zugriff am 17 05 2021].
- [7] „Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit: Klimaschutzbericht 2019. zum Aktionsplan Klimaschutz 2020 der Bundesregierung,“ [Online]. Available: <https://www.bmu.de/download/klimaschutzbericht-2019/>,. [Zugriff am 17 05 2021].

- [8] *Bundes-Klimaschutzgesetz, KSG*, 2019.
- [9] „Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit: Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung,“ 2016. [Online]. Available: <https://www.bmu.de/publikation/klimaschutzplan-2050/>. [Zugriff am 17 05 2021].
- [10] „Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Energieeffizienzstrategie Gebäude. Wege zu einem nahezu klimaneutralen Gebäudebestand,“ 2015. [Online]. Available: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienzstrategie-gebaeude.html>. [Zugriff am 17 05 2021].
- [11] B. Hesse, Quack, Palzer, Köhler, Herkel und Engemann, „Klimaneutraler Gebäudebestand 2050 - Dessau-Roßlau,“ 2016. [Online]. Available: <https://www.umweltbundes-amt.de/publikationen/klimaneutraler-gebaeudebestand-2050-0>. [Zugriff am 12 05 2021].
- [12] „Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen: Technisches Monitoring 2020 - Technisches Monitoring als Instrument zur Qualitätssicherung. Empfehlung Nr. 158,“ 2020. [Online]. Available: <https://www.amev-online.de/AMEVInhalt/Planen/Monitoring/TechnischesM/>. [Zugriff am 17 05 2021].
- [13] „Deutsche Energie-Agentur GmbH: dena-GEBÄUDEREPORT KOMPAKT 2019. Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand - Berlin,“ 2019. [Online]. Available: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/dena-GEBAEUDERE-PORT_KOMPAKT_2019.pdf. [Zugriff am 17 05 2021].
- [14] *DIN EN ISO 16484-5:2023-02 Systeme der Gebäudeautomation - Teil 5: Datenkommunikationsprotokoll*, DIN, 2023.
- [15] (BMWK), *Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action- Details of the Asset Administration Shell - Part 1*, Plattform Industrie 4.0, 2023.

- [16] „industrialdigitaltwin.com - IDTA 02017-1-0 Asset Interfaces Description,“ January 2024. [Online]. Available: https://industrialdigitaltwin.org/wp-content/uploads/2024/01/IDTA-02017-1-0_Submodel_Asset-Interfaces-Description.pdf. [Zugriff am 01 09 2024].
- [17] „industrialdigitaltwin.com - Configuration, IDTA 02027-1-0 - Asset InterfacesMapping,“ 06 2024. [Online]. Available: industrialdigitaltwin. [Zugriff am 01 09 2024].
- [18] BaSyx. [Online]. Available: <https://eclipse.dev/basyx/about>. [Zugriff am 01 09 2024].
- [19] „Docker.com,“ [Online]. Available: <https://www.docker.com/resources/what-container/>. [Zugriff am 01 09 2024].
- [20] VDI, „VDI 3814 "Gebäudeautomation (GA)",“ 2019.
- [21] A. Cartus, M. Both, N. Maisch, J. Müller und C. Diedrich, „Interoperability of semantically heterogeneous digital twins through Natural Language Processing methods,“ in *CLIMA 2022 conference*, Rotterdam, 2022/5/14.
- [22] R. Benfer und J. Müller, *Semantic digital twin creation of building systems through time series based metadata inference—A review*, Elsevier, Energy and Buildings 2024.
- [23] „GitHub - Monkiapp AasFrontend,“ [Online]. Available: https://github.com/thcologne-gart/MonKi_Apps/tree/main/frontend. [Zugriff am 31 07 2025].
- [24] „GitHub - Monkiapp AasBackend,“ [Online]. Available: https://github.com/thcologne-gart/MonKi_Apps/tree/main/backend. [Zugriff am 31 07 2025].
- [25] „Deutsche Energie-Agentur GmbH: Insight Bürogebäude. Marktsituation und Ausblick für klimafreundliche Bürogebäude. dena-ANALYSE, Berlin,“ 2018. [Online]. Available: <https://www.dena.de/filead->

min/dena/Dokumente/Pdf/9276_dena-Analyse_Insight_Bueroimmobilien.pdf.
[Zugriff am 17 05 2021].

[26] „GitHub - GART-I4.0Repository,“ [Online]. Available:
<https://github.com/thcologne-gart/GART-I4.0Repository>. [Zugriff am 01 09
2024].

Anhang

1. AAS Typen und zugeordnete Teilmodelle

Aas Typ	Zugeordnete Teilmodelle
https://th-koeln.de/gart/CompanyAAS/1/0	https://th-koeln.de/gart/vocabulary/CompanyInformation/1/0 , https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel
https://th-koeln.de/gart/SiteAAS/1/0	https://th-koeln.de/gart/vocabulary/SiteInformation/1/0 , https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel
https://th-koeln.de/gart/BuildingAAS/1/0	https://th-koeln.de/gart/vocabulary/BuildingInformation/1/0 , https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel
https://th-koeln.de/gart/PumpAAS/1/0	https://th-koeln.de/gart/vocabulary/OperatingInformation-Pump/1/0 , https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel
https://th-koeln.de/gart/BACnetDeviceAAS/1/0	https://th-koeln.de/gart/vocabulary/BACnetDatapointsInformation/1/0 , https://admin-shell.io/zvei/nameplate/2/0/Nameplate , https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel ,
https://th-koeln.de/gart/MonKiGatewayAas/1/0	https://th-koeln.de/gart/vocabulary/MonKiGateway/1/0 , https://admin-shell.io/zvei/nameplate/2/0/Nameplate , https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel ,
https://th-koeln.de/gart/BaseFunctionSupplyHeatAAS/1/0	https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel
https://th-koeln.de/gart/BaseFunctionSupplyAirAAS/1/0	https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel
https://th-koeln.de/gart/BaseFunctionSupplyColdAAS/1/0	https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel
https://th-koeln.de/gart/BaseFunctionSupplyMediaAAS/1/0	https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel
https://th-koeln.de/gart/BaseFunctionSupplyElectricityAAS/1/0	https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel
https://th-koeln.de/gart/BaseFunctionOtherAAS/1/0	https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel
https://th-koeln.de/gart/BaseFunctionTransportAAS/1/0	https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel
https://th-koeln.de/gart/BaseFunctionSecureAAS/1/0	https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel
https://th-koeln.de/gart/FunctionLevelTwoGenerateColdAAS/1/0	https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel
https://th-koeln.de/gart/FunctionLevelTwoStoreColdAAS/1/0	https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel
https://th-koeln.de/gart/FunctionLevelTwoDistributeColdAAS/1/0	https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel
https://th-koeln.de/gart/FunctionLevelTwoDistributeAirAAS/1/0	https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel
https://th-koeln.de/gart/FunctionLevelTwoProvideAirAAS/1/0	https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel
https://th-koeln.de/gart/FunctionLevelTwoProvideMediaAAS/1/0	https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel
https://th-koeln.de/gart/FunctionLevelTwoDisposeMediaAAS/1/0	https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel
https://th-koeln.de/gart/FunctionLevelTwoStoreMediaAAS/1/0	https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel
https://th-koeln.de/gart/FunctionLevelTwoDistributeMediaAAS/1/0	https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel
https://th-koeln.de/gart/FunctionLevelTwoSecureAAS/1/0	https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel

https://th-koeln.de/gart/FunctionLevelT-woObtainHeatAAS/1/0	https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel
https://th-koeln.de/gart/FunctionLevelT-woGenerateHeatAAS/1/0	https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel
https://th-koeln.de/gart/FunctionLevelT-woStoreHeatAAS/1/0	https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel
https://th-koeln.de/gart/FunctionLevelT-woDistributeHeatAAS/1/0	https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel
https://th-koeln.de/gart/PlantDistributionCircuitAAS/1/0	https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel
https://th-koeln.de/gart/PlantGeneratorAAS/1/0	https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel
https://th-koeln.de/gart/PlantVentilationSystemAAS/1/0	https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel
https://th-koeln.de/gart/PlantVentilationLineAAS/1/0	https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel
https://th-koeln.de/gart/PlantMediaSupplyAAS/1/0	https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel
https://th-koeln.de/gart/PlantOtherAAS/1/0	https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel
https://th-koeln.de/gart/ComponentExtractAirGeneralAAS/1/0	https://admin-shell.io/zvei/nameplate/2/0/Nameplate , https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel , https://th-koeln.de/gart/vocabulary/OperatingInformation/1/0 ,
https://th-koeln.de/gart/ComponentExtractAirFilterAAS/1/0	https://admin-shell.io/zvei/nameplate/2/0/Nameplate , https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel , https://th-koeln.de/gart/vocabulary/OperatingInformation/1/0 ,
https://th-koeln.de/gart/ComponentExhaustAirFlapAAS/1/0	https://admin-shell.io/zvei/nameplate/2/0/Nameplate , https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel , https://th-koeln.de/gart/vocabulary/OperatingInformation/1/0 ,
https://th-koeln.de/gart/ComponentExtractAirFanAAS/1/0	https://admin-shell.io/zvei/nameplate/2/0/Nameplate , https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel , https://th-koeln.de/gart/vocabulary/OperatingInformation/1/0 ,
https://th-koeln.de/gart/ComponentOutletAAS/1/0	https://admin-shell.io/zvei/nameplate/2/0/Nameplate , https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel , https://th-koeln.de/gart/vocabulary/OperatingInformation/1/0 ,
https://th-koeln.de/gart/ComponentOutsideAirFilterAAS/1/0	https://admin-shell.io/zvei/nameplate/2/0/Nameplate , https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel , https://th-koeln.de/gart/vocabulary/OperatingInformation/1/0 ,
https://th-koeln.de/gart/ComponentOutsideAirFlapAAS/1/0	https://admin-shell.io/zvei/nameplate/2/0/Nameplate , https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel , https://th-koeln.de/gart/vocabulary/OperatingInformation/1/0 ,
https://th-koeln.de/gart/ComponentHumidifierAAS/1/0	https://admin-shell.io/zvei/nameplate/2/0/Nameplate , https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel , https://th-koeln.de/gart/vocabulary/OperatingInformation/1/0 ,
https://th-koeln.de/gart/ComponentGeneralProvisionAAS/1/0	https://admin-shell.io/zvei/nameplate/2/0/Nameplate , https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel , https://th-koeln.de/gart/vocabulary/OperatingInformation/1/0 ,
https://th-koeln.de/gart/ComponentChpAAS/1/0	https://admin-shell.io/zvei/nameplate/2/0/Nameplate , https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel , https://th-koeln.de/gart/vocabulary/OperatingInformation/1/0 ,
https://th-koeln.de/gart/ComponentFireAlarmSystemAAS/1/0	https://admin-shell.io/zvei/nameplate/2/0/Nameplate , https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel , https://th-koeln.de/gart/vocabulary/OperatingInformation/1/0 ,
https://th-koeln.de/gart/ComponentFireShutterAAS/1/0	https://admin-shell.io/zvei/nameplate/2/0/Nameplate , https://admin-shell.io/idta/HierarchicalStructures/1/0/Submodel , https://th-koeln.de/gart/vocabulary/OperatingInformation/1/0 ,

2. Vollständige Übersicht der Datenpunkte mit Zuordnungen der Entitäten

Unterfunktion	Komponente	Datenpunkte
Wärme erzeugen	BHKW	Blockierschutz, Laufzeit Nächste Wartung, Messwert Abgastemperatur, Messwert Drehzahl, Messwert Druck, Messwert Frequenz, Messwert Gas, Messwert Klappe, Messwert Lambda, Messwert Leistung, Messwert Spannung, Messwert Strom, Messwert Temperatur, Messwert Temperatur Generator, Messwert Wärmemenge, Rückmeldung Betrieb, Rückmeldung Betriebsstunden, Rückmeldung Handschaltung, Rückmeldung Netzparallel, Rückmeldung Start, Rückmeldung Ventil, Rückmeldung Ölnachspeisung Aktiv, Schaltbefehl Anlage, Seriennummer, Sollwert Leistung, Stellbefehl, Störmeldung, Warnmeldung, Wartungsmeldung
	Pelletkessel	Messwert Abgastemperatur, Messwert Außentemperatur, Messwert Primärluft, Messwert Sauerstoff, Messwert Sekundärluft, Messwert Temperatur, Messwert Temperatur Einschubrohr, Messwert Drehzahl, Rückmeldung Betrieb, Rückmeldung Betriebsstunden, Schaltbefehl, Sollwert Temperatur, Störmeldung
	Wärmepumpe	Blockierschutz, Messwert Wasserspiegel Förderbrunnen, Rückmeldung Betrieb, Rückmeldung Betriebsbereit, Rückmeldung Betriebsstunden, Rückmeldung Blockierschutz Brunnenpumpe, Rückmeldung Blockierschutz Umwälzpumpe, Rückmeldung Handschaltung, Rückmeldung Umschaltventil Zu, Rückmeldung Umschaltventil Auf, Schaltbefehl, Stellbefehl, Störmeldung, Zähler Strom, Zähler Wärmemenge
	Kessel	Alarmmeldung, Anforderung, Anzahl Schaltungen, Ausschalt-differenz, Blockierschutz, Freigabe, Messwert Druck, Messwert Gas, Messwert Leistung, Messwert Temperatur, Reglerparameter, Reset Betriebsstunden, Rückmeldung Betrieb, Rückmeldung Betriebsstunden, Rückmeldung Handschaltung, Rückmeldung Heizperiode, Rückmeldung Klappe, Rückmeldung Management-bedieneinrichtung, Rückmeldung Modulationsgrad, Rückmeldung Not Aus, Rückmeldung Ventil, Rückmeldung Zeitprogramm, Schaltbefehl Anlage, Schaltbefehl Heizperiode Nach Datum, Schaltbefehl Heizperiode Nach Temperatur, Schaltbefehl Klappe, Schaltbefehl Sommer Monat Ein, Schaltbefehl Winter Monat Ein, Schalthysterese, Seriennummer, Sollwert Abschaltung, Sollwert Einschalten Sommer, Sollwert Kesselanzahl, Sollwert Laufzeit, Sollwert Leistung, Sollwert Modulation, Sollwert Sommer Tag, Sollwert Temperatur, Stellbefehl Anlage, Stellbefehl Klappe, Stellbefehl Ventil, Störmeldung, Warnmeldung, Wartungsmeldung, Zähler Wärmemenge, Übersteuerung
Wärme verteilen	Wärmeversorger allgemein	Alarmmeldung, Freigabe Betrieb Comfort Economy, Freigabe Betrieb Winter, Freigabe Filter, Freigabe Sondertageprogramm, Freigabe Wärmeerzeuger, Messwert Außentemperatur, Mindestausschaltzeit, Mindesteinschaltzeit, Optimierung, Quittierung, Regelpar- ameter, Rückmeldung Betrieb, Rückmeldung Erzeuger, Rückmeldung Handschaltung, Rückmeldung Klappe, Rückmeldung Sommer Winter, Rückmeldung Start Stopp, Rückmeldung Wärmeanforderung, Rückmeldung Zeitprogramm, Schaltbefehl, Schaltbefehl Klappe, Schaltbefehl Sommer Winter, Schaltbefehl Wärmeanforderung, Sollwert Außentemperatur Abschaltung Nacht, Sollwert Außentemperatur Abschaltung Tag, Sollwert Temperatur, Sollwert Wärmeanforderung, Sollwert Wärmebedarf, Sollwert Zeit Berechnung, Sollwert glt, Störmeldung, Vorrangschaltung, Zeitangabe, Zähler Gas, Übersteuerung
Wärme verteilen	Heizkreis allgemein	Alarmmeldung, Anforderung, Ausschaltzeit, Device Description, Einschaltzeit, Externe Vorrangschaltung, Grenzwert Frost, Grenzwert

	<p>Temperatur, Heizkurve, Hysterese Frostschutz, Hysterese Heizkreis, Messwert Außentemperatur, Messwert Feuchte, Messwert Leistung, Messwert Temperatur, Messwert Volumenstrom, Messwert Windgeschwindigkeit, Messwert Wärmeleistung, Nachlaufdauer Klappe Wärmetauscher, Nachtabenkung Tage, Quittierung, Reglerparameter, Restlaufzeit Nutzzeitverlängerung, Rückmeldung Aufheizbetrieb, Rückmeldung Betrieb, Rückmeldung Betriebsart, Rückmeldung Betriebsstunden, Rückmeldung Frostschutz, Rückmeldung Frostschutz Handschalter, Rückmeldung Handschaltung, Rückmeldung Managementbedieneinrichtung, Rückmeldung Nachtabenkung, Rückmeldung Nutzzeitverlängerung, Rückmeldung Regelabweichung, Rückmeldung Restwärmeoptimierung, Rückmeldung Tagbetrieb, Rückmeldung Zeitprogramm, Schaltbefehl Anlage, Schaltbefehl Betriebsart, Schaltbefehl Gleitendes Schalten, Schaltbefehl Nachtabenkung, Schaltbefehl Nutzzeitverlängerung, Schaltbefehl Optimierung, Schaltbefehl Start Stop Optimierung, Schaltbefehl Zeitprogramm, Sollwert Abschalten Stützbetrieb, Sollwert Aufheizzeit, Sollwert Außentemperatur, Sollwert Außentemperatur Abschalten Heizung, Sollwert Außentemperatur Einschalten Heizung, Sollwert Außentemperatur Start Stopp Aktiv, Sollwert Delta T Vorlauf Rücklauf, Sollwert Economy, Sollwert Ferien, Sollwert Frostschutz, Sollwert Grenztemperatur Start Stopp, Sollwert Hysterese Aufheizbetrieb, Sollwert Hysterese Nachtabenkung, Sollwert Komfort, Sollwert Laufzeit Blockierschutz, Sollwert Maximale Aufheizzeit, Sollwert Minimale Außentemperatur, Sollwert Nacht, Sollwert Nachtabenkung, Sollwert Nutzzeitverlängerung, Sollwert Schutzbetrieb, Sollwert Speicherfähigkeit, Sollwert StandBy Nacht, Sollwert StandBy Tag, Sollwert Stützbetrieb Nacht, Sollwert Stützbetrieb Nacht Hysterese, Sollwert Stützbetrieb Tag Hysterese, Sollwert Stützbetrieb Tag, Sollwert Tag, Sollwert Temperatur, Sollwert Temperatur Start Aufheizen, Sollwert Zeitkonstante, Sollwert Überhöhung Hydraulische Weiche, Sollwert Überhöhung Wärmeanforderung, Sollwertverschiebung, Stellbefehl, Stunden Sollwert Außentemperatur, Störmeldung, Stützbetrieb Nacht Erreicht, Stützbetrieb Tag Erreicht</p>
Druckhaltestation	Messwert, Störmeldung
Heizkurve	Aufheizbetrieb, Außentemperatur X1, Außentemperatur X2, Außentemperatur X3, Außentemperatur X4, Messwert Außentemperatur, Rückmeldung Managementbedieneinrichtung, Rückmeldung Verschiebung, Sollwert, Sollwert Fußpunkt, Sollwert Krümmung, Sollwert X1, Sollwert X2, Sollwert X3, Sollwert X4, Sollwert Y1, Sollwert Y2, Sollwert Y3, Sollwert Y4, Sollwertverschiebung, Steilheit, Stützbetrieb X1, Stützbetrieb X2, Stützbetrieb X3, Stützbetrieb X4, Stützbetrieb Y1, Stützbetrieb Y2, Stützbetrieb Y3, Stützbetrieb Y4, Stützpunkt X1, Stützpunkt X2, Stützpunkt X3, Stützpunkt X4, Stützpunkt Y1, Stützpunkt Y2, Stützpunkt Y3, Stützpunkt Y4
Kältemengenzähler	Messwert Kälteleistung, Messwert Kältemenge, Messwert Rücklauf-temperatur, Messwert Volumen, Messwert Volumenstrom, Messwert Vorlauf-temperatur
Pumpe	Alarmmeldung, Anforderung, Anzahl Schaltungen, Blockierschutz, Freigabe, Hysterese Frostschutz, Messwert Drehzahl, Messwert Druck, Messwert Durchfluss, Messwert Energieverbrauch, Messwert Förderhöhe, Messwert Leistung, Messwert Leistungsaufnahme, Messwert Stromaufnahme, Messwert Temperatur, Messwert Volu-

	menstrom, Reset Betriebsstunden, Reset Wartungsintervall, Rückmeldung Auto, Rückmeldung Betrieb, Rückmeldung Betriebsstunden, Rückmeldung Handschaltung, Rückmeldung Handschaltung Pumpe, Rückmeldung Managementbedieneinrichtung, Rückmeldung Zeitprogramm, Schaltbefehl, Schaltbefehl Blockierschutz, Schaltbefehl Wechsel Doppelpumpe, Schalthysterese, Sollwert, Sollwert Drehzahl, Sollwert Frostschutz, Sollwert Intervall Blockierschutz, Sollwert Laufzeit Blockierschutz, Sollwert Nachlaufzeit, Sollwert Nacht, Sollwert Pumpe Ein Außentemperatur, Sollwert Reset Betriebsstunden, Sollwert Tag, Stellbefehl, Störmeldung, Wartungsintervall, Wartungsmeldung, Übersteuerung
Raum	Fensteranteil, Freigabe Externer Sollwert, Freigabe Heizung, Freigabe Optimum Stopp, Freigabe Raumkorrektur, Freigabe Stellantrieb, Freigabe Stützbetrieb Nacht, Freigabe Stützbetrieb Nacht Ventil, Freigabe Stützbetrieb Tag, Freigabe Stützbetrieb Tag Ventil, Freigabe Zeitprogramm, Messwert CO ₂ , Messwert Raumtemperatur, Präsenzmelder, Rückmeldung Absenkbetrieb, Rückmeldung Aufheizbetrieb, Rückmeldung Handschaltung, Rückmeldung Managementbedieneinrichtung, Rückmeldung Normalbetrieb, Schaltbefehl Raumkorrektur, Schaltbefehl Ventil, Sollwert Absenkbetrieb, Sollwert CO ₂ , Sollwert Raumkorrektur, Sollwert Raumtemperatur Nacht, Sollwert Raumtemperatur Normalbetrieb, Sollwert Raumtemperatur Schutzbetrieb, Sollwert Raumtemperatur Tag, Sollwert Stützbetrieb Nacht, Sollwert Stützbetrieb Tag, Sollwert minimale Raumtemperatur, Sollwertsteller, Sollwertverschiebung, Stellbefehl, Störmeldung
Regler	Abtastzeit, Außentemperatur Errechnet, D-Anteil, I-Anteil, P-Anteil, Proportionalband, Reglerausgang, Reglereingang, Reset, Rückmeldung Betrieb, Rückmeldung Handschaltung, Rückmeldung Regelabweichung, Schaltbefehl, Sollwert Nachstellzeit, Sollwert Regler, Sollwert Regler Max, Sollwert Regler Min, Stellbefehl, Störmeldung, Verschiebung
Rücklauf	Arbeitspunkt, Grenzwert Winteranfahren, Messwert Rücklauftemperatur, Rücklauf Begrenzung, Rücklauftemperatur Errechnet, Schaltbefehl Begrenzung, Schaltbefehl Frostschutz, Sollwert Frostschutz, Sollwert Maximale Rücklauftemperatur, Sollwert Minimale Rücklauftemperatur, Sollwert Rücklauftemperatur, Sollwert Rücklauftemperatur Errechnet, Störmeldung
Übertrager	Heizkörperexponent, Rückmeldung Heizdecke, Rückmeldung Ventil Zone, Schaltbefehl Heizdecke, Schaltbefehl Ventil Zone, Vorregelung Deckenstrahlplatten Messwert Temperatur, Vorregelung Deckenstrahlplatten Sollwert, Vorregelung Deckenstrahlplatten Status, Vorregelung Deckenstrahlplatten Stellbefehl, Vorregelung Deckenstrahlplatten Temperatur Max, Vorregelung Deckenstrahlplatten Temperatur Min, Vorregelung Deckenstrahlplatten Temperaturdifferenz, Vorregelung Deckenstrahlplatten Zeit
Ventil	Laufzeit Ventil, Laufzeit 3 Punkt Antrieb, Rückmeldung Betrieb, Rückmeldung Handschaltung, Rückmeldung Managementbedieneinrichtung, Rückmeldung Stellsignal, Schaltbefehl, Sicherheit, Sollwert, Sollwert Handschaltung, Sollwert Mischventil, Sollwert Stellsignal Max, Sollwert Stellsignal Min, Stellbefehl, Stellbefehl Max, Stellbefehl Min, Stellbefehl Mischventil, Störmeldung
Vorlauf	Anhebung Vorlauftemperatur, Arbeitspunkt, Frostschutz Vorlauftemperatur, Messwert Vorlauftemperatur, Messwert Vorlauftemperatur Errechnet, Rückmeldung Managementbedieneinrichtung, Rückmeldung Regelabweichung, Schaltbefehl Dämpfung, Schaltbefehl Optimierung, Sollwert Maximale Vorlauftemperatur, Sollwert

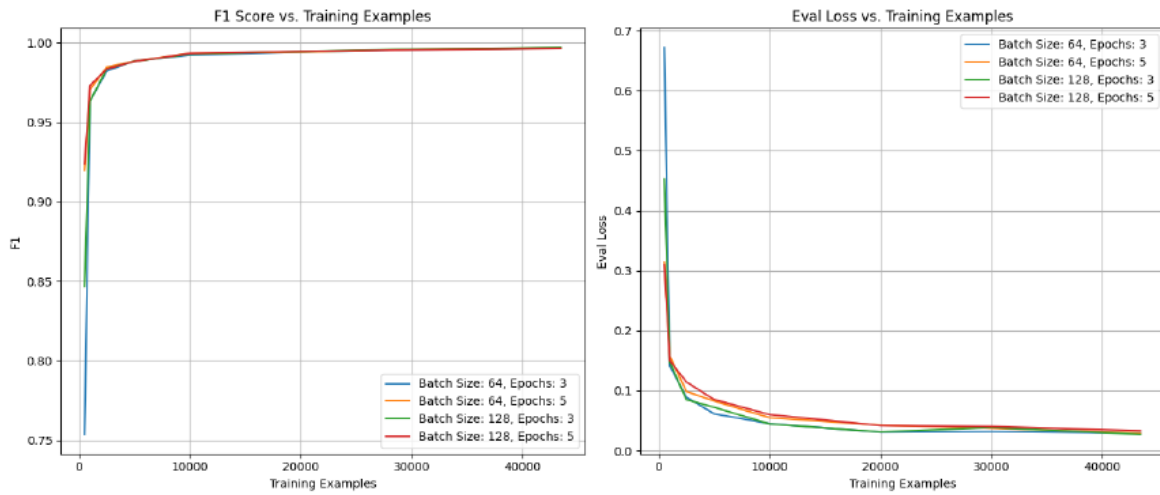
		Minimale Vorlauftemperatur, Sollwert Nachtabsenkung Vorlauftemperatur, Sollwert Vorlauftemperatur, Sollwert Vorlauftemperatur Errechnet, Sollwertkorrektur Vorlauftemperatur, Störmeldung
	Warmwasserbereitung	Alarmmeldung, Anzahl Stufen, Ausschalttemperatur, Ausschaltzeit, Blockierschutz, Einschalttemperatur, Einschaltzeit, Freigabe, Handschaltung Legionellen, Hysterese Sollwert Warmwasserbereitung, Legionellenschaltung Tage, Messwert Wassertemperatur, Messwert Zapftemperatur, Messwert Zirkulationstemperatur, Rückmeldung Betrieb, Rückmeldung Betriebsstunden, Rückmeldung Handschaltung, Rückmeldung Handschaltung Auto, Rückmeldung Legionellenschaltung, Rückmeldung Legionellenschaltung Handschaltung, Rückmeldung Legionellenschaltung Handschaltung Auto, Schaltbefehl, Schaltbefehl Legionellenschaltung, Sollwert Maximale Laufzeit Legionellen, Sollwert Temperatur Legionellen, Sollwert Warmwasserbereitung, Sollwert Zirkulationstemperatur, Sollwert Zirkulationstemperatur Legionellen, Stellbefehl, Störmeldung, Warnmeldung Legionellen, Wartungsmeldung, Wochenprogramm
	Wärmemengenzähler	Messwert Durchfluss, Messwert Kältemenge, Messwert Leistung, Messwert Rücklauftemperatur, Messwert Temperaturdifferenz, Messwert Volumenstrom, Messwert Vorlauftemperatur, Messwert Wärmeleistung, Messwert Wärmemenge, Messwert Wärmemenge Energie, Messwert Wärmemenge Volumen, Störmeldung
Wärme speichern	Speicher	Ausschaltgrenzwert, Einschaltgrenzwert, Messwert Außentemperatur, Messwert Speichertemperatur, Messwert Speichertemperatur Mitte, Messwert Speichertemperatur Oben, Messwert Speichertemperatur Unten, Rückmeldung Handschaltung, Schaltbefehl, Schaltdifferenz, Sollwert Speichertemperatur, Sollwert Speichertemperatur Oben, Sollwert Speichertemperatur Unten, Störmeldung, Vorrangschaltung
Wärme beziehen	Fernwärme	Alarmmeldung, Anforderung, Blockierschutz, Freigabe, Heizkurve, Messwert Außentemperatur, Messwert Drehzahl, Messwert Druck, Messwert Leistung, Messwert Rücklauftemperatur, Messwert Rücklauftemperatur Primär, Messwert Rücklauftemperatur Sekundär, Messwert Temperatur, Messwert Vorlauftemperatur, Messwert Vorlauftemperatur Primär, Messwert Vorlauftemperatur Sekundär, Messwert Durchfluss, Offset Vorlauftemperatur, Reglerparameter, Reset Betriebsstunden, Rückmeldung Betrieb, Rückmeldung Betriebsstunden, Rückmeldung Handschaltung, Rückmeldung Klappe, Rückmeldung Pumpe, Rückmeldung Regelabweichung, Rückmeldung Ventil, Schaltbefehl Anlage, Schaltbefehl Klappe, Schaltbefehl Pumpe, Schaltbefehl Ventil, Sollwert Außentemperatur Ein Aus, Sollwert Nachlaufzeit Pumpe, Sollwert Nacht, Sollwert Rücklauftemperatur, Sollwert Rücklauftemperaturbegrenzung, Sollwert Temperatur, Sollwert Ventil, Sollwert Vorlauftemperatur, Sollwert Vorlauftemperaturbegrenzung, Sollwertverschiebung, Stellbefehl Pumpe, Stellbefehl Ventil, Störmeldung, Warnmeldung, Zähler
Luft bereitstellen	Abluft allgemein	Alarmmeldung, Befehlsausführkontrolle, Messwert Druck, Messwert Feuchte, Messwert Luftqualität, Messwert Temperatur, Messwert Volumenstrom, Rückmeldung Betrieb, Rückmeldung Betriebsstunden, Rückmeldung Handschaltung, Rückmeldung Managementbedieneinrichtung, Rückmeldung Nutzzeitverlängerung, Rückmeldung Stellsignal, Rückmeldung Zeitprogramm, Schaltbefehl Anlage, Sollwert CO2 Konzentration, Sollwert Druck, Sollwert Feuchte, Sollwert Temperatur, Sollwert Volumenstrom, Sollwert Zeitverzögerung, Stellbefehl, Störmeldung, Warnmeldung Feuchte, Wartungsmeldung, Werkseinstellungen

	Abluftfilter, Außenluftfilter, Filter, Zuluftfilter	Alarmmeldung, Messwert Druck, Störmeldung, Wartungsmeldung
	Abluftklappe, Außenluftklappe, Fortluftklappe, Klappe, Zuluftklappe	Alarmmeldung, Befehlsausführkontrolle, Rückmeldung Stellsignal, Rückmeldung Betrieb, Rückmeldung Handschaltung, Rückmeldung Klappe Auf, Rückmeldung Klappe Zu, Rückmeldung Managementbedieneinrichtung, Schaltbefehl, Sollwert Stellsignal, Stellbefehl, Störmeldung
	Abluftventilator	Alarmmeldung, Anzahl Schaltungen, Befehlsausführkontrolle, Laufüberwachung, Messwert Druck, Reset Betriebsstunden, Rückmeldung Betrieb, Rückmeldung Betriebsstunden, Rückmeldung Handschaltung, Rückmeldung Managementbedieneinrichtung, Rückmeldung Nutzzeitverlängerung, Rückmeldung Reperaturschalter, Rückmeldung Reset Betriebsstunden, Rückmeldung Stellsignal, Schaltbefehl, Sollwert Laufzeit, Sollwert Stellsignal, Stellbefehl, Störmeldung, Wartungsmeldung
	Befeuchter	Reset Betriebsstunden, Rückmeldung Betrieb, Rückmeldung Betriebsstunden, Rückmeldung Handschaltung, Rückmeldung Stellsignal, Schaltbefehl, Sollwert Befeuchten, Stellbefehl, Störmeldung
	Erhitzer	Alarmmeldung Frostschutz, Befehlsausführkontrolle, Freigabe, Messwert Energieverbrauch, Messwert Leistung, Messwert Temperatur, Messwert Volumen, Messwert Volumenstrom, Reset Betriebsstunden, Rückmeldung Betrieb, Rückmeldung Handschaltung, Rückmeldung Stellsignal, Schaltbefehl, Schaltbefehl Blockierschutz, Schaltbefehl Frostschutz, Sollwert Dauerfreigabe, Sollwert Frostschutz, Sollwert Laufzeit Blockierschutz, Sollwert Nachstellzeit, Sollwert Stellsignal, Sollwert Temperatur, Spülzeit, Stellbefehl, Stellbefehl Ventil, Störmeldung
	Gerät allgemein	Alarmmeldung, Anforderung Tableau, Anlagenuhr, Ausschaltzeit, Einschaltzeit, Messwert Außenfeuchte, Messwert Außentemperatur, Quittierung, Rückmeldung Anfahrbetrieb, Rückmeldung Anlage Fern, Rückmeldung Betrieb, Rückmeldung Betriebsstunden, Rückmeldung Entfeuchtung, Rückmeldung Freie Nachtkühlung, Rückmeldung Handschaltung, Rückmeldung Managementbedieneinrichtung, Rückmeldung Nutzzeitverlängerung, Rückmeldung Präsenzmelder, Rückmeldung Restlaufzeit Nutzzeitverlängerung, Rückmeldung Spülen, Rückmeldung Zeitprogramm, Schaltbefehl, Schaltbefehl Anlage, Schaltbefehl Anlage Fern, Schaltbefehl Nachtkühlung, Schaltbefehl Nutzzeitverlängerung, Schaltbefehl Quittierung, Schaltbefehl Tagesprogramm, Schaltbefehl Zeitprogramm, Schalthysterese, Sollwert Auskühlschutz, Sollwert Feuchte, Sollwert Freie Nachtkühlung, Sollwert Kühlbedarf, Sollwert Maximale Einschaltverzögerung, Sollwert Minimale Einschaltverzögerung, Sollwert Nutzzeitverlängerung, Sollwert Spülzeit, Sollwert Wärmebedarf, Stellbefehl, Störmeldung, Zurücksetzen, Übersteuert
	Kältemengenzähler	Messwert Kälteleistung, Messwert Kältemenge, Messwert Volumen, Messwert Volumenstrom
	Kühler	Alarmmeldung Frostschutz, Befehlsausführkontrolle, Rückmeldung Betrieb, Rückmeldung Betriebsstunden, Rückmeldung Handschaltung, Rückmeldung Managementbedieneinrichtung, Rückmeldung Stellsignal, Schaltbefehl, Sollwert Kühlbedarf, Stellbefehl, Störmeldung, Zählwert Kältemenge
	Regler	D-Anteil, Grenzwert Regler, Hysterese, I-Anteil, P-Anteil, Proportionalband, Reglerausgang, Reglereingang, Reset, Rückmeldung Handschaltung, Rückmeldung Managementbedieneinrichtung, Rückmel-

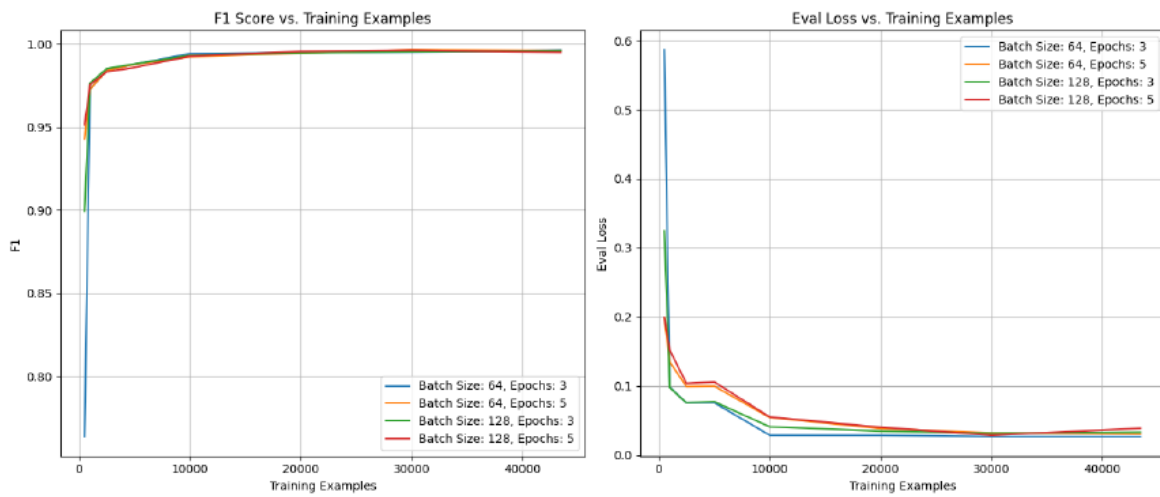
		<p>dung Regelabweichung, Schaltbefehl, Sollwert Nachstellzeit, Sollwert Regler, Sollwert Regler Max, Sollwert Regler Min, Stellbefehl, Störmeldung, Stützwert, Totzone, Wirksinn</p>
	Umluft	<p>Messwert Temperatur, Rückmeldung Betrieb, Rückmeldung Handschaltung, Rückmeldung Stellsignal, Stellbefehl, Störmeldung</p>
	Ventilator	<p>Alarmmeldung, Anzahl Schaltungen, Befehlsausführkontrolle, Rückmeldung Betrieb, Rückmeldung Drehzahl, Rückmeldung Handschaltung, Schaltbefehl, Sollwert Laufzeit, Sollwert Stellsignal, Stellbefehl, Störmeldung, Wartungsmeldung</p>
	Wärmemengenzähler	<p>Messwert Leistung, Messwert Temperaturdifferenz, Messwert Wärmemenge</p>
	Wärmerückgewinnung	<p>Alarmmeldung, Alarmmeldung Frostschutz, Messwert Temperatur, Messwert Temperatur Austritt Abluft, Messwert Temperatur Austritt Zuluft, Messwert Temperatur Eintritt Abluft, Messwert Temperatur Eintritt Zuluft, Messwert Vorlauftemperatur, Reset Betriebsstunden, Rückmeldung Betrieb, Rückmeldung Betriebsstunden, Rückmeldung Handschaltung, Rückmeldung Stellsignal, Schaltbefehl, Sollwert Frostschutz, Sollwert Stellsignal, Sollwert Stellsignal Max, Sollwert Stellsignal Min, Stellbefehl, Störmeldung</p>
	Zuluft allgemein	<p>Alarmmeldung, Alarmmeldung Frostschutz, Messwert Druck, Messwert Enthalpie, Messwert Feuchte, Messwert Temperatur, Messwert Volumenstrom, Rückmeldung Betrieb, Rückmeldung Betriebsstunden, Rückmeldung Handschaltung, Rückmeldung Managementbedieneinrichtung, Rückmeldung Ventil, Schaltbefehl Anlage, Sollwert CO2 Konzentration, Sollwert CO2 Konzentration Max, Sollwert Druck, Sollwert Enthalpie, Sollwert Feuchte, Sollwert Feuchte Max, Sollwert Feuchte Min, Sollwert Frostschutz, Sollwert Grenzwert Soll Ist Abweichung Temperatur, Sollwert Temperatur, Sollwert Temperatur Max, Sollwert Temperatur Min, Sollwert Volumenstrom, Sollwert Volumenstrom Max, Sollwert Volumenstrom Min, Sollwert Zeitverzögerung, Störmeldung, Warnmeldung Temperatur Niedrig, Warnmeldung Feuchte, Warnmeldung Temperatur Hoch, Wartungsmeldung, Werkseinstellungen</p>
	Zuluftventilator	<p>Alarmmeldung, Anzahl Schaltungen, Befehlsausführkontrolle, Laufüberwachung, Messwert Differenzdruck, Messwert Volumenstrom, Reset Betriebsstunden, Rückmeldung Betrieb, Rückmeldung Betriebsstunden, Rückmeldung Drehzahl, Rückmeldung Handschaltung, Rückmeldung Laufüberwachung, Rückmeldung Managementbedieneinrichtung, Rückmeldung Reperaturschalter, Rückmeldung Stellsignal, Schaltbefehl, Sollwert Laufzeit, Sollwert Stellsignal, Stellbefehl, Störmeldung, Wartungsmeldung</p>
Luft verteilen	Auslass	<p>Rückmeldung Handschaltung, Rückmeldung Stellsignal, Stellbefehl, Zeitverzögerung</p>
	Raum	<p>Alarmer Zurück Gestellt, Alarmmeldung, Messwert CO2, Messwert Feuchte, Messwert Raumtemperatur, Rückmeldung Betrieb, Rückmeldung Fensterkontakt, Rückmeldung Handschaltung, Rückmeldung Kommunikation, Rückmeldung Managementbedieneinrichtung, Rückmeldung Präsenzmelder, Rückmeldung Trennwandkontakt, Rückmeldung Ventil, Schalthysterese, Sollwert Ausschaltverzögerung, Sollwert CO2 Max, Sollwert CO2 Min, Sollwert CO3, Sollwert Feuchte, Sollwert Raumtemperatur, Störmeldung, Warnmeldung Temperatur Niedrig, Warnmeldung CO2 Hoch, Warnmeldung Feuchte, Warnmeldung Temperatur Hoch</p>
	Volumenstromregler (Abluft,	<p>Messwert Volumenstrom, Rückmeldung Handschaltung, Rückmeldung Managementbedieneinrichtung, Rückmeldung Stellsignal, Schaltbefehl, Sollwert Volumenstrom, Stellbefehl</p>

	Zuluft)	
	Volumenstromregler Raum	Rückmeldung Handschaltung, Rückmeldung Stellsignal, Schaltbefehl, Stellbefehl
Kälte erzeugen	Kälteanlage	Anforderung, Messwert Energieverbrauch, Messwert Leistung, Rückmeldung Betrieb, Rückmeldung Handschaltung, Rückmeldung Managementbedieneinrichtung, Schaltbefehl, Störmeldung
	Kältekreis allgemein	Grenzwert Außentemperatur, Messwert Außentemperatur, Messwert Druck
	Kältemaschine	Anforderung, Hysterese, Leistungszahl, Messwert Druck Verdampfer, Messwert Druck Verflüssiger, Messwert Kälteleistung, Messwert Stromaufnahme, Messwert Temperatur Kaltwassereintritt, Messwert Temperatur Kühlwasseraustritt, Messwert Temperatur Kühlwassereintritt, Messwert Verdampfer Austritt, Messwert Verdampfer Eintritt, Messwert Verflüssiger Austritt, Messwert Verflüssiger Eintritt, Messwert Verflüssiger Temperaturniveau, Messwert Volumenstrom, Rückmeldung Aktueller Sollwert, Rückmeldung Betrieb, Rückmeldung Betriebsstunden, Rückmeldung Handschaltung, Rückmeldung Kälteleistung, Rückmeldung Managementbedieneinrichtung, Schaltbefehl, Sollwert Stellsignal, Störmeldung
	Kältemengenzähler	Messwert Kälteleistung, Messwert Kältemenge, Messwert Rücklauf-temperatur, Messwert Vorlauf-temperatur
	Klappe	Rückmeldung Handschaltung, Rückmeldung Klappe Auf, Rückmeldung Klappe Zu, Schaltbefehl
	Pumpe	Anforderung, Rückmeldung Betrieb, Rückmeldung Betriebsstunden, Rückmeldung Handschaltung, Rückmeldung Managementbedieneinrichtung, Schaltbefehl, Störmeldung
	Regler	D-Anteil, I-Anteil, P-Anteil, Sollwert, Sollwert Regler Max, Sollwert Regler Min, Stellbefehl, Totzeit
	Rückkühlwerk	Grenzwert Druck, Messwert Drehzahl, Messwert Druck, Messwert Leistung, Rückmeldung Betrieb, Rückmeldung Betriebsstunden, Rückmeldung Handschaltung, Rückmeldung Managementbedieneinrichtung, Schaltbefehl, Sollwert Stellsignal, Störmeldung
	Rücklauf	Messwert Rücklauf-temperatur, Sollwert Rücklauf-temperatur
	Ventil	Freigabe Sollwert, Rückmeldung Handschaltung, Rückmeldung Stellsignal, Stellbefehl
	Vorlauf	Messwert Vorlauf-temperatur, Sollwert Vorlauf-temperatur
	Wärmemengenzähler	Messwert Wärmemenge, Störmeldung

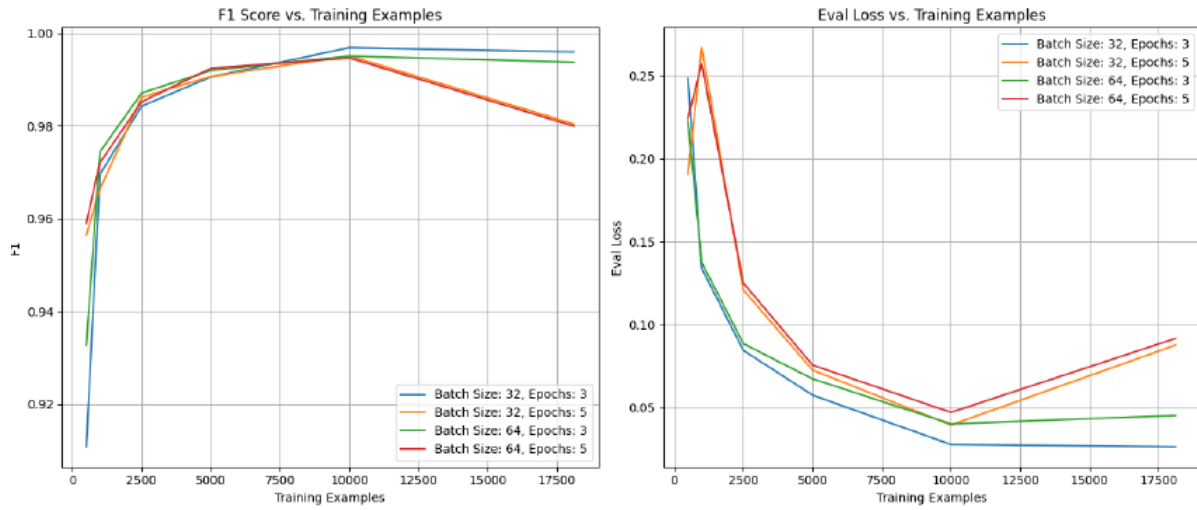
3. F1-Scores und Evaluation-Loss der NLP-Modelle IDiS und gBERT



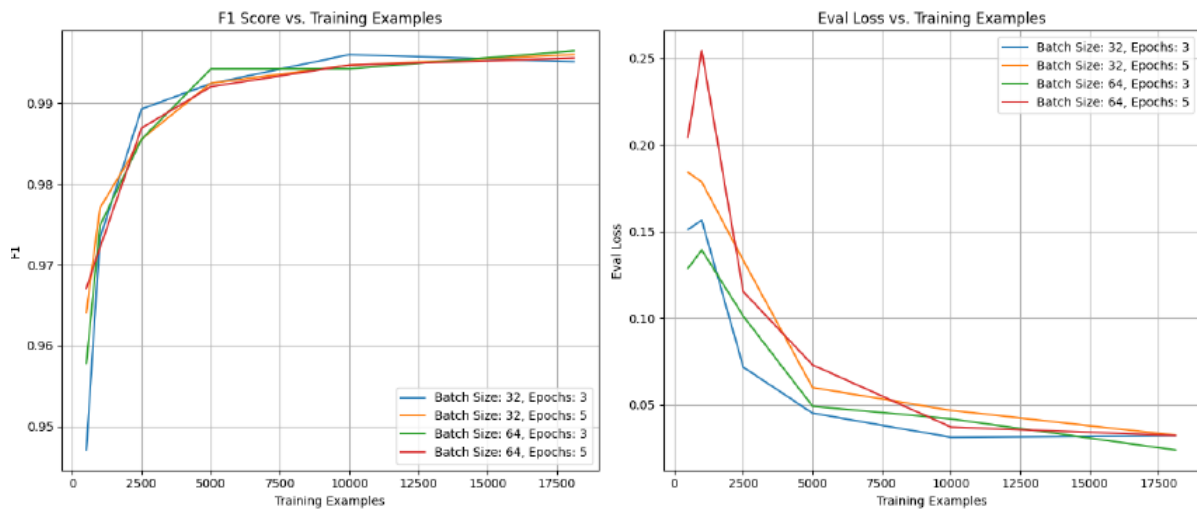
(a) F1-Score und Evaluation-Loss Grundfunktion - gBERT



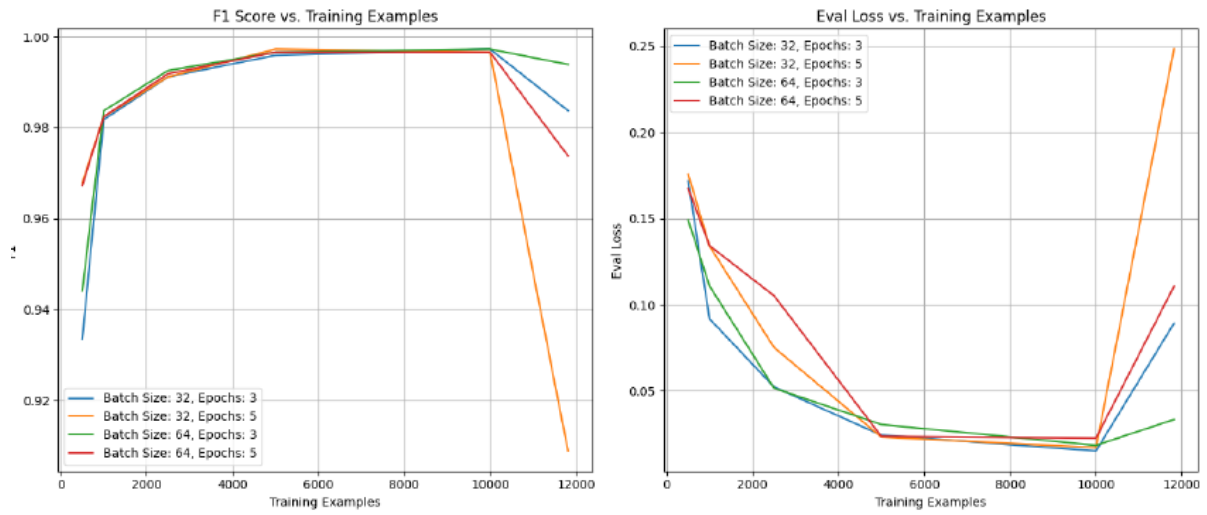
(b) F1-Score und Evaluation-Loss Grundfunktion - IDiS



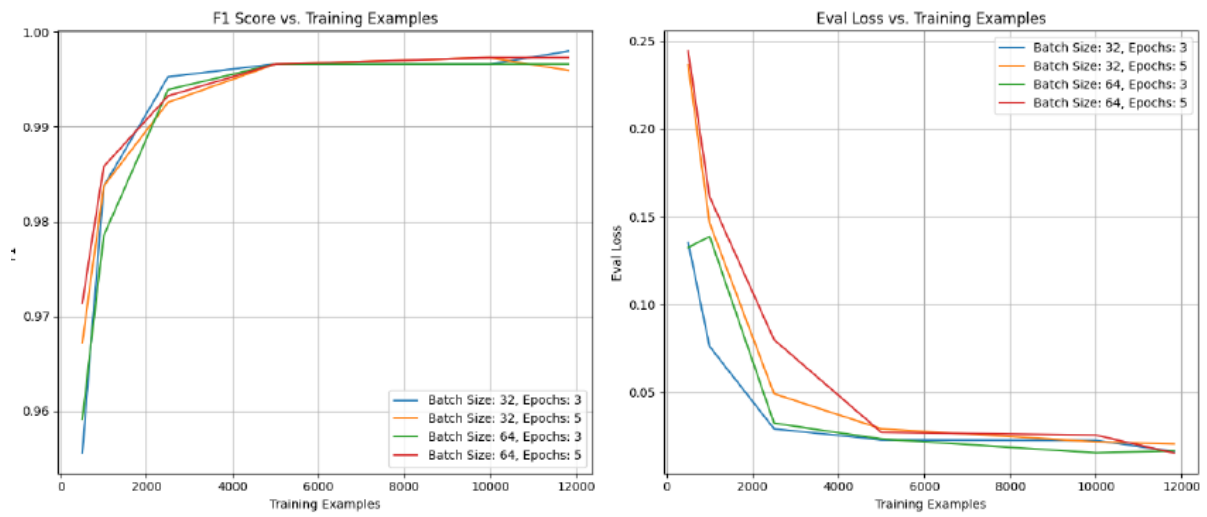
(a) F1-Score und Evaluation-Loss Wärme versorgen - gBERT



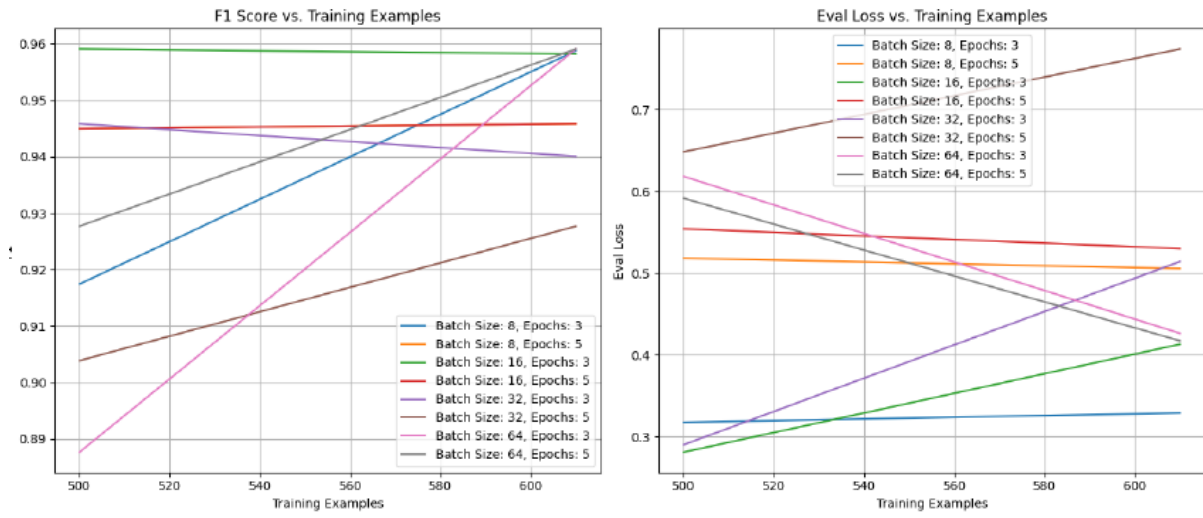
(b) F1-Score und Evaluation-Loss Wärme versorgen - IDiS



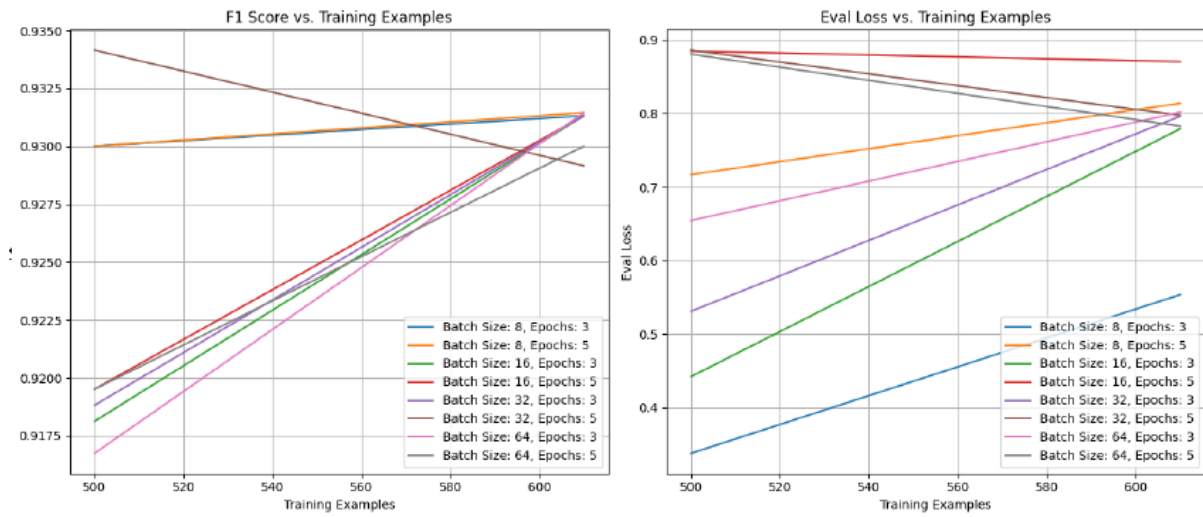
(a) F1-Score und Evaluation-Loss Luft versorgen - gBERT



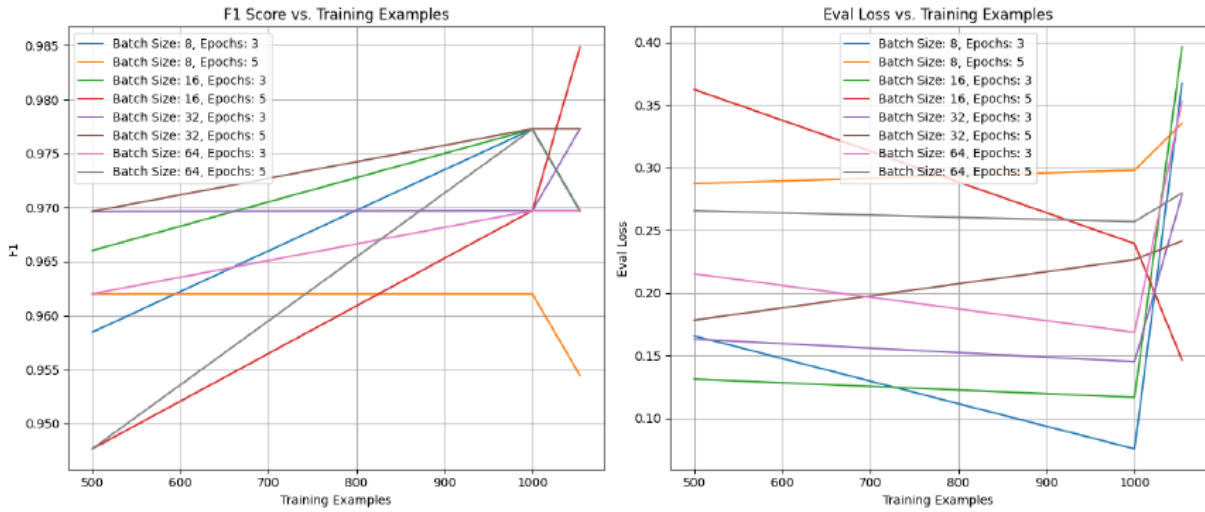
(b) F1-Score und Evaluation-Loss Luft versorgen - IDiS



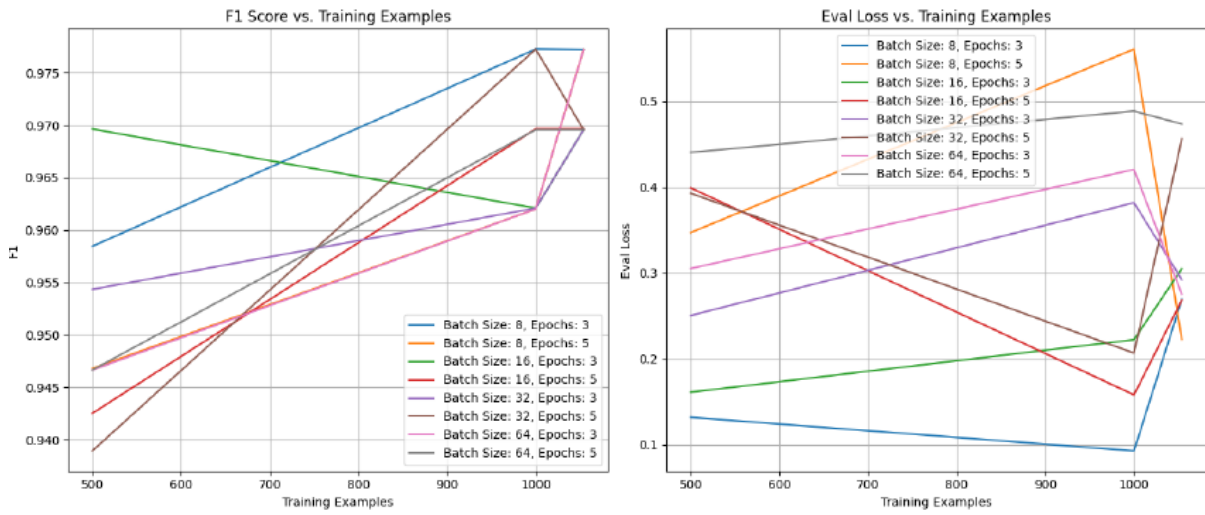
(a) F1-Score und Evaluation-Loss Medien versorgen - gBERT



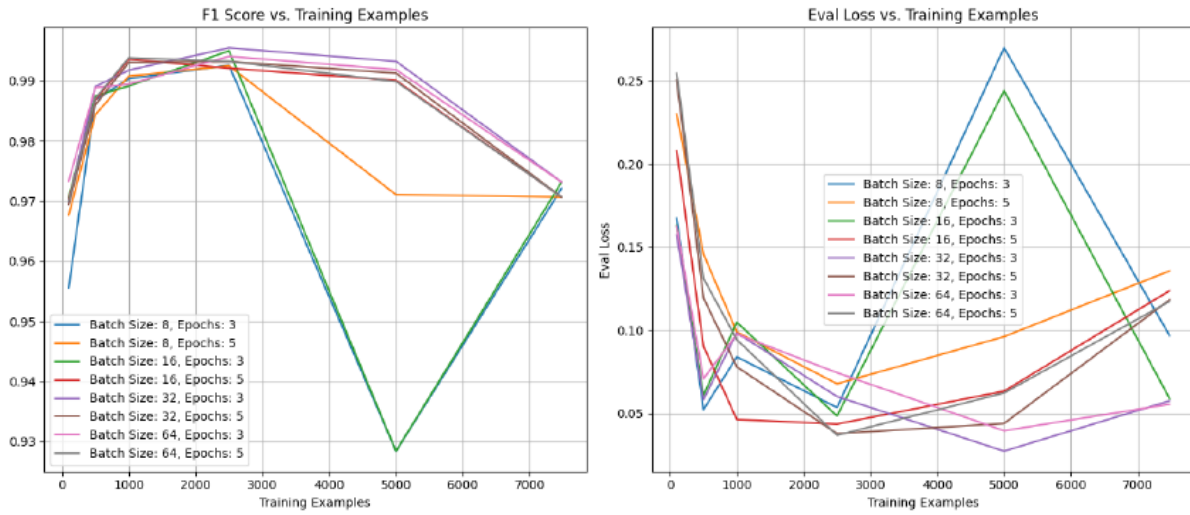
(b) F1-Score und Evaluation-Loss Medien versorgen - IDiS



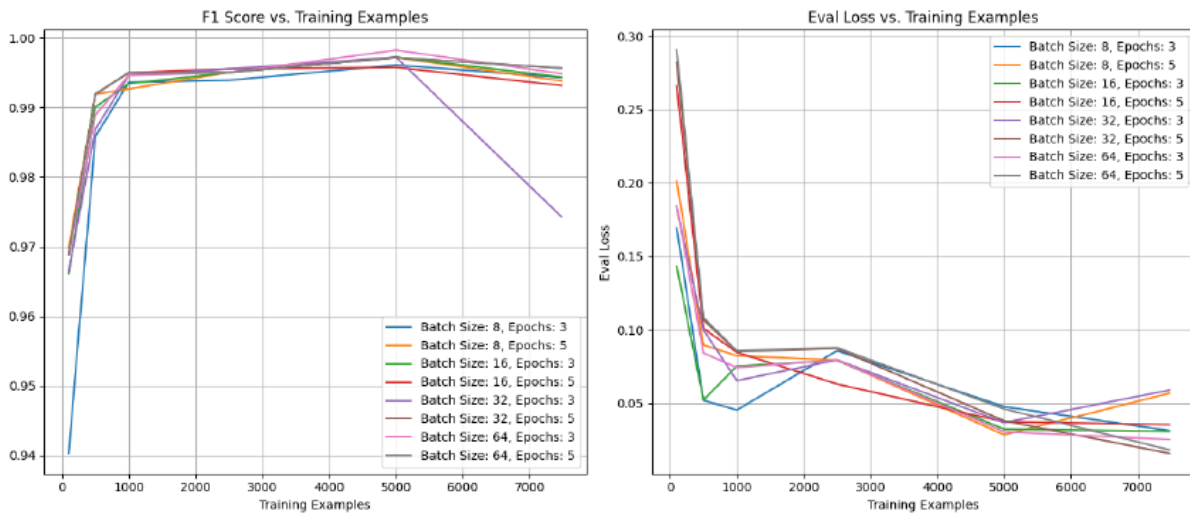
(a) F1-Score und Evaluation-Loss Kälte versorgen - gBERT



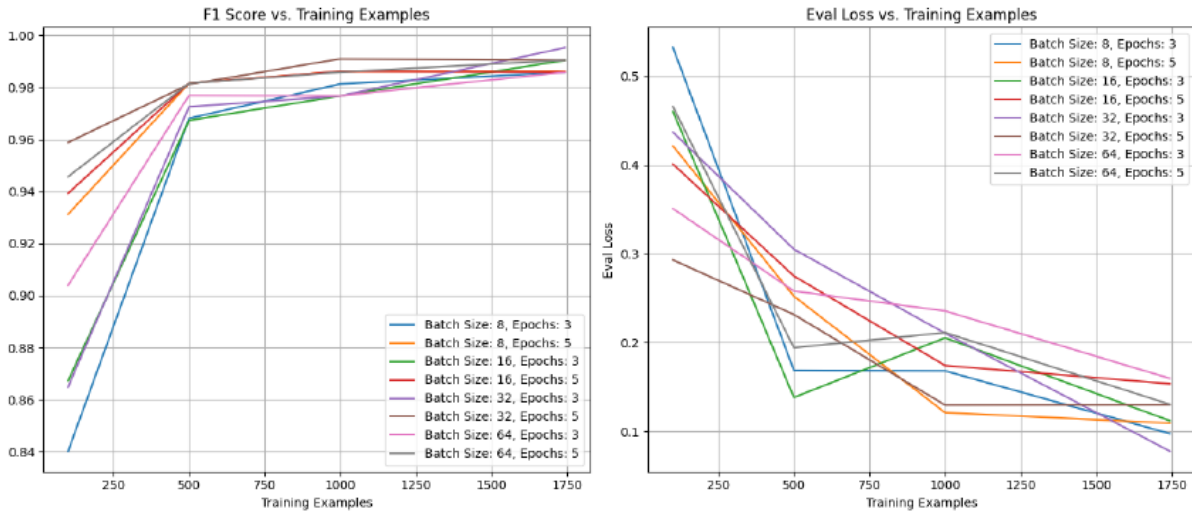
(b) F1-Score und Evaluation-Loss Kälte versorgen - IDiS



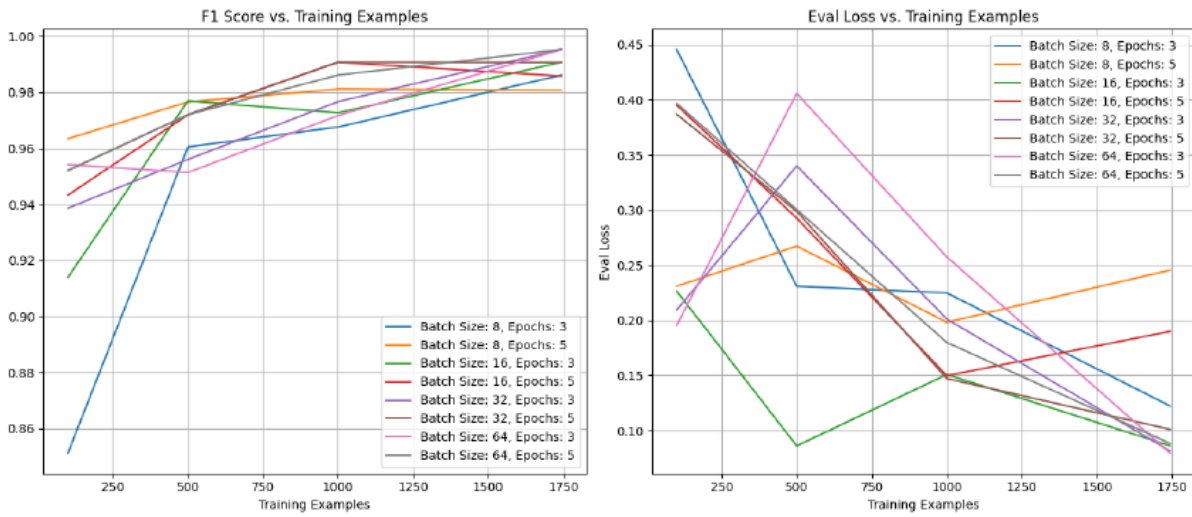
(a) F1-Score und Evaluation-Loss Sichern - gBERT



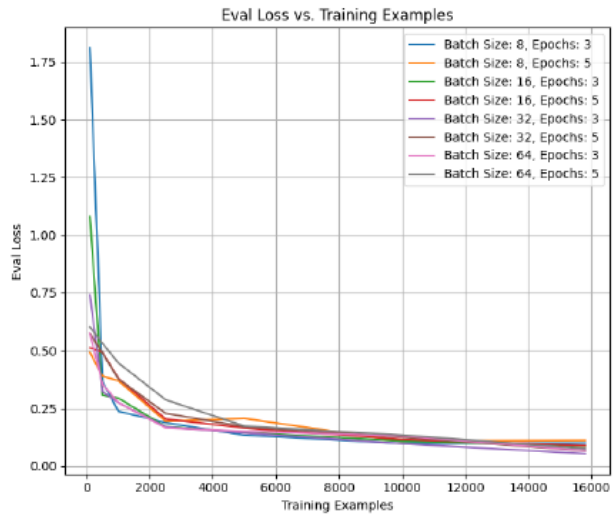
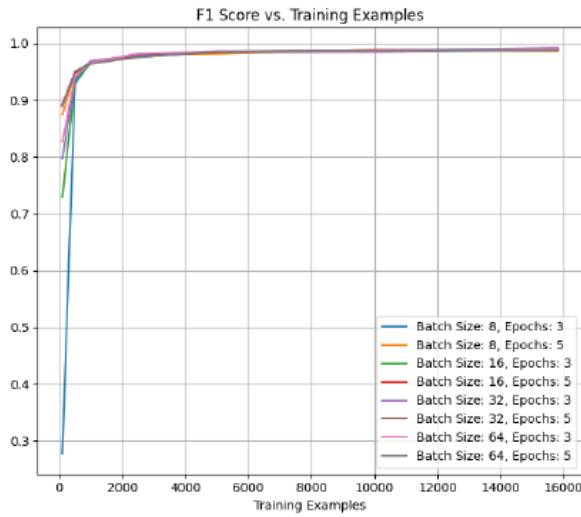
(b) F1-Score und Evaluation-Loss Sichern - IDiS



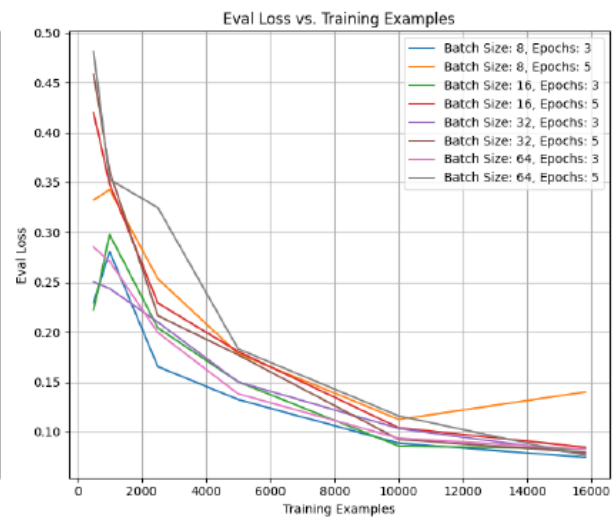
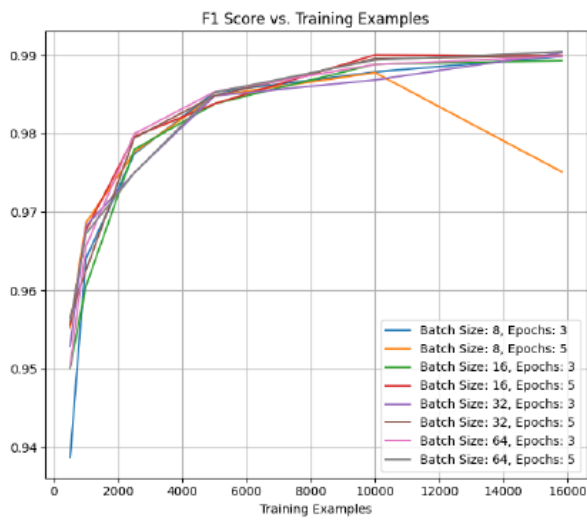
(a) F1-Score und Evaluation-Loss Wärme erzeugen - gBERT



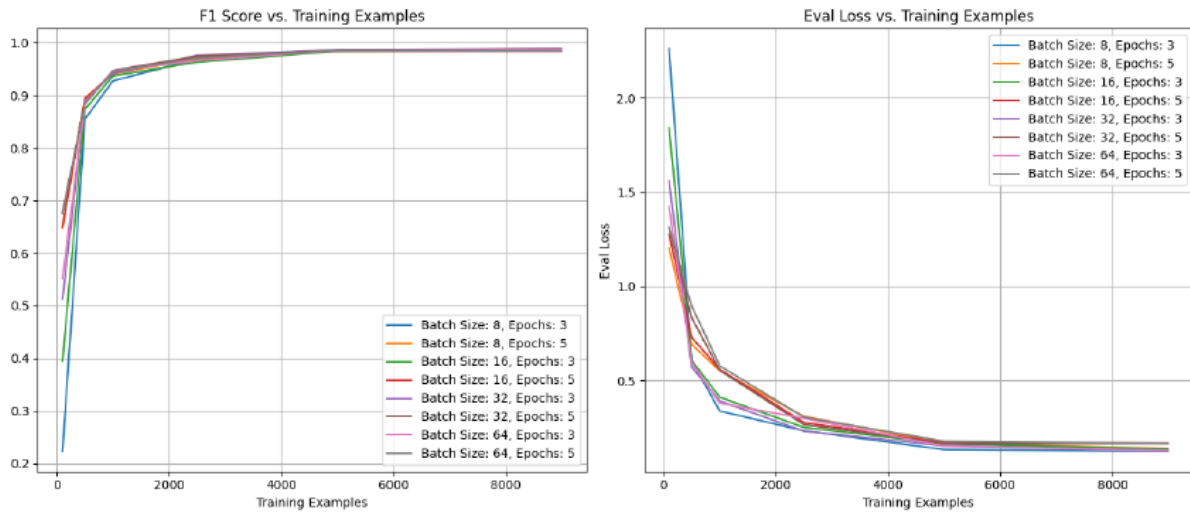
(b) F1-Score und Evaluation-Loss Wärme erzeugen - IDiS



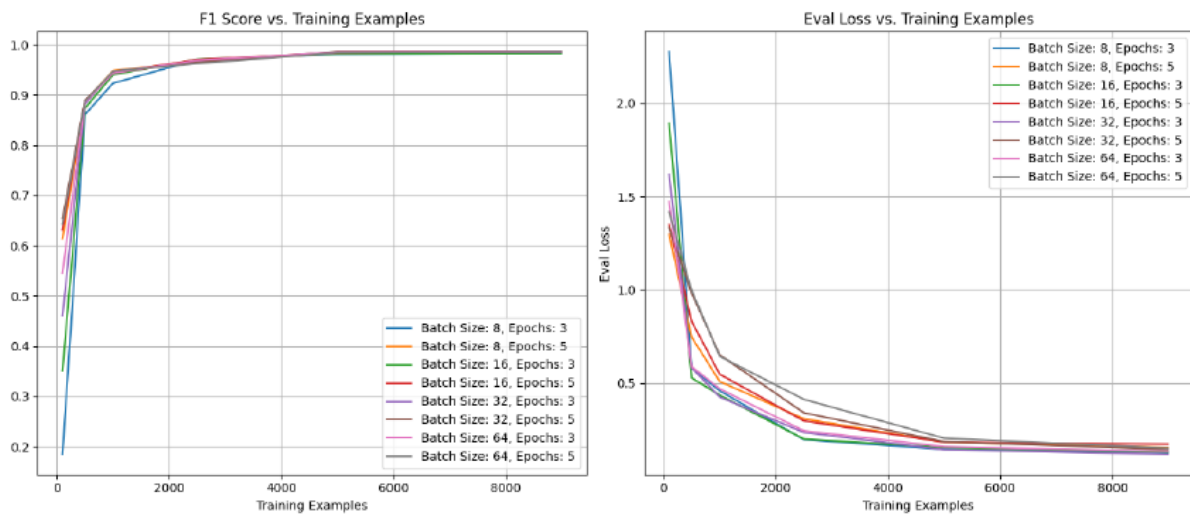
(a) F1-Score und Evaluation-Loss Wärme verteilen - gBERT



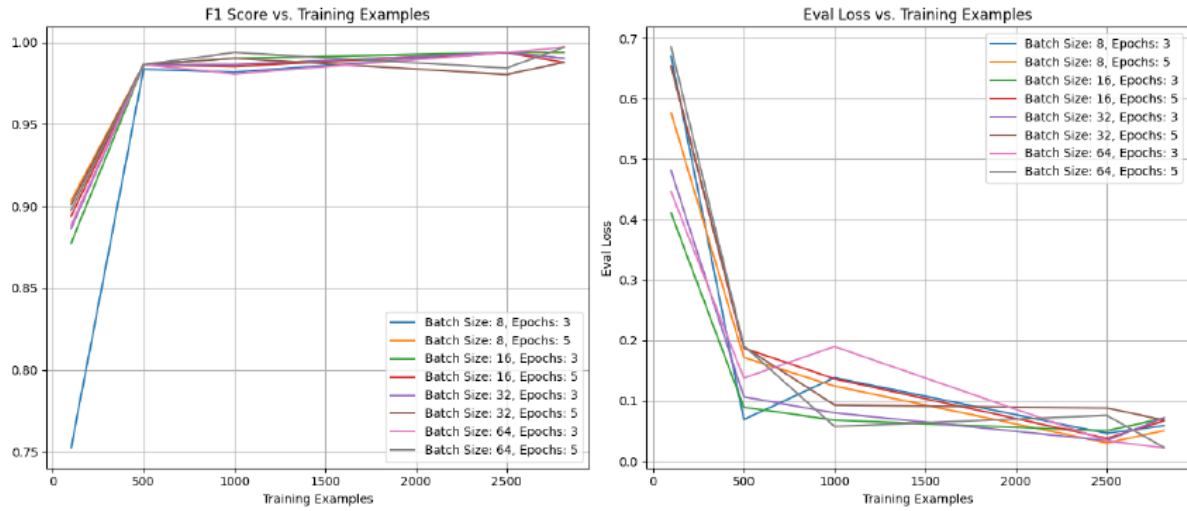
(b) F1-Score und Evaluation-Loss Wärme verteilen - IDiS



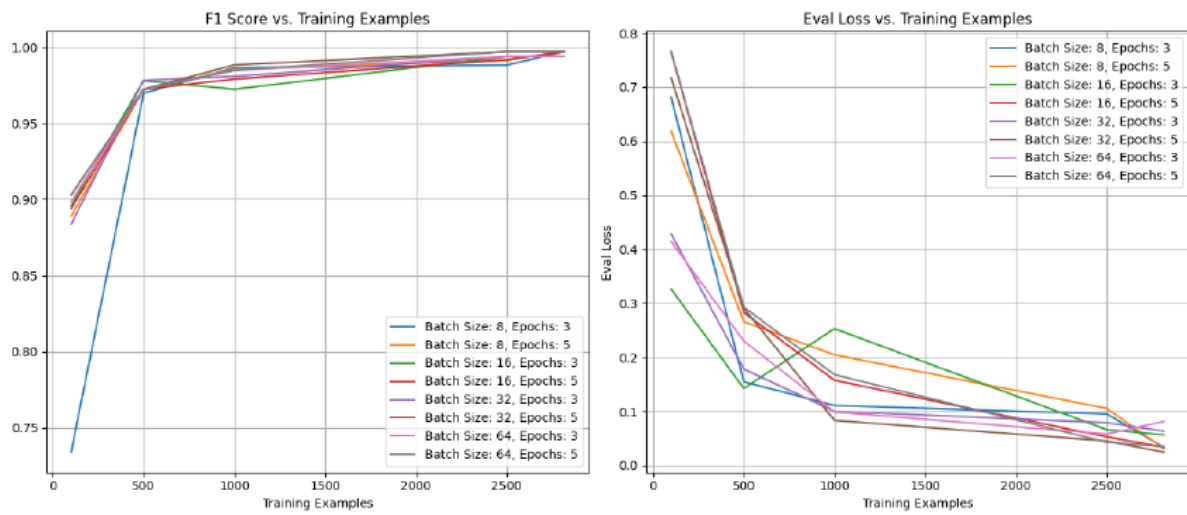
(a) F1-Score und Evaluation-Loss Luft bereitstellen - gBERT



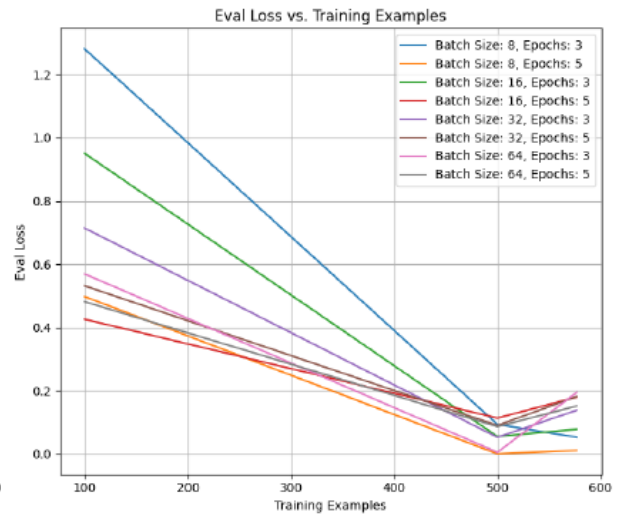
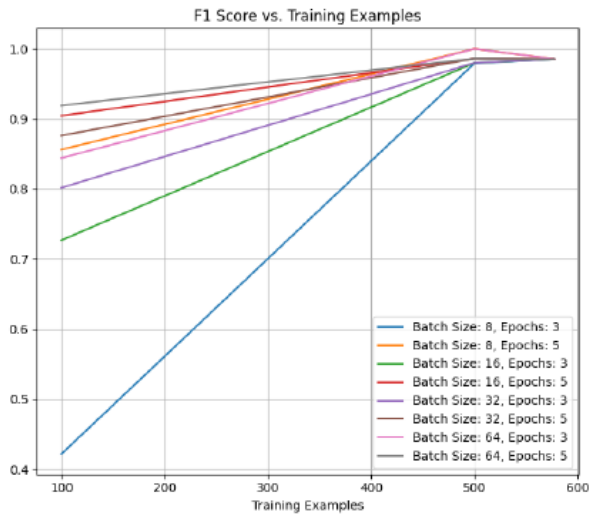
(b) F1-Score und Evaluation-Loss Luft bereitstellen - IDiS



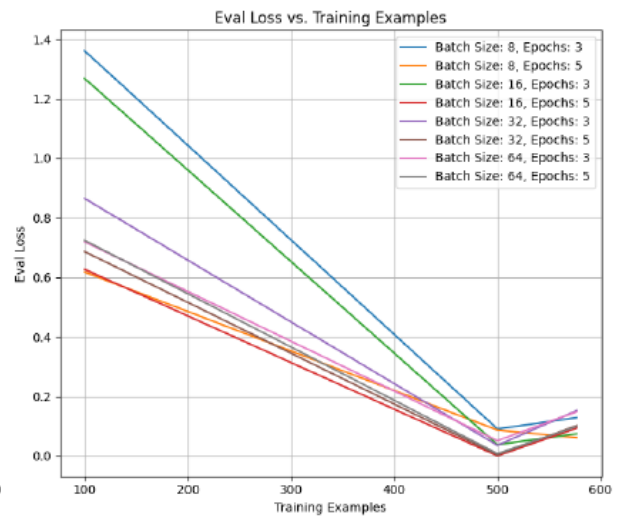
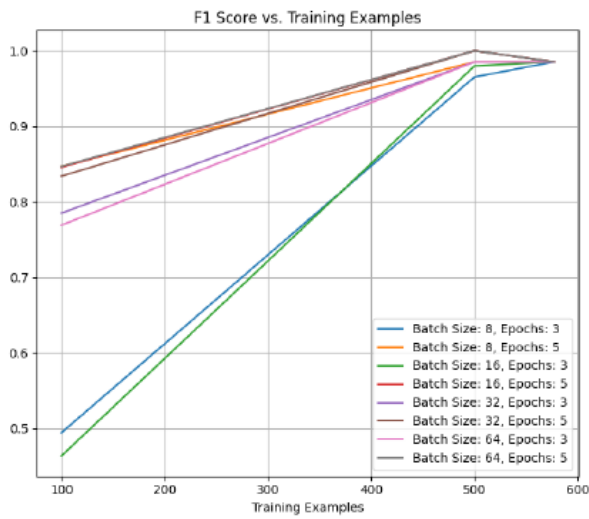
(a) F1-Score und Evaluation-Loss Luft verteilen - gBERT



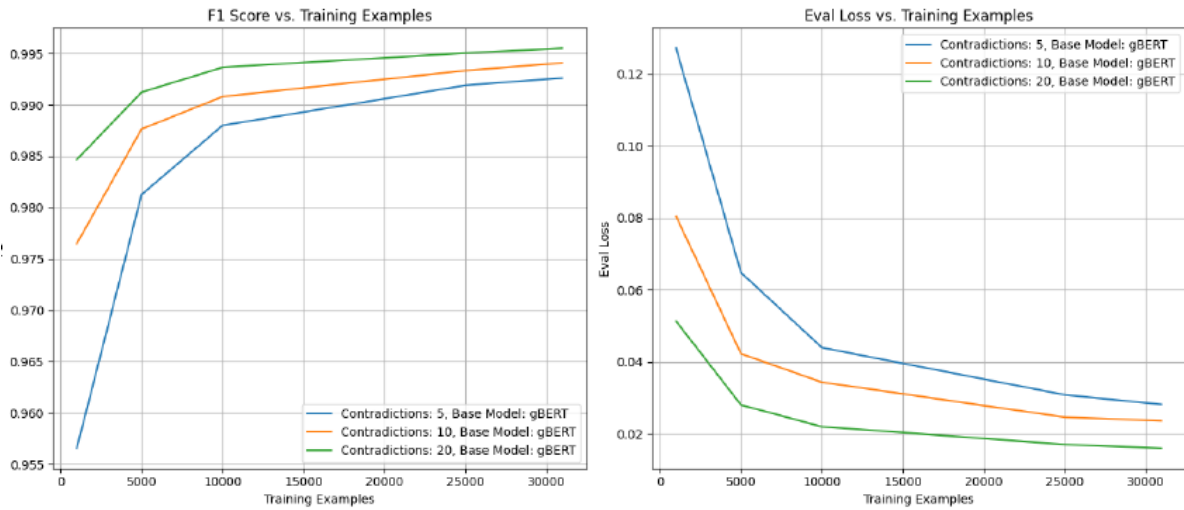
(b) F1-Score und Evaluation-Loss Luft verteilen - IDiS



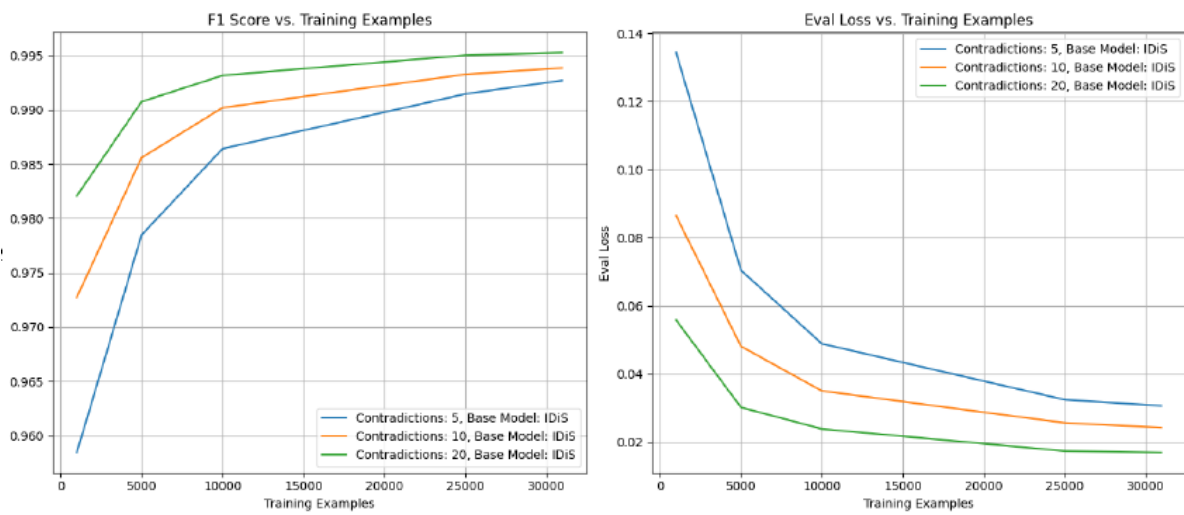
(a) F1-Score und Evaluation-Loss Kälte erzeugen - gBERT



(b) F1-Score und Evaluation-Loss Kälte erzeugen - IDiS

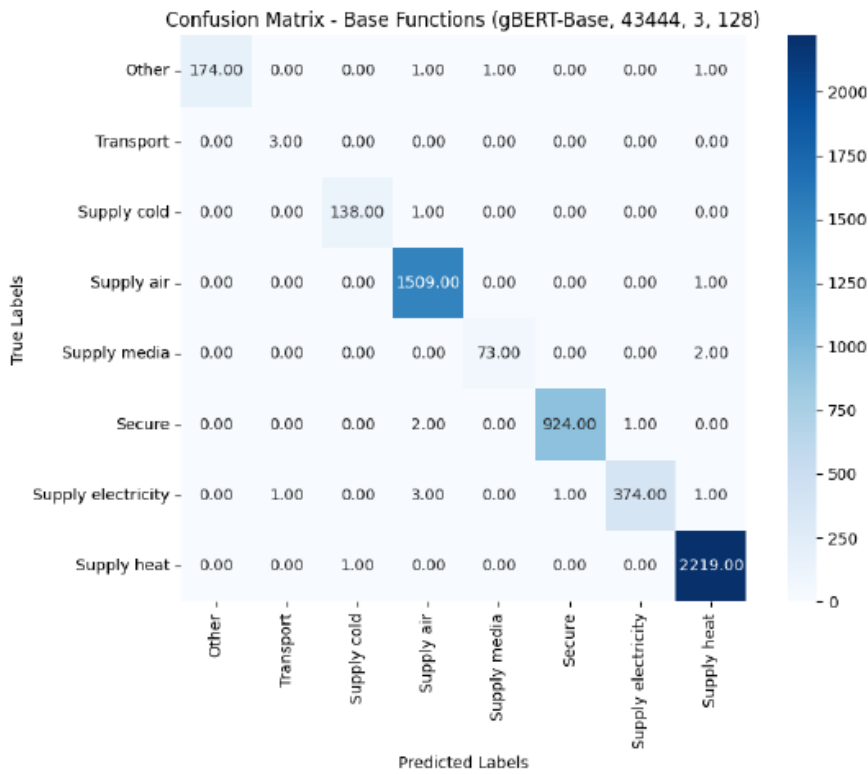


(a) F1-Score und Evaluation-Loss Datenpunkte - gBERT

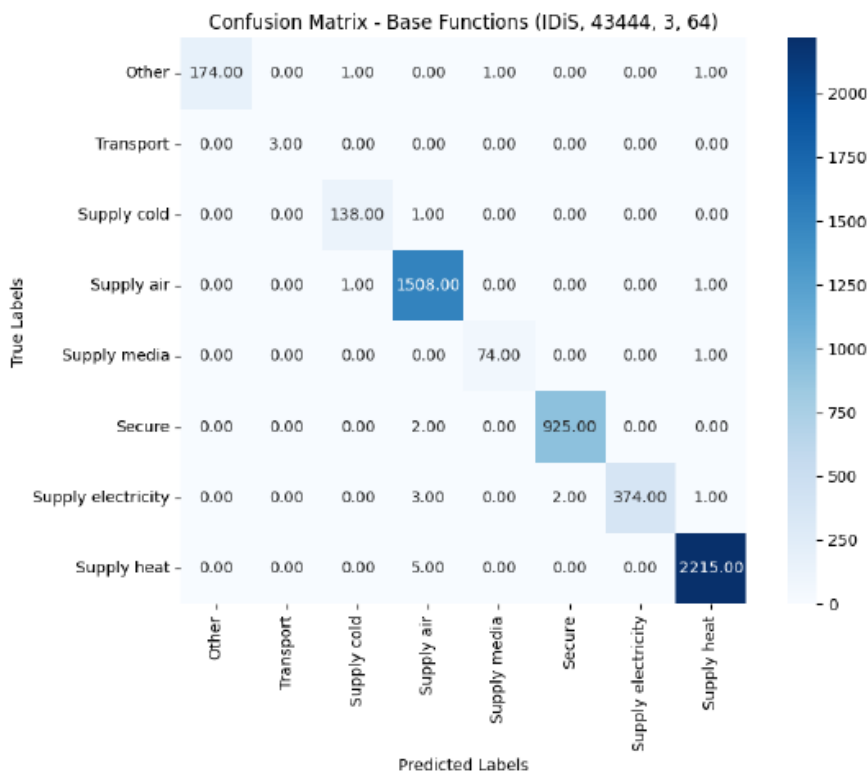


(b) F1-Score und Evaluation-Loss Datenpunkte - IDiS

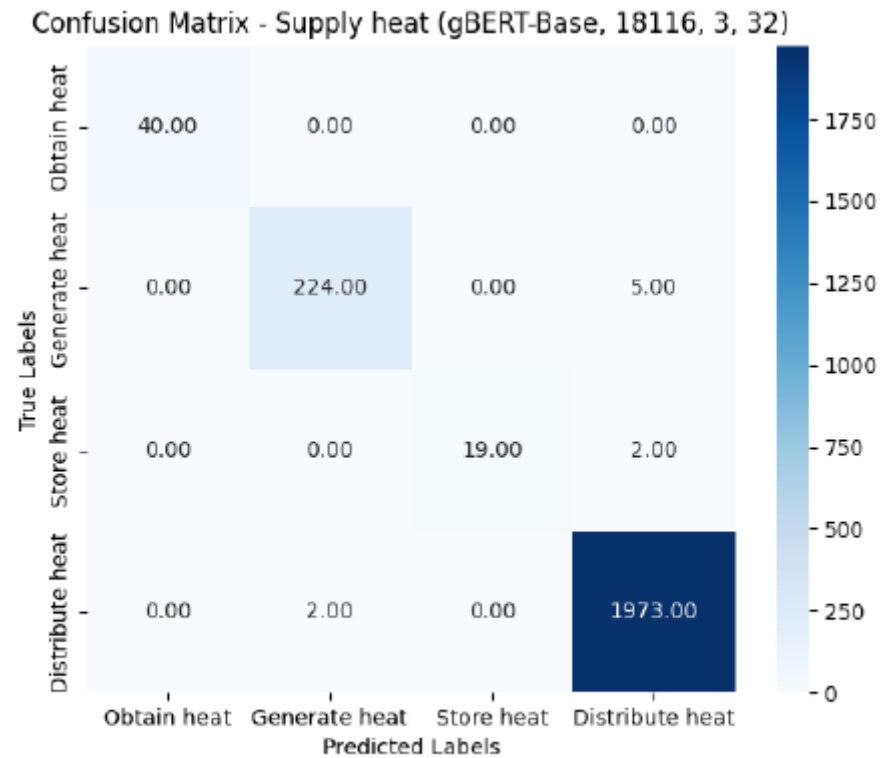
4. Konfusionsmatrizen der NLP-Modelle IDiS und gBERT



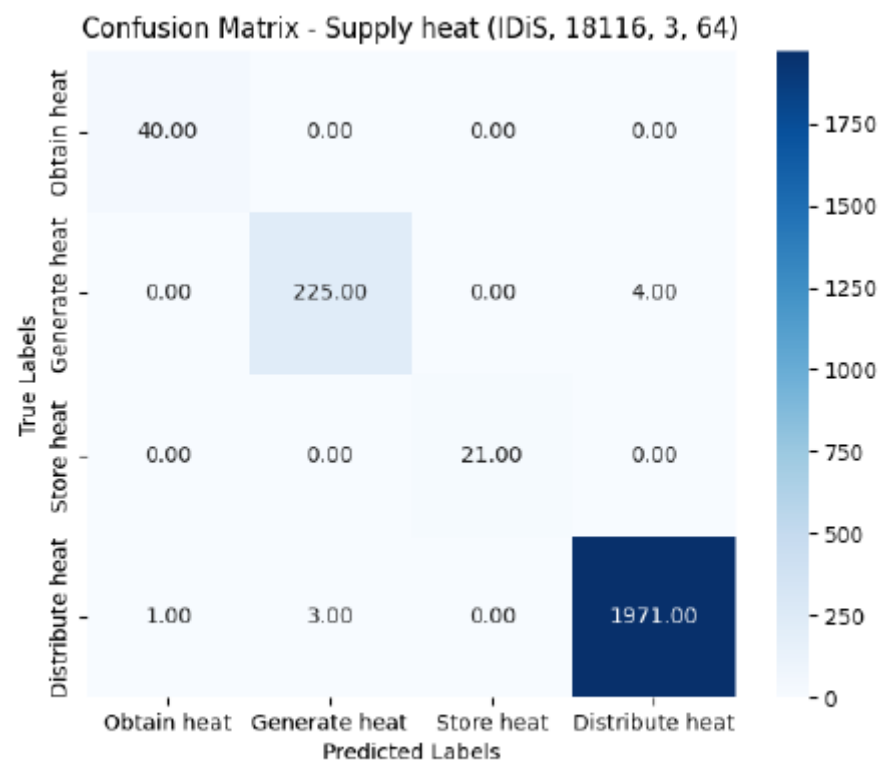
(a) Wahrheitsmatrix Grundfunktion - gBERT



(b) Wahrheitsmatrix Grundfunktion - IDiS

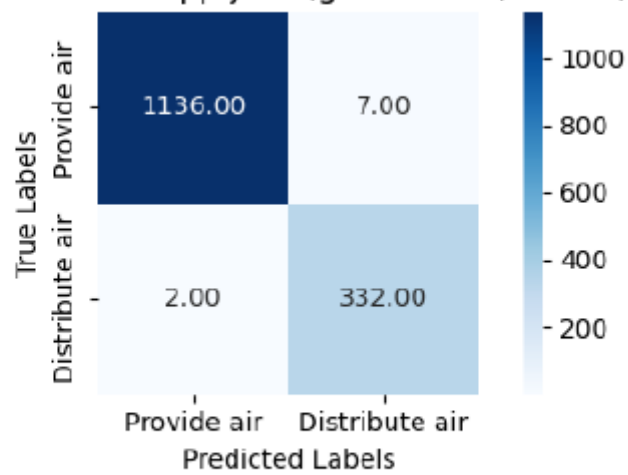


(a) Wahrheitsmatrix Wärme versorgen - gBERT



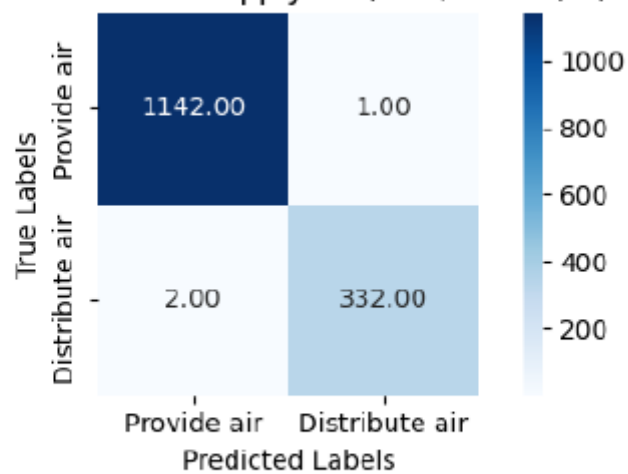
(b) Wahrheitsmatrix Wärme versorgen - IDiS

Confusion Matrix - Supply air (gBERT-Base, 11816, 3, 1)

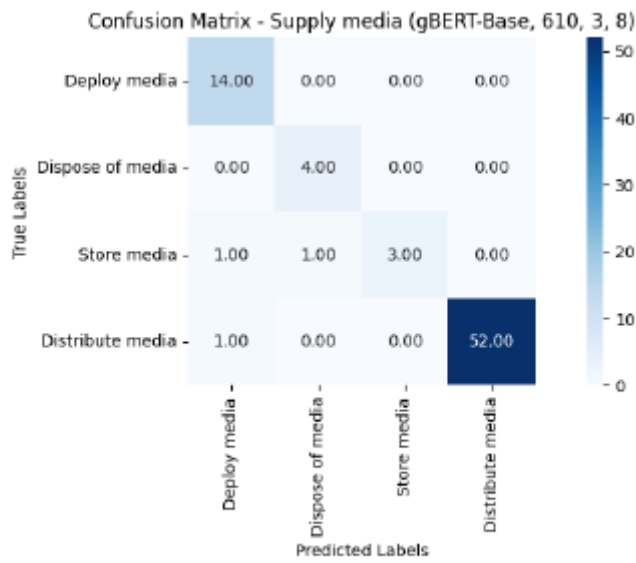


(a) Wahrheitsmatrix Luft versorgen - gBERT

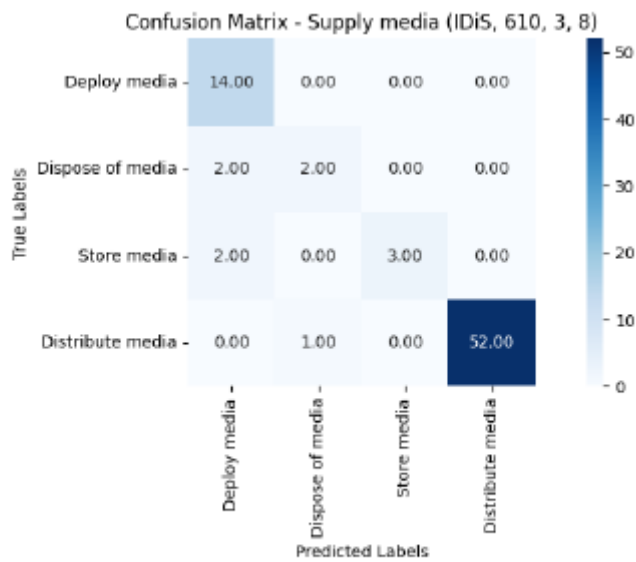
Confusion Matrix - Supply air (IDiS, 11816, 3, 32)



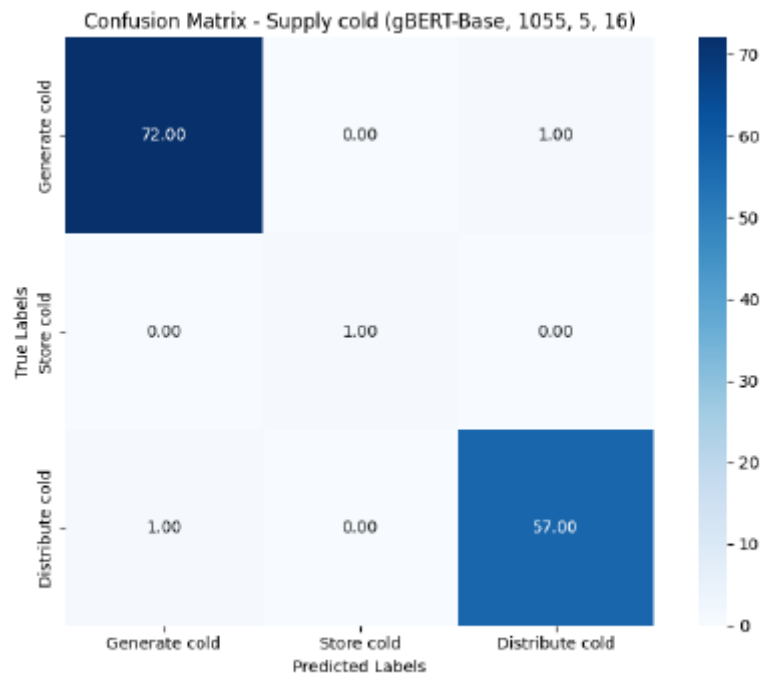
(b) Wahrheitsmatrix Luft versorgen - IDiS



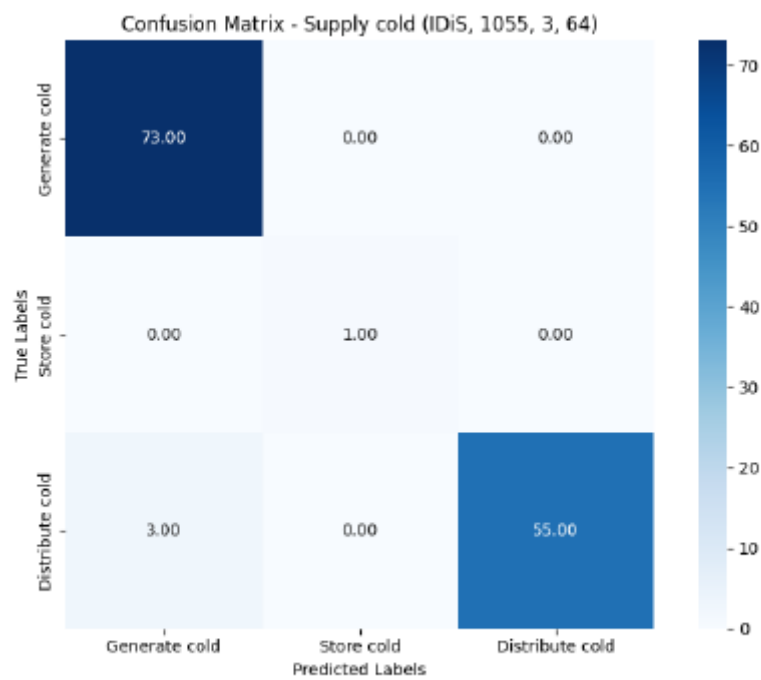
(a) Wahrheitsmatrix Medien versorgen - gBERT



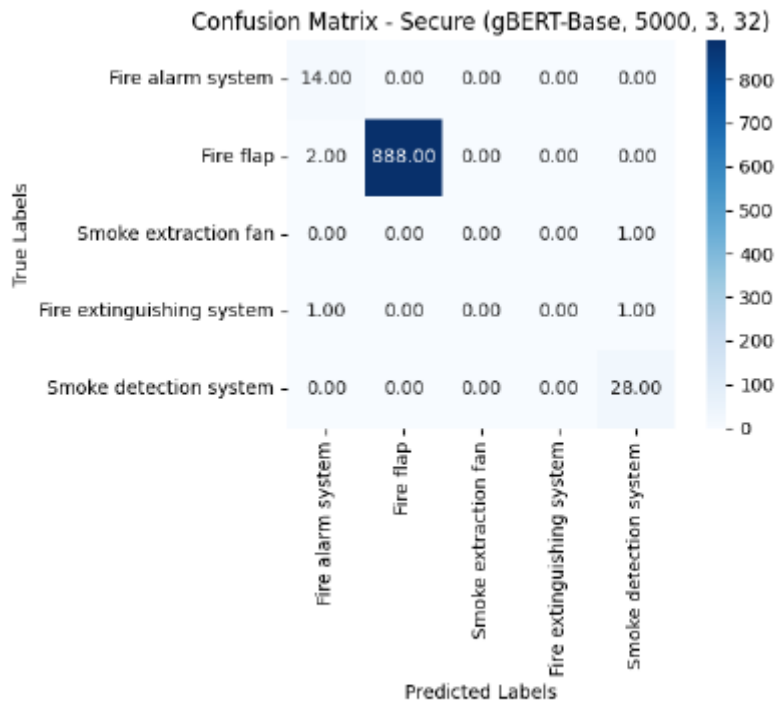
(b) Wahrheitsmatrix Medien versorgen - IDiS



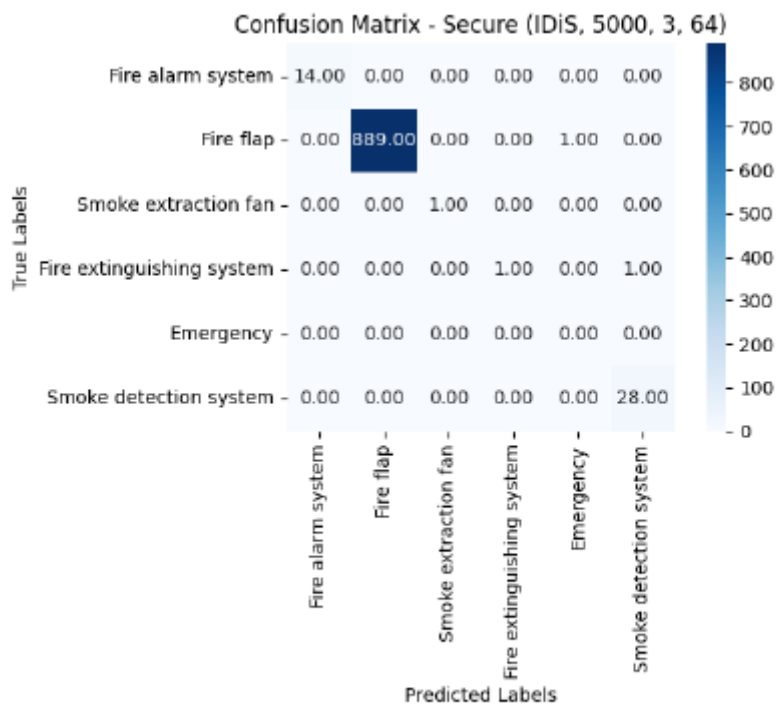
(a) Wahrheitsmatrix Kälte versorgen - gBERT



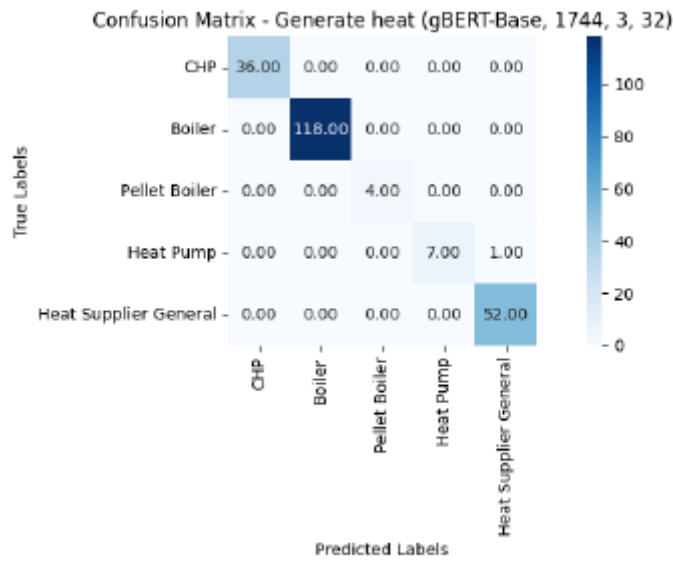
(b) Wahrheitsmatrix Kälte versorgen - IDiS



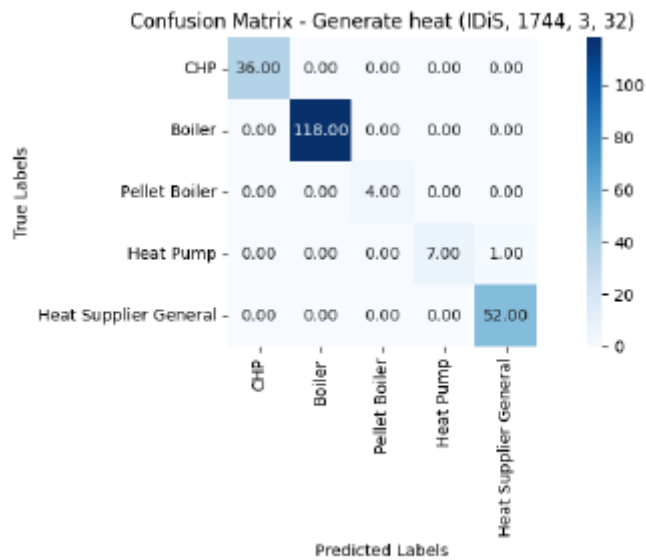
(a) Wahrheitsmatrix Sichern - gBERT



(b) Wahrheitsmatrix Sichern - IDiS



i) Wahrheitsmatrix Wärme erzeugen - gBERT



(b) Wahrheitsmatrix Wärme erzeugen - IDiS

5. Betreiberfragebogen

Betreiberfragebogen

Welche funktionalen Anlagengruppen sind im Gebäude vorhanden?

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Heizungsanlagen | <input type="checkbox"/> Sanitäranlagen |
| <input type="checkbox"/> Lüftungsanlagen | <input type="checkbox"/> Aufzugsanlagen |
| <input type="checkbox"/> Kälteanlagen | |

Welche anlagentechnischen Komponenten sind im Gebäude vorhanden?

- | | |
|---|---|
| <input type="checkbox"/> Wärmepumpe | <input type="checkbox"/> Wasseraufbereitung |
| <input type="checkbox"/> Heizkessel | <input type="checkbox"/> Präsenzmelder |
| <input type="checkbox"/> Blockheizkraftwerk | <input type="checkbox"/> Hebeanlage |
| <input type="checkbox"/> Lüftung mit Befeuchter | <input type="checkbox"/> Rückkühlwerk |
| <input type="checkbox"/> Kühler | <input type="checkbox"/> Kältekompressor |
| <input type="checkbox"/> Volumenstromregler | |