

BA 000



## Bachelorarbeit

# Integration von Protokollinteroperabilität und Datenpunktbezeichnungen in einen Smart Readiness Indicator zur Bewertung der Technologiefähigkeit von Gebäuden

Integration of Protocol Interoperability and Data Point Labelling into a Smart Readiness  
Indicator to Assess the Technology Capability of Buildings

Aachen, Juni 2019

**Maurice Wald**

Matrikelnummer: 343259

Betreuer:

Florian Stinner, M. Sc.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller

Dr.rer.nat. Jan Witt

Diese Arbeit wurde vorgelegt am:

E.ON Energy Research Center | ERC

Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate | EBC

(Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik)

Mathieustraße 10, 52074 Aachen



## Zusammenfassung

In der 2018 novellierten EU-Gebäudeeffizienzrichtlinie wird die Einführung eines „Smart Readiness Indicator“ (SRI) angeregt. Der SRI soll die Fähigkeit von Gebäuden bewerten, mit Nutzer und Netz zu interagieren sowie deren Betrieb energieeffizient zu regeln. Die Kommunikationsprotokolle der zum Erzielen dieser Fähigkeit eingesetzten Technologien und Systeme sowie die für die Gebäudeautomation genutzten Bezeichnungen der Datenpunkte im Gebäude haben Einfluss auf die system- und gebäudeübergreifende Interoperabilität, die Performance, die IT-Sicherheit sowie die Effizienz der Systeme und damit auf die zu bewertende „Smart Readiness“. Aktuelle Ansätze zum SRI berücksichtigen diese Aspekte (noch) nicht. Ziel dieser Arbeit ist die sinnvolle Integration einer Bewertung von eingesetzten Kommunikationsprotokollen und Datenpunktbezeichnungen in die Bewertungsmethodik eines SRI.

Ein Ansatz zum SRI aus der technischen Studie, die von der EU-Kommission beauftragt wurde und ein Ansatz aus der von der HEA beauftragten Grundlagenstudie wurden in dieser Arbeit analysiert und mit einer multikriteriellen gewichteten Entscheidungsanalyse verglichen und bewertet. Die Methodiken der beiden Ansätze wurden dazu aufgearbeitet und in eine wissenschaftlich allgemeingültige Darstellung gebracht. Die relevanten Kommunikationsprotokolle wurden hinsichtlich Interoperabilität, IT-Sicherheit und Eigenstromverbrauch analysiert und mit einer multikriteriellen gewichteten Entscheidungsanalyse bewertet. Relevante Datenpunktbezeichnungssysteme wurden analysiert und mit einer multikriteriellen gewichteten Entscheidungsanalyse bewertet. Kommunikationsprotokolle und Datenpunktbezeichnungen wurden anhand der Ergebnisse in die aufbereitete Bewertungsmethodik des HEA-Ansatzes zum SRI integriert.

Das zentrale Ergebnis der Arbeit ist eine erweiterte Bewertungsmethodik zur Berechnung eines SRI von Gebäuden, welche die verwendeten Kommunikationsprotokolle und verwendete Datenpunktbezeichnungen in die Bewertung einbezieht und somit die Fähigkeit von Gebäuden, mit Nutzer und Netz zu agieren sowie den Betrieb energieeffizient zu regeln sinnvoller bewerten kann. Im Rahmen von zwei Feldtests am Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität Berlin sowie dem Hauptgebäude vom E.ON Energy Research Center der RWTH Aachen konnte zudem die Anwendbarkeit des erweiterten SRI bestätigt werden.

Darüber hinaus konnte weiteres Optimierungspotenzial in den bestehenden Ansätzen zum SRI aufgezeigt werden. Die Ergebnisse dieser Arbeit können hilfreich für die weiteren Schritte in der Entwicklung eines Smart Readiness Indicators sein und zu einer Verbesserung beitragen.

**Schlagwörter:** Smart Readiness Indicator, Kommunikationsprotokolle, Metadatenschemata, Protokollinteroperabilität, Energieeffizienz



## Abstract

The 2018 revision of the European Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) encourages the establishment of a „Smart Readiness Indicator“ (SRI). The SRI is designed to assess the ability of buildings to interact with users and the network and to manage their operation in an energy-efficient manner. The communication protocols of the technologies and systems used to achieve this capability, as well as the building data points used in building automation, have an impact on cross-system and building-wide interoperability, performance, IT security, and the efficiency of the systems and thus on the one to be evaluated „Smart Readiness“. Current approaches to SRI do not (yet) consider these aspects. The aim of this work is the meaningful integration of an evaluation of communication protocols and data point labelling into the evaluation methodology of an SRI.

An approach to the SRI from the technical study commissioned by the EU Commission and an approach from the HEA-commissioned baseline study were analyzed in this work and compared with a multi-criteria weighted decision analysis. The methodologies of the two approaches have been worked up and brought into a scientifically valid presentation. The relevant communication protocols were analyzed with regard to interoperability, IT security and own power consumption and evaluated with a multi-criteria weighted decision analysis. Relevant data point labeling systems were analyzed and evaluated with a multi-criteria weighted decision analysis. Communication protocols and datapoint labelling were integrated into SRI's prepared evaluation methodology of the HEA approach based on the results.

The main result of the thesis is an extended evaluation methodology for the calculation of a SRI of buildings, which includes the used communication protocols and used data point names in the evaluation and thus can evaluate the ability of buildings to interact with user and network and to manage their operation in an energy-efficient manner more meaningfully. In addition, the applicability of the extended SRI was confirmed in the context of two field tests at Effizienzhaus Plus with electromobility in Berlin and the main building of the E.ON Energy Energy Research Center of RWTH Aachen University.

In addition, further optimization potential could be demonstrated in the existing approaches to the SRI. The results of this work can be helpful for the further steps in the development of a Smart Readiness Indicator and contribute to an improvement.

**Tags:** Smart Readiness Indicator, communication protocols, metadata schemata, protocol interoperability, energy efficiency



# Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	VIII
Abbildungsverzeichnis	XII
Tabellenverzeichnis	XIV
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1 Smart Homes und Smart Buildings . . . . .	3
2.1.1 Smart Home . . . . .	3
2.1.2 Smart Building . . . . .	5
2.2 Struktur der Gebäudeautomationssysteme . . . . .	6
2.3 Kommunikationsprotokolle . . . . .	7
2.4 Datenpunktbezeichnungssysteme . . . . .	8
2.5 Smart Readiness Indicator . . . . .	9
2.6 Fazit . . . . .	10
<b>3 Aktuelle Ansätze zur Berechnung eines SRI</b>	<b>13</b>
3.1 EU-Ansatz . . . . .	13
3.1.1 Konzept . . . . .	13
3.1.2 Methodik . . . . .	15
3.1.3 Wirkungskriterien, Funktionsbereiche, Services und Funktionalitätslevel . . .	19
3.1.4 Praktischer Ablauf der Bewertung . . . . .	21
3.1.5 Interoperabilität und Datenpunktbezeichnungen . . . . .	21
3.2 HEA-Ansatz . . . . .	22
3.2.1 Konzept . . . . .	22
3.2.2 Methodik . . . . .	23
3.2.3 Wirkungskriterien, Funktionsgruppen, Applikationen/Optionen und Ausbaustufen . . . . .	28
3.2.4 Interoperabilität und Datenpunktbezeichnungen . . . . .	30
3.3 LEED . . . . .	31
3.4 Weitere Zertifizierungsansätze in der Gebäudetechnik . . . . .	33
3.5 Vergleich und Bewertung der Ansätze . . . . .	33

3.6	Fazit . . . . .	37
<b>4</b>	<b>Integration des Interoperabilitätsaspektes und der Datenpunktbezeichnungen</b>	<b>39</b>
4.1	Kommunikationsprotokolle . . . . .	39
4.1.1	KNX . . . . .	40
4.1.2	BACnet . . . . .	41
4.1.3	LON . . . . .	42
4.1.4	ZigBee . . . . .	43
4.1.5	Z-Wave . . . . .	44
4.1.6	EnOcean . . . . .	45
4.1.7	Homematic IP . . . . .	46
4.1.8	WLAN (IEEE 802.11) . . . . .	47
4.1.9	Bluetooth LE . . . . .	48
4.2	Vergleich und Bewertung der Kommunikationsprotokolle . . . . .	49
4.3	Datenpunktbezeichnungssysteme . . . . .	52
4.3.1	Haystack . . . . .	53
4.3.2	Brick . . . . .	53
4.3.3	Industrial Foundation Classes (IFC) . . . . .	54
4.3.4	Smart Appliances References (SAREF) . . . . .	55
4.3.5	VDI 3814 . . . . .	56
4.3.6	Kennzeichnungssystem des Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen (AMEV) . . . . .	58
4.4	Vergleich und Bewertung der Datenpunktbezeichnungssysteme . . . . .	59
4.5	Integration in Bewertungsmethodik . . . . .	63
4.5.1	Interoperabilität . . . . .	63
4.5.2	Datenpunktbezeichnung . . . . .	64
4.6	Fazit . . . . .	65
<b>5</b>	<b>Feldtests</b>	<b>69</b>
5.1	Feldtest 1: Effizienzhaus Plus Berlin . . . . .	69
5.2	Feldtest 2: E.ON Energy Research Center der RWTH Aachen . . . . .	70
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>73</b>
6.1	Zusammenfassung . . . . .	73
6.2	Ausblick . . . . .	74
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>76</b>
<b>A</b>	<b>Erweiterte Excel-Bewertungstabelle mit den Ergebnissen aus Feldtest 1 (Effizienzhaus Plus)</b>	<b>83</b>

**B Erweiterte Excel-Bewertungstabelle mit den Ergebnissen aus Feldtest 2 (E.ON  
ERC)**

**103**



## Nomenklatur

### Formelzeichen und Einheiten

<b>Symbol</b>	<b>Bedeutung</b>	<b>Einheit</b>
<i>Ext</i>	Punkte für externe Kommunikation	-
<i>G</i>	Grundwert	-
$\vec{Inf}$	Vektor Kommunikationsinfrastruktur	-
<i>Int</i>	Punkte für interne Kommunikation	-
<i>J</i>	Menge Funktionsbereiche/-gruppen	-
<i>K</i>	Menge Services	-
<i>n</i>	Anzahl	-
<i>S</i>	Punktwert	-
<i>Score</i>	Gesamtpunktzahl	-
<i>SRI</i>	Smart Readiness Indicator	-
<i>w</i>	Gewicht	-

### Indizes und Abkürzungen

<b>Symbol</b>	<b>Bedeutung</b>
Abb.	Abbildung
AAL	Active Assisted Living
BACnet	Building Automation and Control Network
BDEW	BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.
BIBBs	BACnet Interoperabilitätsbausteine
BIM	Building Information Modeling
BREEAM	BREEAM-Schema
bzw.	beziehungsweise
CF	Komfort
CV	Convenience

Fortsetzung auf der nächsten Seite

## Indizes und Abkürzungen

<b>Symbol</b>	<b>Bedeutung</b>
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
dt.	deutsch
E	Energie
E/A	Ein-/Ausgabe
EG	Erfüllungsgrad
EHS	European Home System
EIB	European Installation Bus
EU	Europäische Union
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive
ERC	Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik
EV	Elektromobil
e. V.	eingetragener Verein
evtl.	eventuell
G	Flexibilität fürs Stromnetz
GA	Gebäudeautomation
Geb	Gebäude
H	Gesundheit
HEA	HEA - Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendung e. V.
<i>i</i>	Wirkungskriterium
I	Information an den Nutzer
IKT	Informations und Kommunikationstechnik
IP	Internet-Protokoll
<i>j</i>	Funktionsbereich
<i>k</i>	Service/Applikation/Option
<i>l</i>	Funktionalitätslevel
K	Kriterium
KNX	Konnex-Bus
LAN	Local Area Network
LEED	Leadership in Energy Environmental Design
M	Wartung und Problemerkennung
max	Maximum
mW	Milliwatt

Fortsetzung auf der nächsten Seite

## Indizes und Abkürzungen

<b>Symbol</b>	<b>Bedeutung</b>
PKW	Personenkraftwagen
SG	Selbsterzeugung
SRI	Smart Readiness Indicator
Tab.	Tabelle
theor	theoretisch
u.ä.	und ähnlich
USGBC	United Stated Green Building Council
usw.	und so weiter
vgl.	vergleich
WAN	Wide Area Network
WELL	WELL-Building-Standard
W-LAN	Wireless Local Area Network
z.B.	zum Beispiel



## Abbildungsverzeichnis

2.1 Ebenenstruktur Gebäudeautomation [In Anlehnung an Deutsches Institut für Normung e.V. [2016]] . . . . .	7
3.1 Erwartete Vorteile durch den Einsatz intelligent vernetzter Technologien [In Anlehnung an Verbeke et al. [2018]] . . . . .	14
3.2 Vom SRI zu bewertende Schlüsselfunktionen [In Anlehnung an Verbeke et al. [2018]]	14
3.3 Zielgruppen des SRI [In Anlehnung an Verbeke et al. [2018]] . . . . .	15
3.4 Methodik des EU-Ansatzes zum SRI [eigene Darstellung] . . . . .	16
3.5 Funktionalitätslevel des Service „Ladefähigkeit Elektrofahrzeug“ der Funktionsgruppe „Elektrofahrzeug“ [In Anlehnung an Verbeke et al. [2018]] . . . . .	20
3.6 Methodik des HEA-Ansatzes zum SRI [eigene Darstellung] . . . . .	24
3.7 Erweitertes Ebenenmodell nach DIN EN ISO 16484-2 [In Anlehnung an Grinewitschus et al. [2019]] . . . . .	31
3.8 Präferenzmatrix der Kriterien für die Bewertung der SRI-Ansätze . . . . .	35
4.1 Vermaschtes Z-Wave-Netzwerk [In Anlehnung an [Remmers et al., 2015]] . . . . .	45
4.2 Präferenzmatrix der Kriterien für die Bewertung der Kommunikationsprotokolle . .	50
4.3 Aufbau des Brick-Metadaten-Schema und den Beziehungen der Klassen [in Anlehnung an Balaji et al. [2016]] . . . . .	54
4.4 Vergleich der Metadaten-Schemata IFC, SAREF, Haystack und Brick [in Anlehnung an Bhattacharya et al. [2015] und Balaji et al. [2018]] . . . . .	56
4.5 Beispiel eines Kennzeichnungssystems nach VDI 3814 [in Anlehnung an Verein Deutscher Ingenieure e.V. [2017]] . . . . .	57
4.6 Kennzeichnungssystem nach AMEV [in Anlehnung an Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltung [2005]] . . . . .	58
4.7 Präferenzmatrix der Kriterien für die Bewertung der Bezeichnungssysteme bzw. Datenpunktbezeichnungen . . . . .	60
5.1 SRI vom Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität Berlin . . . . .	70
5.2 SRI vom E.ON Energy Research Center der RWTH Aachen . . . . .	71



## Tabellenverzeichnis

2.1	Teilsysteme des Smart Home (Hausautomatisierung) [Strese et al., 2010] . . . . .	4
2.2	Teilsysteme des Smart Home (hausbewohnerbezogene Produkte und Dienste) [Strese et al., 2010] . . . . .	5
3.1	Wirkungskriterien und Default-Gewichte HEA-SRI [Grinewitschus et al., 2019] . . . .	28
3.2	Resultierende Gewichte der Kriterien für die Bewertung der SRI-Ansätze . . . . .	35
3.3	Entscheidungsmatrix zu den SRI-Ansätzen . . . . .	36
4.1	Resultierende Gewichte der Kriterien für die Bewertung der Kommunikationsprotokolle . . . . .	50
4.2	Bewertungsmatrix zu den Kommunikationsprotokollen . . . . .	51
4.3	Resultierende Gewichte der Kriterien für die Bewertung der Bezeichnungssysteme bzw. Datenpunktbezeichnungen . . . . .	60
4.4	Bewertungsmatrix zu den Kommunikationsprotokollen . . . . .	61
4.5	Punkte für die Bewertung der Kommunikationsprotokolle . . . . .	64
4.6	Punkte für die Bewertung der Bezeichnungssysteme bzw. der Datenpunktbezeichnungen . . . . .	65



# 1 Einleitung

Intelligent vernetzte Technologien und Systeme finden neben ihrem Einsatz im gewerblichen Nichtwohngebäudesektor zur betriebswirtschaftlichen Optimierung (als Smart Building bezeichnet, dt. intelligentes Gebäude) immer häufiger Verwendung im privaten Wohnungsbau und -bestand (als Smart Home bezeichnet, dt. Intelligentes Zuhause) [Strese et al., 2010]. Informations- und Kommunikationstechnologien sowie elektronische Systeme ermöglichen die Anpassung des Betriebs der Gebäude an den Bedarf der Nutzer/Bewohner und des Netzes und können zudem zur Verbesserung der Gesamtenergieeffizienz und Performance der Gebäude beitragen [Schneiders et al., 2018][Verbeke et al., 2018]. Zusätzlich kann die Wohn- und Lebensqualität sowie die Sicherheit durch solche Systeme erhöht werden [Strese et al., 2010].

Im Smart-Home-Bereich existiert kein einheitlicher Standard für die eingesetzten intelligent vernetzten Technologien und Systeme. Daraus resultiert eine Marktdominanz überwiegend proprietärer Systeme und Insellösungen [Strese et al., 2010]. Eine Interoperabilität von verschiedenen Smart-Home-Technologien ist nicht gewährleistet. Für ein intelligent vernetztes Gebäude, respektive ein automatisiertes Gebäude, sollen die intelligente Steuerung und Regelung energieoptimiert betrieben werden und Steuerungsfunktionen sollen sich im Gebäude und aus der Ferne umsetzen lassen. Voraussetzung dafür ist eine übergreifende Kommunikation zwischen den Ebenen und Geräten. Der Datenaustausch zwischen den verschiedenen elektronischen Geräten muss gewährleistet sein. Dazu werden Regeln definiert, an die sich alle am Datenaustauschprozess beteiligten Kommunikationsteilnehmer halten müssen [Remmers et al., 2015]. Die Menge an Regeln wird Kommunikationsprotokoll genannt [Remmers et al., 2015]. Es bestehen große Differenzen in der Interoperabilität, der IT-Sicherheit und dem Stromverbrauch verschiedener Kommunikationsprotokolle.

Ein ähnliches Problem existiert auch im Bereich der Smart Buildings. Um intelligente Gebäudeanwendungen in Smart Buildings zu integrieren, ist aufgrund der Komplexität der Vernetzung innerhalb des Gebäudes ein hoher Installationsaufwand nötig [Strese et al., 2010]. Sensorisch erfasste Daten müssen aufwändig aufbereitet werden, um sinnvoll weiterverwendet werden zu können und eine eindeutige Zuordnung des Datenpunktes zu gewährleisten [Balaji et al., 2018]. Standardisierte Datenpunktbezeichnungen - also die einheitliche Benennung der einzelnen Datenpunkte im Gebäude, wie z.B. der von einem Temperatursensor gemessenen Temperatur - tragen dazu bei, eine Interoperabilität zwischen Gebäuden und einzelnen Systemen zu schaffen, eine Integration von Gebäudeautomationstechnologien zu vereinfachen und insbesondere einen energieeffizienten und -optimierenden Betrieb der Technologien zu gewährleisten [Balaji et al., 2018].

Ein Smart Readiness Indicator (SRI, dt. Intelligenzfähigkeitsindikator) kann dazu beitragen, das Bewusstsein für die Vorteile intelligent vernetzter Technologien und Systeme zu stärken und dazu zu motivieren, Investitionen in diese Technologien und Systeme zu tätigen und schließlich Energie einzusparen [Schneiders et al., 2018][Verbeke et al., 2018]. Der SRI kann damit einen Beitrag zum Erreichen der europäischen Klimaziele zur Reduktion der Treibhausgas-Emissionen, der Nutzung erneuerbarer Energien und Steigerung der Energieeffizienz leisten. Eine technisch sinnvolle Bewertung der Intelligenzfähigkeit respektive Smart Readiness von Smart Homes und Smart Buildings kann jedoch nur erfolgen, wenn die Interoperabilität der im Gebäude eingesetzten intelligenten Technologien gewährleistet ist. Der intelligente Einsatz von Technologien und Systemen ist nur dann gegeben, wenn die einzelnen vernetzten Technologien auch fehlerfrei miteinander kommunizieren können und die Performance des Gebäudes auch verbessert wird. Ein „intelligentes“ System, welches durch den für die Kommunikation innerhalb des Netzwerks erforderlichen Stromverbrauch mehr Energie verbraucht, als eingespart wird oder über keine ausreichende IT-Sicherheit verfügt, wird nicht mehr „intelligent“ betrieben. Existierende Ansätze für einen SRI berücksichtigen die genannten Sachverhalte (noch) nicht oder nur bedingt.

In dieser Arbeit wird daher eine kritische Analyse der bestehenden Ansätze zum SRI vorgenommen. Die verschiedenen Ansätze werden verglichen und bewertet. Die Methodiken der Ansätze zum SRI werden zur besseren Vergleichbarkeit in eine wissenschaftlich allgemeingültige Darstellung gebracht. Damit wird zusätzlich eine spätere Integration von Bewertungsaspekten in die Berechnungsmethodik vereinfacht. Eine multikriterielle gewichtete Entscheidungsanalyse wird zum Vergleich und zur Bewertung der Ansätze zum SRI durchgeführt. Relevante Kommunikationsprotokolle werden hinsichtlich der Interoperabilität, dem Eigenstromverbrauch und der IT-Sicherheit verglichen und bewertet. Der Vergleich und die Bewertung der Kommunikationsprotokolle erfolgen mit einer gewichteten multikriteriellen Entscheidungsanalyse. Die daraus resultierenden quantitativen Bewertungsergebnisse werden zur Integration in die Bewertungsmethodik verwendet. Bezeichnungssysteme für Datenpunkte werden verglichen und bewertet. Ein bestehender Ansatz eines SRI wird schließlich dahingehend erweitert, dass verwendete Kommunikationsprotokolle und Bezeichnungssysteme für Datenpunkte sinnvoll in der Bewertung der Intelligenzfähigkeit Gewichtung finden. Der SRI wird hinsichtlich der Bewertungsfaktoren der einzelnen Funktionsgruppen, Applikationen und Optionen, und hinsichtlich der Gewichtungen der verschiedenen Bereiche diskutiert. Abschließend wird der SRI in der Praxis auf zwei Beispielgebäuden getestet und anhand der Ergebnisse diskutiert.

## 2 Grundlagen

In diesem Abschnitt ist der Stand der Technik von Smart Homes und Smart Buildings dargestellt. Der Schwerpunkt liegt auf den Definitionen der Begrifflichkeiten, den eingesetzten Technologien und vorauszusetzenden Funktionalitäten, den Interoperabilitäten zwischen einzelnen Technologien sowie Ansätzen zu Smart Readiness Indikatoren zur Bewertung der Technologiefähigkeit von bestehenden und neuen Smart Homes und Smart Buildings. Zusätzlich wird die Funktion von Kommunikationsprotokollen und Datenpunktbezeichnungen und deren Einfluss auf die Interoperabilität innerhalb der Systeme sowie system- und gebäudeübergreifend erläutert.

### 2.1 Smart Homes und Smart Buildings

Die Begriffe Smart Home und Smart Building sind voneinander abgegrenzt zu betrachten. Das Smart Home bezeichnet meist Wohnhäuser und Wohnungen, die mit vernetzten, intelligenten Technologien ausgestattet sind. Smart Buildings hingegen beschreiben in der Regel Gebäude oder mehrere räumlich getrennte Bauten, die unter betriebswirtschaftlichen Aspekten verwaltet werden und mit Technologien der Gebäudeautomation ausgestattet sind. [Strese et al., 2010]

Die Grenze zwischen den beiden Begriffen wird jedoch durch aktuelle und zukünftige Entwicklungen immer unschärfer. Eine wachsende Anzahl an Schnittstellen zwischen Smart-Home- und Smart-Building-Technologien führt zu einer Annäherung der beiden Branchen zueinander. [ZVEI, 2019]

#### 2.1.1 Smart Home

Die Definitionen des Begriffs „Smart Home“ und den damit verbundenen Funktionalitätszielen hat sich durch die schnelle Weiterentwicklung verschiedenster Technologien in den letzten Jahren häufig gewandelt. Fortschritte im Bereich der Hausautomation (Überwachungs-, Steuer-, Regel-, Optimierungseinrichtungen in Wohnungen/Wohnhäusern) und Entwicklungen von intelligenten Lösungen insbesondere in Heimnetzwerken machen eine einheitliche Definition schwierig. [Mendes et al., 2015]

Das Smart Home kann beschrieben werden als eine Umgebung in Wohnhäusern, Wohnungen oder Räumen mit wohnungsähnlicher Nutzung, die über automatisierte Regelsysteme verfügen und die Fähigkeit besitzen, auf das Nutzerverhalten zu reagieren. Es kann nach De Silva et al. [2012] zwischen verschiedenen Smart-Home-Schwerpunkten unterschieden werden:

- Smart Home mit Schwerpunkt Gesundheitswesen (Active Assisted Living (AAL) u.ä.)
- Unterhaltungs- und multimediabasiertes Smart Home
- Sicherheitsbasiertes Smart Home (Schutz vor Eindringen u.ä.)
- Smart Home mit Schwerpunkt Energieeffizienz

Eine immer schneller wachsende Anzahl an Geräten und Systemen einschließlich darauf aufbauender Dienstleistungen werden im Wohnungsbereich eingesetzt. Neben der Nutzung elektronischer Komponenten für den persönlichen Gebrauch, wie Konsumelektronik (Unterhaltungselektronik, PC- und IKT-Technik), gewinnt insbesondere die Vernetzung, Fernsteuerung und Programmierung von Elektrohaushaltsgeräten (Waschmaschine, Kühlschrank, usw.) immer weiter an Bedeutung, da Bedienkomfort und Energieeffizienz durch intelligente elektronische Regelung erhöht werden können. Elemente der Hausautomation haben großes Potential Energieeinsparungen, Effizienzsteigerungen und erhöhten Wohnkomfort zu erzielen und finden immer häufiger Verwendung im privaten Wohnungssektor. [Strese et al., 2010]

**Tabelle 2.1:** Teilsysteme des Smart Home (Hausautomatisierung) [Strese et al., 2010]

<b>Teilsystem</b>	<b>Technologien und Dienste (Auswahl)</b>
Heizung	Heizungsanlage, Temperaturregelung; integrierte Wetterstation
Lüftung/Klima	Zu- und Abluftregelung, Schadstoffableitung, Ventilation
Sanitär	Trink-, Brauch-, Abwasser; Installation, Armaturen
Elektrik	Installation, Verteilung
Energiemanagement	Lastverteilung und –prognose, evtl. Eigenversorgung durch erneuerbare Energien
Licht	Beleuchtung, Lichtmanagement, Szenarien, Storen, Rollos
Zutritt	Zutrittskontrolle, Klingelanlage, Schlösser, Anwesenheits- und Bewegungserfassung
Überwachung	Technische Alarme (Feuer, Rauch, Gas), Intrusion (Glasbruchmelder, Video), Babyphon, Urlaubswachschutz
Notfall	Sprinkleranlage, unabhängige Stromversorgung, Fluchtwegsystem
Metering	Verbrauchszähler (Strom, Gas, Wasser, Wärme), Energiedienstleistungen wie Fernablesen, genaue tagesaktuelle Abrechnung auch bei stark differenzierten Tarifen
Umfeld	Grünflächen-/Gartenberegnung, -düngung

Neben der Unterscheidung verschiedener Typen von Smart Homes kann somit auch eine Einteilung in diverse Teilsysteme des Smart Home erfolgen. Die Teilsysteme des Smart Home im Bereich

der Hausautomation sind in Tab. 2.1 dargestellt. Die Produkte und Dienste, die sich direkt auf den Hausbewohner beziehen sind in Tab. 2.2 aufgelistet.

**Tabelle 2.2:** Teilsysteme des Smart Home (hausbewohnerbezogene Produkte und Dienste) [Strese et al., 2010]

<b>Teilsystem</b>	<b>Technologien und Dienste (Auswahl)</b>
Kommunikation	Mobil- und Festnetztelefon, Antennenanlage/Kabel/Satellitenempfang, LAN, WAN, Inter-/Intranet
Konsumelektronik	TV, Video, Audio, IKT mit PC, Internet, Teledienste, Kamera
Hausgeräte	Kühlschrank, Waschmaschine, Trockner, Spülmaschine, Staubsauger, Serviceroboter, Hausgerätemonitoring, -diagnostik und -fernbedienung
Gesundheit/Pflege	medizinische Diagnostik und Vorsorge, Vitalparametermessung (z.B. intelligentes WC, vernetzte Waage, Blutdruckmessgerät), Kranken-/Alten-/Behindertenbetreuung, Sturzerkennung, Aktivitätsmonitoring
Heimlogistik	Einkaufs- und Speiseplanung, Lieferservice, häusliche Dienste
Hobby	(elektronische) Spiele, Haustierversorgung, Aquarienmanagement
Mobilität	PKW mit Diagnostik/telemedizinischer Überwachung, Navigationssystem für local based services, Info-/Entertainmentangebote, E-Mobile als Teil des Energiemanagementsystems („rollende Batterie“) im Smart Home

Aufgrund fehlender Standards für Smart Homes dominieren überwiegend herstellergebundene, proprietäre Systeme und Insellösungen. Im Gegensatz zu Smart Buildings, die ohnehin hohe Installationsvolumina aufweisen, lohnen sich im Smart Home aufwändige Vernetzungslösungen häufig nicht. Insbesondere im Gebäudebestand bieten sich aus wirtschaftlichen Gründen Nachrüstlösungen an [Strese et al., 2010].

### 2.1.2 Smart Building

Als Smart Buildings werden meist (kommerziell genutzte) Bauten bezeichnet, die durch Gebäudeautomation (Überwachungs-, Steuer-, Regel-, Optimierungseinrichtungen; vgl. Hausautomation 2.1.1) energetisch und betriebswirtschaftlich optimiert sind [ZVEI, 2019]. Insbesondere smarte Sensoren, smarte Materialien und smarte Messstellen bilden dabei den fortschrittlichsten Stand im Bereich der Entwicklung von High-Performance-Gebäuden [Magyar, 2018].

Eine einheitliche Definition ist durch eine kontinuierliche technologische Weiterentwicklung und Annäherung an die Smart-Home-Branche nur schwer möglich. Im Vordergrund steht bei Smart

Buildings die Integration von vernetzten, intelligenten Systemen, die Betrachtung von Betriebsaspekten und die Regelung, sowie das Einbeziehen von Material und der gesamten Anlagenstruktur mit dem Kernaspekt der Anpassungsfähigkeit um die Zielgrößen Energieverbrauch und Energieeffizienz, Langlebigkeit, Komfort und Netzdienlichkeit zu optimieren [Buckman et al., 2014].

Smart Buildings passen den Betrieb auf die Bedürfnisse des Nutzers und des Netzes unter Verwendung von Informationen, Kommunikationstechnologien und elektronischen Systemen an. [Magyar, 2018]

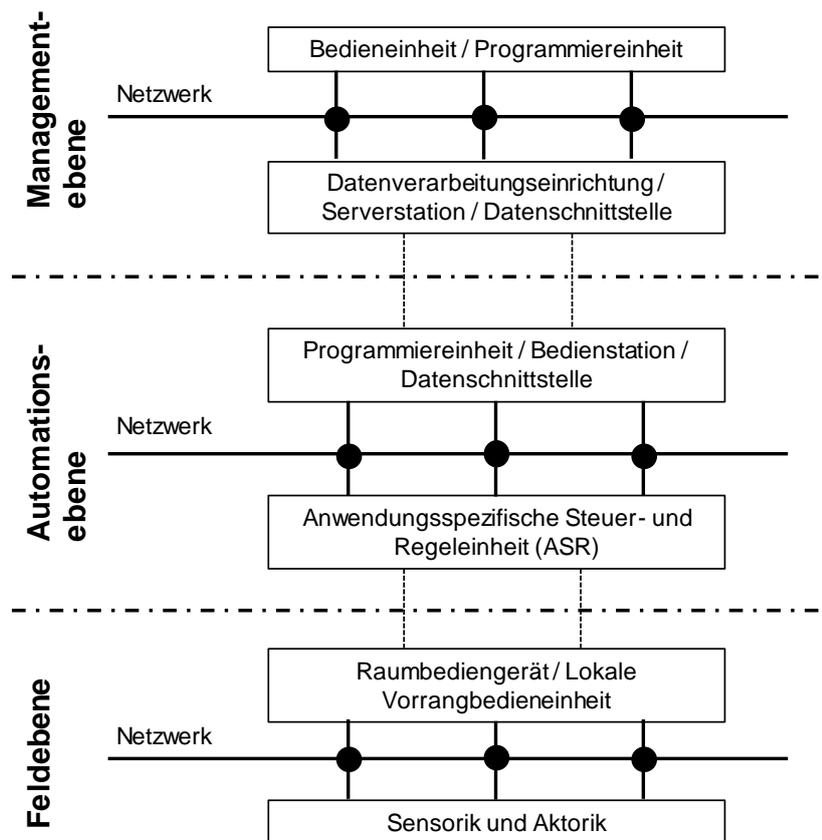
Um intelligente Gebäudeanwendungen in Smart Buildings zu integrieren, ist aufgrund der Komplexität der Vernetzung innerhalb des Gebäudes ein hoher Installationsaufwand nötig [Strese et al., 2010]. Sensorisch erfasste Daten müssen aufwändig aufbereitet werden, um sinnvoll weiterverwendet werden zu können und eine eindeutige Zuordnung des Datenpunktes zu gewährleisten [Balaji et al., 2018]. Standardisierte Datenpunktbezeichnungen - also die standardisierte und eindeutige Benennung der einzelnen Datenpunkte im Gebäude, wie z.B. der von einem Temperatursensor gemessenen Temperatur - tragen dazu bei, eine Interoperabilität zwischen Gebäuden und einzelnen Systemen zu schaffen, eine Integration von Gebäudeautomationstechnologien zu vereinfachen und insbesondere einen energieeffizienten und -optimierenden Betrieb der Technologien zu gewährleisten [Balaji et al., 2018].

### 2.2 Struktur der Gebäudeautomationssysteme

Die Struktur von Gebäudeautomationssystemen (GA-Systemen) wird traditionell nach dem Ebenenmodell aus der DIN EN ISO 16848-2 [Deutsches Institut für Normung e.V., 2016] in drei Ebenen betrachtet. Die Feldebene ermöglicht die Kommunikation zwischen Feldgeräten (Sensoren, Aktoren, usw.) und Automatisierungssystemen. In der Automatisierungsebene werden die Informationen der Feldgeräte ausgelesen, nach den festgelegten Standards aufbereitet und an die Managementebene weitergegeben. Umgekehrt werden die Vorgaben aus der Managementebene in laufende Prozesse eingefügt und die Steuerungsbefehle wieder an die Feldgeräte auf der Feldebene weitergegeben. Die Managementebene stellt die Schnittstelle zum Bediener dar. Informationen werden erfasst und gesammelt, Meldungen an den Bediener weitergegeben und über eine übergeordnete Bedieneinheit kann mithilfe von Planungs- und Steuerungssystemen aktiv in die Regelprozesse eingegriffen werden. [Müller et al., 2018]

Die Ebenenstruktur ist in Abb. 2.1 dargestellt.

Insbesondere in der Gebäudeautomation im Smart-Home-Bereich (Hausautomation), jedoch auch allgemein in GA-Systemen, verschwinden aufgrund des technologischen Fortschritts der eingesetzten Hard- und Software auf den Ebenen die Grenze zwischen den Ebenen allmählich. Durch die dezentralisierte Aufgabenerledigung werden Funktionen, die traditionell auf der Automations-ebene erfolgen, von den Feldgeräten übernommen [Cremer et al., 2005]. So wird bei Betrachtung



**Abbildung 2.1:** Ebenenstruktur Gebäudeautomation [In Anlehnung an Deutsches Institut für Normung e.V. [2016]]

vieler Smart-Home-Technologien nur noch zwischen der Feldebene und der Backboneebene unterschieden [Remmers et al., 2015]. Mit der Backboneebene ist eine Ebene beschrieben, auf der die einzelnen Feldnetzwerke miteinander verbunden werden. [Remmers et al., 2015]

## 2.3 Kommunikationsprotokolle

Für ein intelligent vernetztes Gebäude, respektive ein automatisiertes Gebäude, müssen die intelligente Steuerung und Regelung energieoptimiert betrieben werden und Steuerungsfunktionen im Gebäude und aus der Ferne umsetzen lassen. Voraussetzung dafür ist eine problemlose Kommunikation zwischen den Ebenen und Geräten. Der Datenaustausch zwischen den verschiedenen elektronischen Geräten muss gewährleistet sein. Dazu werden Regeln definiert, an die sich alle am Datenaustauschprozess beteiligten Kommunikationsteilnehmer halten müssen. Die Menge an Regeln wird Kommunikationsprotokoll genannt. [Remmers et al., 2015]

Darin werden u.a. die folgenden Standards festgelegt:

- Welches Übertragungsmedium für den Austausch von Daten genutzt werden kann

- Wie eine Botschaft beginnt und endet
- Wie mit beschädigten oder falschen Botschaften umgegangen wird (Fehlerkorrekturverfahren)
- Wie eine Botschaft formatiert ist
- Wie das Vorgehen der Datenflusskontrolle erfolgt
- Wie und wann eine Verbindung beendet wird [Remmers et al., 2015]

In der Gebäudeautomation im Smart-Home-Bereich wird verstärkt auf Kommunikationsprotokolle gesetzt, die eine Kommunikation innerhalb eines Wireless House Automation Network (WHAN) erlauben [Gomez and Paradells, 2010]. Das hat den Vorteil, dass Sensoren, Aktoren und Regeltechnik ohne großen Aufwand verbunden und installiert werden können [Gomez and Paradells, 2010]. Im Smart-Building-Bereich sowie in größeren Smart-Home-Projekten werden häufig auch kabelgebundene (bzw. zum Teil kabelgebundene) Kommunikationsnetzwerke verwendet [Remmers et al., 2015]. Diese sind zwar häufig mit einem großem Installationsaufwand verbunden, besitzen im Gegensatz zu den verschiedenen proprietären Protokollen im Smart-Home-Bereich den Vorteil, dass durch einheitliche Bezeichnungssysteme der Datenpunkte (z.B. der Messdaten eines Sensors) eine größere Interoperabilität und problemlose Kommunikation auch gebäudeextern ermöglicht wird [Strese et al., 2010].

### 2.4 Datenpunktbezeichnungssysteme

Bei der Installation eines Netzwerks zur Gebäudeautomation hat neben der Wahl des Protokolls ein weiterer Aspekt großen Einfluss auf die gebäudeübergreifende Interoperabilität von smarten Anwendungen. Insbesondere bei großen Automationssystemen in gewerblich genutzten Gebäuden (mit bspw. BACnet, BLE Sensoren, WSN etc.) haben die Bezeichnungen der Datenpunkte im Netzwerk großen Einfluss auf die Performance und Interoperabilität des Systems [Balaji et al., 2018]. Ein Datenpunkt in einem Gebäude kann z.B. die gemessene Temperatur eines Sensors sein. Da in einem Smart-Building häufig sehr viele Sensoren zum Einsatz kommen, ist eine eindeutige Bezeichnung der Datenpunkte wichtig. Eine solche Datenpunktbezeichnung kann z.B. folgende Bestandteile enthalten (Metadaten) [Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2017]:

- ortsbezogene Kennzeichnung/Zuordnung:
  - Liegenschaft
  - Gebäude/Gebäudeteil
  - Geschoss/Ebene/Bereich/Raum/Achse
- funktionsbezogene Kennzeichnung/Zuordnung:

- Informationsschwerpunkt
- Gewerk/Kostengruppe
- Anlage
- Betriebsmittel/Aggregat/Anlagenteil/Komponente/Gerät
- Funktion

Ein standardisiertes Bezeichnungssystem trägt dazu bei, die Performance zu erhöhen, den Aufwand für die Fehlererkennung und Erweiterung von Systemen zu vereinfachen und die Interoperabilität von Anwendungen gebäudeübergreifend zu steigern.

### 2.5 Smart Readiness Indicator

Der Gebäudebestand in der EU verursacht rund 36 % aller CO<sub>2</sub>-Emissionen innerhalb der Union [Europäisches Parlament und Rat, 2018]. Mithilfe von Smart-Home-Systemen lässt sich unabhängig von der Größe des Hauses und dem Alter der Heizungsanlage der Energiebedarf um bis zu 30 Prozent reduzieren [Schneiders et al., 2018]. Der Einsatz von Smart-Home-Technologien kann damit einen großen Beitrag zur Erreichung von EU-Klimazielen leisten.

Die Novellierung der EU-Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Energy Performance of Buildings Directive, EPBD), veröffentlicht am 19. Juni 2018 und in Kraft getreten am 9. Juli 2018, muss von Mitgliedsstaaten innerhalb von 20 Monaten in nationales Recht umgesetzt werden. Die Richtlinie beinhaltet unter anderem die Forderung der Einführung eines sogenannten „Smart Readiness Indicator“ (SRI, dt. Intelligenzfähigkeitsindikator). Der Smart Readiness Indicator soll die Fähigkeit von Gebäuden bewerten, Informations- und Kommunikationstechnologien sowie elektronische Systeme zur Anpassung des Betriebs der Gebäude an den Bedarf der Bewohner und des Netzes sowie zur Verbesserung der Gesamtenergieeffizienz und –leistung der Gebäude zu nutzen. [Europäisches Parlament und Rat, 2018]

Nach Meinung des Europäischen Parlament und Rat [2018] gehören die folgenden Fähigkeiten zu den zu bewertenden Schlüsselfunktionen im Smart Home und Smart Building:

- Die Fähigkeit, die Energieperformance und den Betrieb des Gebäudes durch Anpassen des Energieverbrauchs zu regeln, beispielsweise durch die Verwendung von Energie aus erneuerbaren Quellen
- Die Fähigkeit, den Betrieb an die Bedürfnisse der Gebäudenutzer anzupassen mit Fokus auf Benutzerfreundlichkeit, gesunden Raumklimabedingungen und der Berichterstattung des Energieverbrauchs an den Nutzer

- Die Flexibilität der gebäudeseitigen Stromnachfrage einschließlich der Fähigkeit, die Teilnahme an aktiven und passiven sowie impliziten und expliziten Bedarfsanforderungen zu ermöglichen, beispielsweise durch Lastverschiebungskapazitäten

Ein solcher SRI kann dazu beitragen, das Bewusstsein für die Vorteile intelligent vernetzter Technologien in Gebäuden zu stärken, dazu zu motivieren, Investitionen in diese zu tätigen und die Integration von technologischen Innovationen im Gebäudebereich zu unterstützen. Durch die vom SRI zu schaffende politische Überschneidung von den Bereichen Energie, Gebäude und Informations- und Kommunikationstechnologie kann der SRI darüber hinaus zur Integration des Gebäudesektors in zukünftige Energiesysteme und -märkte beitragen. [Verbeke et al., 2018]

Mit dem im August 2018 von der Generaldirektion Energie der EU-Kommission veröffentlichten Bericht „Support for Setting up a Smart Readiness Indicator for Buildings and Related Impact Assessment“ [Verbeke et al., 2018] wird im Rahmen einer technischen Studie ein erster Ansatz eines SRI vorgestellt. Eine von der HEA - Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendung e.V. (HEA) und BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) im Februar 2019 herausgegebene Grundlagenstudie zum Smart Readiness Indicator stellt einen die Erkenntnisse des EU-SRI berücksichtigenden Ansatz einer Interpretation des SRI vor, der den Grad der Technologiefähigkeit von Wohngebäuden ausweist [Grinewitschus et al., 2019].

Bestehende außereuropäische und internationale Zertifizierungssysteme für Gebäude berücksichtigen zum Teil ebenfalls den Einsatz von intelligent vernetzten Technologien. Zu nennen sind hier das Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) des U.S. Green Building Council, das internationale BREEAM Schema (BREEAM) sowie der WELL Building Standard aus den USA (WELL). [Magyar, 2018]

### 2.6 Fazit

Intelligent vernetzte Technologien und Systeme finden neben ihrem Einsatz in Smart Buildings immer häufiger auch Verwendung im Smart-Home-Bereich. Intelligent vernetzte Informations- und Kommunikationstechnologien sowie elektronische Systeme ermöglichen die Anpassung des Betriebs der Gebäude an den Bedarf der Bewohner und des Netzes und können zur Verbesserung der Gesamtenergieeffizienz und Performance der Gebäude beitragen.

Im Smart-Home-Bereich existiert kein einheitlicher Standard für die eingesetzten Automationsysteme und intelligent vernetzten Technologien. Daraus resultiert eine Marktdominanz überwiegend proprietärer Systeme und Insellösungen. Eine Interoperabilität von verschiedenen Smart-Home-Technologien ist nicht gewährleistet.

Ein ähnliches Problem existiert auch im Bereich der Smart Buildings. Um intelligente Gebäudeanwendungen in Smart Buildings zu integrieren ist aufgrund der Komplexität der Vernetzung in-

nerhalb des Gebäudes ein hoher Installationsaufwand nötig. Standardisierte Datenpunktbezeichnungen tragen dazu bei, eine Interoperabilität zwischen Gebäuden und einzelnen Systemen zu schaffen, eine Integration von Gebäudeautomationstechnologien zu vereinfachen und insbesondere einen energieeffizienten und –optimierenden Betrieb der Technologien zu gewährleisten.

Ein Smart Readiness Indicator kann dazu beitragen, dass intelligente Technologien vermehrt im Gebäudebereich eingesetzt werden und Energie eingespart wird. Der SRI kann damit einen Beitrag zum Erreichen der Klimaziele leisten. Eine technisch sinnvolle Bewertung der Intelligenzfähigkeit von Smart Homes und Smart Buildings ist jedoch nur gegeben, wenn die Interoperabilität der im Gebäude eingesetzten intelligent vernetzten Technologien gewährleistet ist. Intelligenzfähigkeit ist nur dann gegeben, wenn die einzelnen intelligent vernetzten Technologien auch fehlerfrei miteinander kommunizieren können. Existierende Ansätze für einen SRI berücksichtigen den genannten Sachverhalt (noch) nicht oder nur bedingt.



### **3 Aktuelle Ansätze zur Berechnung eines SRI**

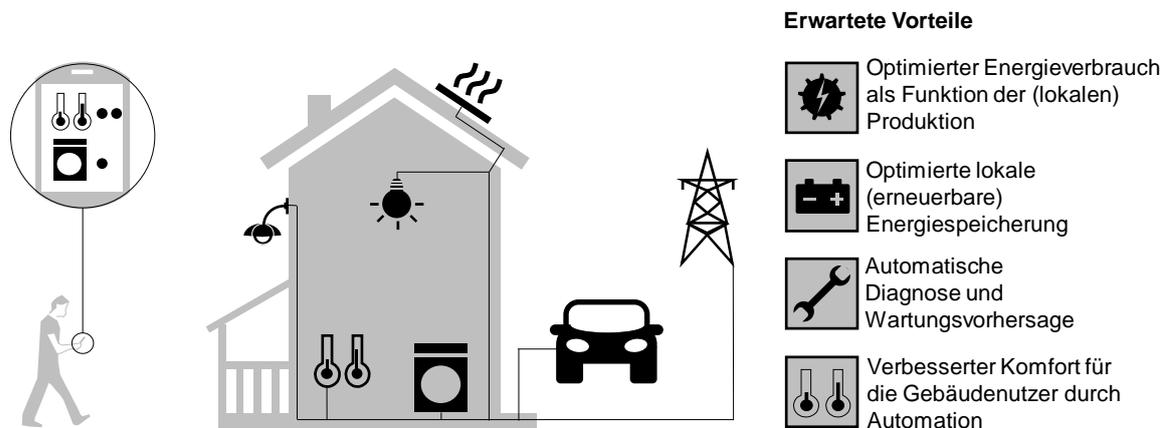
In diesem Kapitel werden aktuelle Ansätze zur Berechnung eines Smart Readiness Indicators dargestellt, verglichen und bewertet. Neben dem Ansatz der Generaldirektion für Energie der EU-Kommission wird ein von HEA und BDEW entwickelter Ansatz für die Berechnung eines SRI betrachtet. Darüber hinaus werden weitere international bestehende Ansätze für die Bewertung von Gebäudetechnik untersucht. Dazu gehört das Leadership in Energy and Environmental Design des U.S. Green Building Council, das internationale BREEAM Schema sowie der WELL Building Standard aus den USA. Die Methodik der Ansätze zum SRI werden zur besseren Vergleichbarkeit in eine wissenschaftlich allgemeingültige Darstellung gebracht. Damit wird zusätzlich eine spätere Integration von Bewertungsaspekten in die Berechnungsmethodik vereinfacht. Eine multikriterielle gewichtete Entscheidungsanalyse wird zum Vergleich und zur Bewertung der Ansätze zum SRI durchgeführt.

#### **3.1 EU-Ansatz**

Der im August 2018 von der Generaldirektion Energie der EU-Kommission veröffentlichten Bericht „Support for Setting Up a Smart Readiness Indicator for Buildings and Related Impact Assessment“ stellt im Rahmen einer technischen Studie einen ersten Ansatz eines SRI vor. Die Studie zielt darauf ab, einen methodologischen Rahmen für den SRI bereitzustellen und technische Unterstützung bei der Umsetzung des Indikators zu bieten [Verbeke et al., 2018].

##### **3.1.1 Konzept**

Der angestrebte SRI soll im Kern bei der Verwirklichung des bestehenden Potenzials von intelligent vernetzten Technologien helfen (wie in der EU-Gebäuderichtlinie (EPBD) gefordert) [Verbeke et al., 2018][Europäisches Parlament und Rat, 2018]. Die erwarteten Vorteile, die sich durch den Einsatz intelligenter Technologien einstellen, sind in Abb. 3.1 dargestellt.



**Abbildung 3.1:** Erwartete Vorteile durch den Einsatz intelligenter vernetzter Technologien [In Anlehnung an Verbeke et al. [2018]]

Durch intelligente Regelsysteme soll der Energieverbrauch optimiert werden, so dass eine Steuerung abhängig von der lokalen Produktion, sowie den Bedürfnissen des Netzes erfolgen kann. Die (eigenproduzierte) Energie soll durch einen optimiert geregelten Speicher effizienter eingesetzt werden [Moseley, 2017]. Durch automatisierte Diagnoseprozesse sollen Fehlfunktionen schnell erkannt werden. Zusätzlich sollen Automationstechnologien den Komfort der Gebäudenutzer erhöhen [Nesen Sürmeli-Anac and Andreas H. Hermelink, 2018].

Aufbauend auf den in der EPBD-Novellierung genannten Schlüsselfunktionen (vgl. 2.5) soll der SRI die Bereitschaft eines Gebäudes zu den in Abb. 3.2 dargestellten Funktionalitäten beurteilen.



**Abbildung 3.2:** Vom SRI zu bewertende Schlüsselfunktionen [In Anlehnung an Verbeke et al. [2018]]

Der SRI soll in seiner Gesamtheit Nutzern, Besitzern und Investoren von bestehenden sowie neuen Gebäuden Informationen zu den gebäudespezifischen Dienstleistungen bereitstellen [Nesen Sürmeli-Anac and Andreas H. Hermelink, 2018]. Plausible Informationen zu realisierten und potenziell realisierbaren Technologien und den erzielten, respektive zu erzielenden Vorteilen, sollen die Investmententscheidungen der genannten Zielgruppe positiv beeinflussen. Die zweite wichtige Zielgruppe des SRI soll das Facility Management sein. Im Smart-Building-Bereich werden Facility Manager einen großen Anteil der intelligenten Technologien bedienen oder an deren Betrieb beteiligt sein und damit wahrscheinlich in Investmententscheidungen miteinbezogen wer-

den. Anbieter intelligenter vernetzter Technologien und Dienstleistungen bilden die dritte große Zielgruppe des SRI. Netzbetreiber, Hersteller von Gebäude- und Hausautomationstechnik und Ingenieurunternehmen können durch den SRI ihr Service-Angebot erweitern. [Verbeke et al., 2018]

Die Zielgruppen des SRI sind in Abb. 3.3 dargestellt.



**Abbildung 3.3:** Zielgruppen des SRI [In Anlehnung an Verbeke et al. [2018]]

### 3.1.2 Methodik

Dem EU-Ansatz eines SRI liegt eine Multi Criteria Assessment Methode zugrunde. D.h. es werden verschiedene Services aus dem Smart-Ready-Bereich in bestimmte Funktionsbereiche eingeteilt (z.B. Heizung, Licht, Elektromobilität, etc.). Die einzelnen Services haben darüber hinaus Einfluss auf verschiedene Wirkungskriterien (z.B. Energieeinsparung, Komfortsteigerung, Netzdienlichkeit, etc.). Mithilfe von Gewichtungsfaktoren können sowohl die Funktionsbereiche, als auch der Einfluss auf die Wirkungskriterien individuell gewichtet werden. Damit ist es möglich, neben dem Gesamt-SRI sowohl Teilbewertungen in den einzelnen Funktionsbereichen, als auch Teilbewertungen bezogen auf die Wirkungskriterien zu generieren. Die Teilbewertungen und der SRI werden durch gewichtetes Aufsummieren der vergebenen Punkte in den (für Funktionsbereich oder Wirkungskriterien) relevanten Services und anschließendes Normalisieren bezüglich der gebäudespezifischen maximalen Punktzahl errechnet. [Verbeke et al., 2018]

Der methodologische Rahmen ist in Abb. 3.4 in einem Top-Down-Ansatz dargestellt. Zur korrekten wissenschaftlichen Abbildung der Methodik werden im Folgenden Formeln bestimmt, die eine vollständige Darstellung der Zusammenhänge ermöglichen. In der Quelle fehlt ein solcher Ansatz.

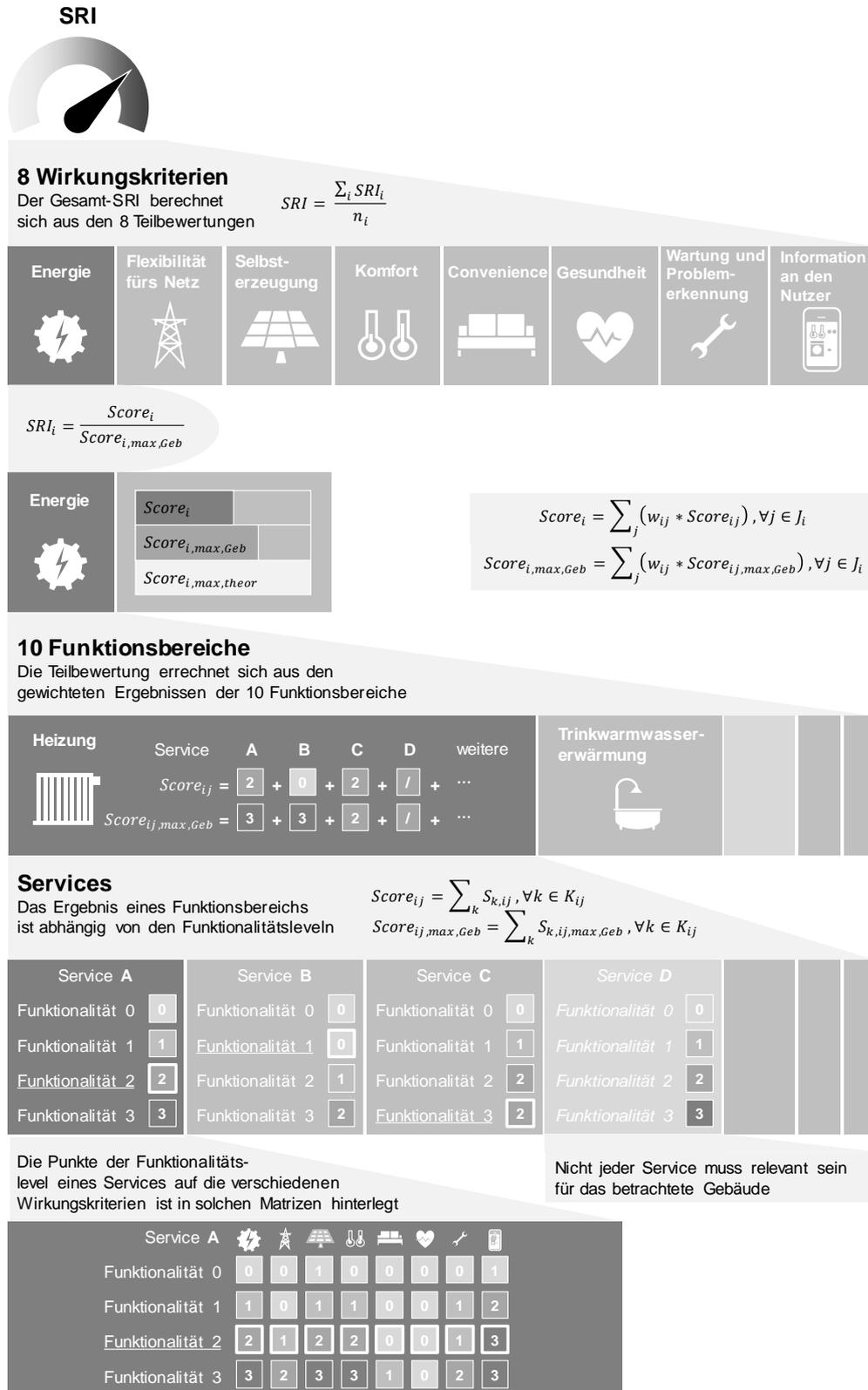


Abbildung 3.4: Methodik des EU-Ansatzes zum SRI [eigene Darstellung]

Der Gesamt-SRI ergibt sich aus den Teilbewertungen der Wirkungskriterien (ungewichtet).

$$SRI = \frac{\sum_i SRI_i}{n_i} \quad (3.1)$$

$SRI$ :	Gesamt-SRI
$SRI_i$ :	Teilbewertung des Wirkungskriteriums $i$
$n_i$ :	Anzahl Wirkungskriterien
$i$ :	Wirkungskriterium

Die einzelnen Teilbewertungen errechnen sich aus den gewichtet aufsummierten und normalisierten Punkten der für das jeweilige Wirkungskriterium relevanten Services aus den Funktionsbereichen. Die Teilbewertung  $SRI_i$  der verschiedenen Wirkungskriterien  $i$  ergibt sich aus:

$$SRI_i = \frac{Score_i}{Score_{i,max,Geb}} \quad (3.2)$$

$Score_i$ :	Erreichte Gesamtpunktzahl für das Wirkungskriterium $i$
$Score_{i,max,Geb}$ :	In dem Gebäude maximal zu erreichende Gesamtpunktzahl für das Wirkungskriterium $i$

Die im Gebäude maximal zu erreichende Gesamtpunktzahl für ein bestimmtes Wirkungskriterium  $i$  ( $Score_{i,max,Geb}$ ) ist zu unterscheiden von der theoretisch möglichen maximalen Gesamtpunktzahl für ein bestimmtes Wirkungskriterium ( $Score_{i,max,theor}$ ), welche sich durch einfaches Aufsummieren aller für das Auswahlkriterium relevanten Punkte ergibt. Damit wird die Bewertung verschiedener Gebäudetypen ermöglicht. Die erreichte Gesamtpunktzahl und im Gebäude maximal mögliche Punktzahl für ein Wirkungskriterium  $i$  ergibt sich wiederum aus den gewichtet aufsummierten Teilbewertungen der Funktionsbereiche ( $j$ ) hinsichtlich des jeweiligen Wirkungskriteriums  $i$ , wobei nicht jeder Funktionsbereich Einfluss auf jedes Wirkungskriterium haben muss.

$$Score_i = \sum_j (w_{ij} * Score_{ij}, \forall j \in J_i) \quad (3.3)$$

$$Score_{i,max,Geb} = \sum_j (w_{ij} * Score_{ij,max,Geb}, \forall j \in J_i) \quad (3.4)$$

$w_{ij}$ :	Gewichtung des Funktionsbereichs $j$ auf das Wirkungskriterium $i$
$Score_{ij}$ :	Teilbewertung des Funktionsbereichs $j$ hinsichtlich des Wirkungskriteriums $i$
$Score_{ij,max,Geb}$ :	In dem Gebäude maximal möglich Punktzahl des Funktionsbereichs $j$ hinsichtlich des Wirkungskriteriums $i$

$j$ : Funktionsbereich  
 $J_i$ : Für Wirkungskriterium  $i$  relevante Funktionsbereiche

Die Teilbewertung und die im Gebäude maximal mögliche Punktzahl eines Funktionsbereichs  $j$  hinsichtlich eines Wirkungskriteriums  $i$  errechnet sich aus den Punkten der vorhandenen Funktionalitätslevel aller relevanten Services aus dem jeweiligen Funktionsbereich hinsichtlich des jeweiligen Wirkungskriteriums. Nicht jeder Service muss relevant sein für das betrachtete Gebäude. Daraus resultiert auch die vorher genannte Differenz zwischen  $Score_{i,max,Geb}$  und  $Score_{i,max,theor}$ .

$$Score_{ij} = \sum_k S_{k,ij}, \forall k \in K_{ij} \quad (3.5)$$

$$Score_{ij,max,Geb} = \sum_k S_{k,ij,max,Geb}, \forall k \in K_{ij} \quad (3.6)$$

$S_{k,ij}$ : Punktwert des vorliegenden Funktionalitätslevels des Service  $k$  aus dem Funktionsbereich  $j$  hinsichtlich des Wirkungskriteriums  $i$   
 $S_{k,ij,max,Geb}$ : Punktwert des maximalen Funktionalitätslevels des Service  $k$  aus dem Funktionsbereich  $j$  hinsichtlich des Wirkungskriteriums  $i$   
 $k$ : Service des jeweiligen Funktionsbereichs  
 $K_{ij}$ : Für Wirkungsbereich  $i$  relevante Services aus dem Funktionsbereich  $j$

Grundlage für die gesamte Berechnung bilden damit die Punktematrizen aller Services aus allen Funktionsbereichen. Die Zeilen geben die verschiedenen Funktionalitätslevel (0 bis  $l$ ) an, die Spalten das jeweilige Wirkungskriterium (Energie ( $E$ ), Flexibilität fürs Stromnetz ( $G$ ), Selbsterzeugung ( $SG$ ), Komfort ( $CF$ ), Convenience ( $CV$ ), Gesundheit ( $H$ ), Wartung und Problemerkennung ( $M$ ), Information an den Nutzer ( $I$ )).

$$M_{k,j} = \begin{bmatrix} S_{k,E,j,0} & S_{k,G,j,0} & S_{k,SG,j,0} & S_{k,CF,j,0} & S_{k,CV,j,0} & S_{k,H,j,0} & S_{k,M,j,0} & S_{k,I,j,0} \\ S_{k,E,j,1} & S_{k,G,j,1} & S_{k,SG,j,1} & S_{k,CF,j,1} & S_{k,CV,j,1} & S_{k,H,j,1} & S_{k,M,j,1} & S_{k,I,j,1} \\ \vdots & \vdots \\ S_{k,E,j,l} & S_{k,G,j,l} & S_{k,SG,j,l} & S_{k,CF,j,l} & S_{k,CV,j,l} & S_{k,H,j,l} & S_{k,M,j,l} & S_{k,I,j,l} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Die resultierende Anzahl an festzulegenden Werten liegt damit im mehrfachen tausender Bereich. Zu aktuellem Stand sind nicht alle Werte quantifiziert [Verbeke et al., 2018]. Die Quantifizierung der vorläufigen Werte erfolgt anhand von Einschätzungen von Experten, sowie, soweit möglich, anhand von vorhandenen Standards [Nesen Sürmeli-Anac and Andreas H. Hermelink, 2018].

Ein weiterer Kritikpunkt an der Methodik ist, dass nur eine auf dem Servicekatalog basierte Bewertung nach realisiert/nicht realisiert erfolgt. Weder die Performance der Gebäude mit den smarten

Technologien, noch die Vorbereitung von Technologien zur Performancesteigerung werden in die Bewertung einbezogen. [Kurnitski and Hogeling, 2018][Grinewitschus et al., 2019]

### 3.1.3 Wirkungskriterien, Funktionsbereiche, Services und Funktionalitätslevel

Die Services können verschieden starken Einfluss auf verschiedene Wirkungskriterien haben. Der EU-Ansatz zum SRI schlägt acht verschiedene Wirkungskriterien vor:

- **Energie:** Das Kriterium verweist auf Services, die gebäudeseitige Energieeinsparungen ermöglichen.
- **Flexibilität fürs Stromnetz und Speicherung:** Das Kriterium verweist auf Services, die einen netzdienlichen Betrieb ermöglichen.
- **Selbsterzeugung:** Das Kriterium verweist auf Services, die die Menge und den Eigenverbrauch von selbsterzeugter Erneuerbarer Energie optimiert.
- **Komfort:** Das Kriterium verweist auf Services, die den Komfort der Gebäudenutzer verbessern.
- **Convenience:** Das Kriterium verweist auf Services, die den Betrieb innerhalb des Gebäudes für die Gebäudenutzer vereinfacht.
- **Gesundheit:** Das Kriterium verweist auf Services für das Wohlbefinden und die Gesundheit der Gebäudenutzer (z.B. Luftqualität).
- **Wartung und Problemerkennung:** Das Kriterium verweist auf Services, die eine automatisierte Fehlererkennung- und Diagnose der technischen Gebäudeausrüstung ermöglichen.
- **Information an den Nutzer:** Das Kriterium verweist auf Services, die dem Gebäudenutzer Informationen zum Betrieb der technischen Gebäudeausrüstung liefern. [Verbeke et al., 2018]

Insgesamt werden von der Studie 112 Services vorgestellt. Als Alternative werden die aus Sicht der Verfasser 52 einflussreichsten Services hinsichtlich der genannten Wirkungskriterien genannt, die eine vereinfachte Bewertung ermöglichen. Jedoch ist nicht jeder Service auch in jedem Gebäude sinnvoll umsetzbar, wodurch sich in der Anwendung meist eine geringere Anzahl an Services einstellt. Im Rahmen der Studie durchgeführte Feldtests ergaben für ein Einfamilienhaus 23 relevante Services und für ein Bürogebäude 44 [Verbeke et al., 2018].

Die Services werden zehn verschiedenen Funktionsgruppen zugeordnet. Die Funktionsgruppen sind:

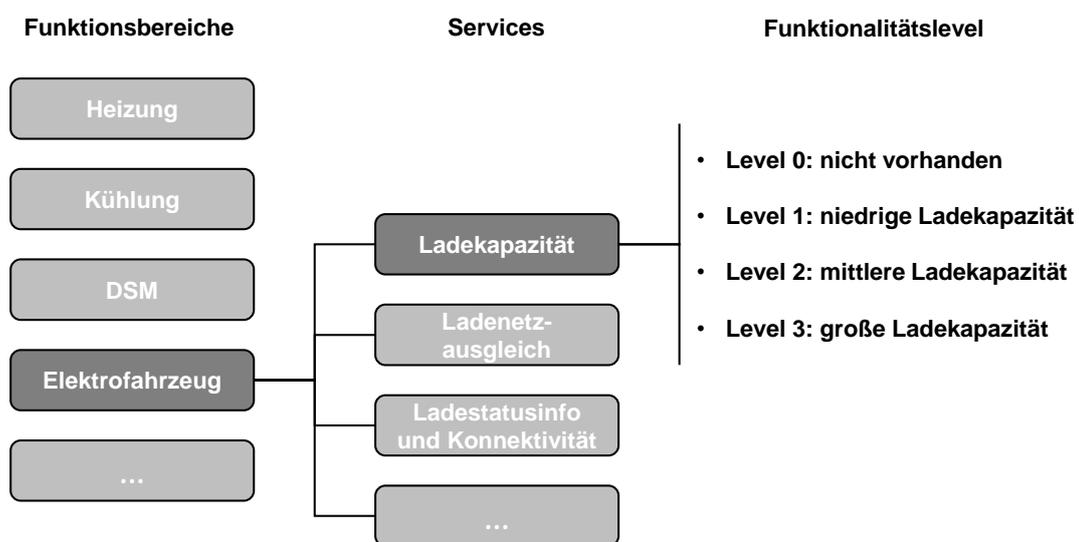
- Heizung
- Kühlung

- Trinkwarmwasserbereitung
- Belüftung
- Beleuchtung
- Dynamische Gebäudehülle
- Gebäudeseitige Erzeugung erneuerbarer Energie
- Demand Side Management
- Elektromobilität
- Monitoring und Regelung. [Verbeke et al., 2018]

Damit werden alle Bereiche aus der DIN 18599-11 Gebäudeautomation abgedeckt und darüber hinaus um weitere Services aus dem Smart-Home- und Smart-Building-Bereich erweitert [Deutsches Institut für Normung e.V., 2018] (vgl. 2.1.1).

Jeder Service besitzt verschiedene Funktionalitätslevel. Ein höheres Funktionalitätslevel bedeutet eine smartere Implementierung bzw. einen erweiterten Ausbau des Service. Abhängig von dem jeweiligen Service ergeben sich dabei zwei bis fünf verschiedene Funktionalitätslevel, wobei die Höhe des Funktionalitätslevels nicht dem quantifizierten Wert aus der zugehörigen Punktematrix entsprechen muss (vgl. 3.5). [Verbeke et al., 2018]

Ein Beispiel für die Funktionalitätslevel des Services „Ladepkapazität Elektrofahrzeug“ der Funktionsgruppe „Elektrofahrzeug“ ist in Abb.3.5 gegeben.



**Abbildung 3.5:** Funktionalitätslevel des Service „Ladepkapazität Elektrofahrzeug“ der Funktionsgruppe „Elektrofahrzeug“ [In Anlehnung an Verbeke et al. [2018]]

### 3.1.4 Praktischer Ablauf der Bewertung

Für die Bestimmung des SRI wird in der Studie ein Ablauf vorgestellt. Der Ablauf umfasst 6 Schritte. Der Ablauf wurde innerhalb eines Feldtests an zwei Gebäuden getestet. Der zeitliche Aufwand für die Bewertung list dabei abhängig von der vorliegenden Dokumentation der Technologien und dem Gebäudetyp. Für eine Durchführung wird zwischen 20 und 125 Minuten für ein Einfamilienhaus und zwischen 1,4 und 8,8 Stunden für ein Bürogebäude benötigt. [Verbeke et al., 2018]

**Schritt 1:** In einer Ersteinschätzung werden die Services bestimmt, die für das zu bewertende Gebäude relevant sind.

**Schritt 2:** Für alle relevanten Services wird das jeweilige im Gebäude vorhandene Funktionalitätslevel bestimmt. Dafür wird eine Inspektion der Gebäudetechnik vorgenommen, die Gebäudenutzer und/oder Facility-Manager befragt und die Dokumentation der technischen Gebäudeausrüstung zur Hilfe gezogen.

**Schritt 3:** Anhand eines hinterlegten Datensatzes werden die zugehörigen Werte der Funktionalitätslevels der Services hinsichtlich der Wirkungskriterien bestimmt.

**Schritt 4:** Ein Berechnungstool berechnet die gesamten Punkte mithilfe der hinterlegten Werte und Gewichtungen nach der in 3.1.3 beschriebenen Methodik.

**Schritt 5:** Die im Gebäude maximal möglichen Werte werden anhand der in Schritt 1 gewählten relevanten Services und der hinterlegten Werte der zugehörigen maximalen Funktionalitätslevels bestimmt.

**Schritt 6:** Der SRI ergibt sich aus dem Verhältnis der Ergebnisse aus Schritt 4 und Schritt 5 (vgl. 3.1.3). [Verbeke et al., 2018]

### 3.1.5 Interoperabilität und Datenpunktbezeichnungen

Innerhalb des Konsultationsprozesses zum EU-SRI-Ansatz wurde Interoperabilität als sehr bedeutender Einflussfaktor auf die Smart Readiness erklärt [Verbeke et al., 2018].

Die direkte Bewertung der Interoperabilität der Smart-Ready-Technologien wird im Rahmen der veröffentlichten Studie jedoch als zu umfangreich für eine Integration in den SRI gesehen. Die für die Bewertung der Interoperabilität nötigen Informationen und das technische Wissen, sowie die Vielzahl an Technologien führen aus Sicht der Autoren zu sehr großen zeitlichen und damit auch monetären Aufwendungen, die für eine Evaluation aufgebracht werden müssen. [Verbeke et al., 2018]

Im EU-Ansatz wird auf eine stark vereinfachte Methode zur teilweisen Bewertung der Interoperabilität zurückgegriffen. Die technologieneutralen Services, die für die Bestimmung des SRI benutzt

werden, setzen eine gewisse Interoperabilität einzelner Komponenten voraus. Für die ordnungsgemäße Funktion bestimmter Services, respektive derer Funktionalitätslevel, müssen die Sensoren, Aktoren und Regelsysteme trivialerweise Interoperabilität untereinander aufweisen. Somit wird die Interoperabilität der in einzelnen Services genutzten Komponenten indirekt durch das Vorhandensein eines Service mitbewertet (bzw. eine Interoperabilität für die Funktion eines einzelnen Service vorausgesetzt). Die service- und gebäudeübergreifende Interoperabilität wird nicht betrachtet.

Hinsichtlich einer standardisierten Datenpunktbezeichnung wird im EU-Ansatz nur der Hinweis gegeben, dass durch eine eventuelle spätere Integration von Building Information Models (BIM) auch eine Betrachtung einheitlicher Datenpunktbezeichnungen möglich sein kann. Konkrete Ansätze werden nicht gegeben. [Verbeke et al., 2018]

## 3.2 HEA-Ansatz

Ausgehend von den Forderungen nach einem Intelligenzfähigkeitsindikator der Novellierung der EPBD (vgl. 2.5) sowie unter Berücksichtigung der veröffentlichten Erkenntnisse des EU-SRI (vgl. 3.1), wurde im Auftrag der HEA - Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendung e.V. und dem BDEW – Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft eine auf die Gebäudenutzer abgestimmte Interpretation eines Smart Readiness Indicators erstellt. Die Ergebnisse wurden im Rahmen einer Grundlagenstudie veröffentlicht [Grinewitschus et al., 2019].

### 3.2.1 Konzept

Das Kernkonzept ist analog zu dem in 3.1.1 beschriebenen Konzept zu sehen. Die umzusetzenden Ziele ergeben sich direkt aus der Novellierung der EPBD. Die durch den SRI zu bewertenden Schlüsselfunktionen (Abb. 3.2) stehen auch im HEA-Ansatz im Fokus. Der HEA-SRI soll eine Bewertung anhand des Grades der vorhandenen technischen Gebäudeausrüstung und der durch die (Kommunikations-)Infrastruktur vorbereitende Installationen ermöglichen. Die vom HEA-SRI profitierenden Zielgruppen

- Gebäudebesitzer
- Gebäudenutzer
- Investoren
- Anbieter von intelligent vernetzten Technologien aus dem Smart-Home-Bereich

sind ähnlich der im EU-Ansatz genannten Kernzielgruppen. Eine Ausnahme bildet hier die Gruppe der Mieter als Teilgruppe der Gebäudenutzer, die insbesondere von einer Infrastruktur profitie-

ren, die eine Installation von einfach nachzurüstenden Smart-Home-Lösungen ermöglicht [Grinewitschus et al., 2019].

Der HEA-SRI soll sich durch folgende Punkte vom EU-SRI abgrenzen:

- Die Komplexität des HEA-SRI soll bewusst einfach gehalten werden.
- Der Schwerpunkt liegt auf Wohngebäuden.
- Die vorhandene Infrastruktur soll eine wichtigere Rolle in der Bewertung der Smart Readiness spielen.
- Der HEA-Ansatz betrachtet neben den Funktionsgruppen, die Bezug auf das Thema Energie nehmen, auch die Themen Unterhaltung, Sicherheit und Active Assisted Living (Applikationen, die das alltägliche Leben älterer und behinderter Menschen unterstützt, AAL). Durch die weitreichende Betrachtung des gesamten Smart-Living-Marktes wird eine größere Akzeptanz erwartet.
- Indikator und Benchmarking sollen sich an den Bedürfnissen der Kernzielgruppen orientieren [Grinewitschus et al., 2019] [HEA, 2019]

### 3.2.2 Methodik

Die Bewertungsmethodik baut im veröffentlichten HEA-Ansatz zum SRI auf einer Bewertungsmatrix auf. Die Angaben in der Bewertungsmatrix bewerten sowohl den Smartness-Grad der schon installierten Anwendungen und Devices, als auch die Vorbereitung des Systems zur Erweiterung [Grinewitschus et al., 2019]. Dazu gehört zum einen die Infrastruktur (Kommunikationsmöglichkeiten, Stromversorgung) und zum anderen die Interoperabilität der schon installierten Technologien. Inwieweit die Interoperabilität betrachtet wird, ist in 3.1.5 intensiv betrachtet.

Im Folgenden wird analog zu der Beschreibung der Methodik des EU-Ansatzes (vgl. 3.1.2) zunächst eine Top-Down-Erläuterung zum HEA-Ansatz gegeben. Zur korrekten wissenschaftlichen Abbildung der Methodik werden auch hier wieder Formeln, die die Zusammenhänge darstellen, aufgestellt. Der methodologische Rahmen dazu ist in Abb. 3.6 dargestellt.

### 3 Aktuelle Ansätze zur Berechnung eines SRI

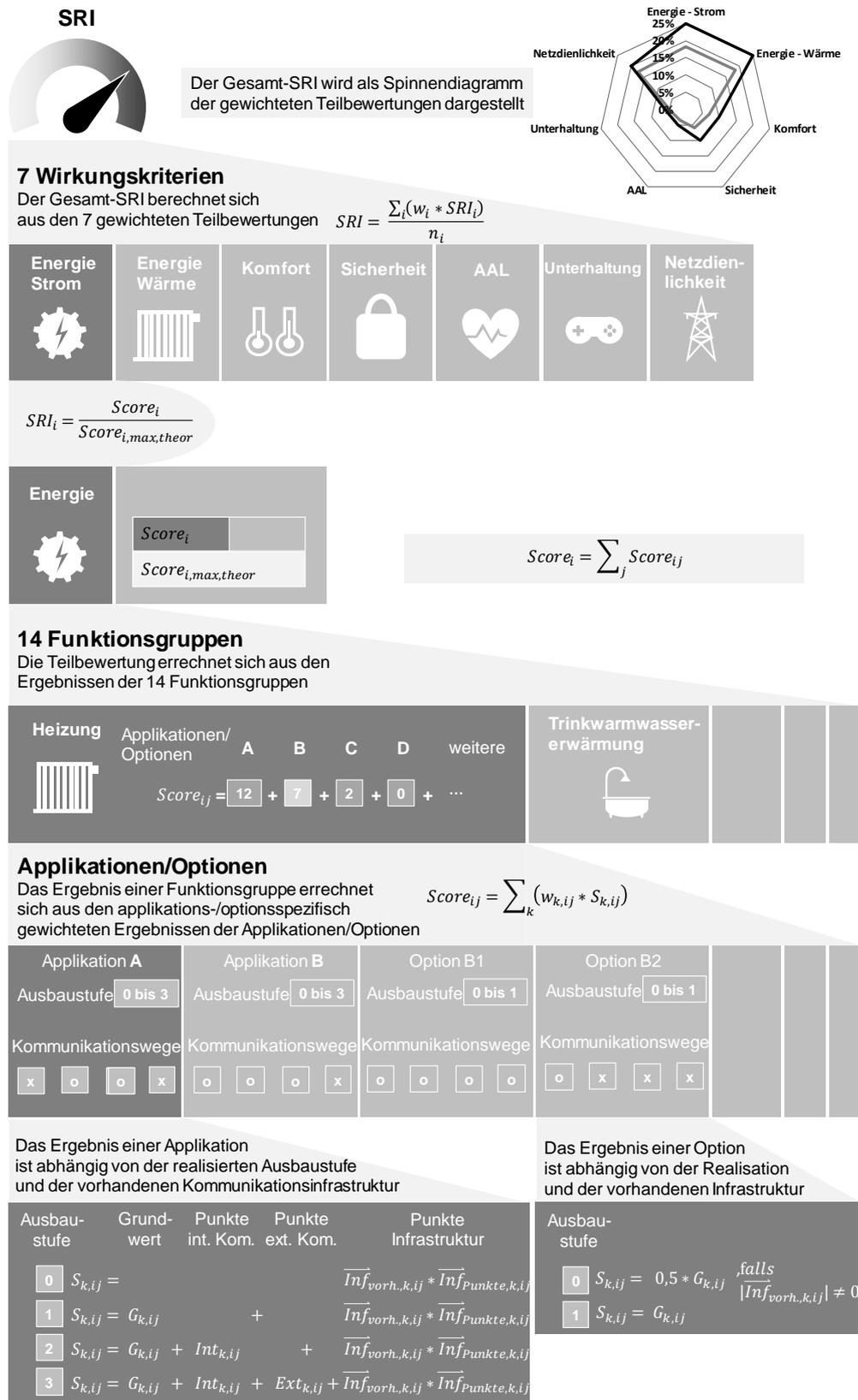


Abbildung 3.6: Methodik des HEA-Ansatzes zum SRI [eigene Darstellung]

Der Gesamt-SRI ergibt sich aus den Teilbewertungen der Wirkungskriterien [Grinewitschus et al., 2019]. Im Unterschied zum EU-SRI wird jedem Wirkungskriterium eine Gewichtung zugewiesen, woraus sich das in Abb. 3.1.2 gezeigte Netzdiagramm als Ergebnisdarstellung ergibt. Durch die Darstellung wird eine plakative Unterscheidung der relevanten Wirkungsbereiche und ein Aufzeigen von Optimierungspotenzial ermöglicht. Darüber hinaus kann durch Anpassen der Gewichtungsfaktoren eine differenzierte Bewertung verschiedener Gebäudetypen erfolgen, bei gleichzeitiger größtmöglicher Wahrung der Benchmarkfähigkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnisse.

$$SRI = \frac{\sum_i (w_i * SRI_i)}{n_i} \quad (3.8)$$

$SRI$ :	Gesamt-SRI
$SRI_i$ :	Teilbewertung des Wirkungskriteriums $i$
$w_i$ :	Gewichtung des Wirkungskriteriums $i$
$n_i$ :	Anzahl Wirkungskriterien
$i$ :	Wirkungskriterium

Die einzelnen Teilbewertungen errechnen sich aus den gewichtet aufsummierten und normalisierten Punkten der für das jeweilige Wirkungskriterium relevanten Applikationen und Optionen aus den Funktionsgruppen. Die Teilbewertung  $SRI_i$  der verschiedenen Wirkungskriterien  $i$  ergibt sich aus:

$$SRI_i = \frac{Score_i}{Score_{i,max,theor}} \quad (3.9)$$

$Score_i$ :	Erreichte Gesamtpunktzahl für das Wirkungskriterium $i$
$Score_{i,max,theor}$ :	Theoretisch maximal zu erreichende Gesamtpunktzahl für das Wirkungskriterium $i$

Im Unterschied zum EU-Ansatz gibt es hier keine Unterscheidung zwischen den in einem individuellen Gebäude maximal zu erreichenden Gesamtpunktwert für ein bestimmtes Wirkungskriterium  $i$  ( $Score_{i,max,Geb}$ ) und der theoretisch möglichen maximalen Gesamtpunktzahl für ein bestimmtes Wirkungskriterium ( $Score_{i,max,theor}$ ), welche sich durch einfaches Aufsummieren aller für das Auswahlkriterium relevanten Punkte ergibt.

Die erreichte Gesamtpunktzahl für ein Wirkungskriterium  $i$  ergibt sich wiederum aus den aufsummierten Teilbewertungen der Funktionsgruppen ( $j$ ) hinsichtlich des jeweiligen Wirkungskriteriums  $i$ , wobei nicht jede Funktionsgruppe Einfluss auf jedes Wirkungskriterium haben muss. Im Gegensatz zum EU-Ansatz findet die Gewichtung nicht hier statt. Im HEA-Ansatz hat jede Applikation und Option eine individuelle Gewichtung. Eine einheitliche Gewichtung einer Funktionsgruppe auf ein bestimmtes Wirkungskriterium ist hier nicht vorgesehen.

$$Score_i = \sum_j Score_{ij} \quad (3.10)$$

$Score_{ij}$ : Teilbewertung der Funktionsgruppe  $j$  hinsichtlich des Wirkungskriteriums  $i$   
 $j$ : Funktionsgruppe

Die Teilbewertung einer Funktionsgruppe  $j$  hinsichtlich eines Wirkungskriteriums  $i$  errechnet sich aus den Punkten, die für die jeweiligen Applikationen und Optionen im Gebäude vergeben wurden. Die genaue Berechnung dazu wird im folgenden Abschnitt erläutert.

$$Score_{ij} = \sum_k S_{k,ij} \quad (3.11)$$

$S_{k,ij}$ : Punktwert der Applikation oder Option  $k$  aus der Funktionsgruppe  $j$  hinsichtlich des Wirkungskriteriums  $k$   
 $k$ : Applikation/Option der jeweiligen Funktionsgruppe

Die Punktwerte der Applikationen und Optionen berechnen sich unterschiedlich. Für eine Applikation ergibt sich der Wert abhängig von der vorhandenen Ausbaustufe der Applikation, sowie der vorliegenden Kommunikationsinfrastruktur. Bei einer Option wird nicht in verschiedene Ausbaustufen differenziert. Die Ausbaustufen ergeben sich wie folgt:

- Ausbaustufe 0: Applikation nicht realisiert
- Ausbaustufe 1: Applikation realisiert ohne Kommunikation
- Ausbaustufe 2: Applikation realisiert mit interner Kommunikation
- Ausbaustufe 3: Applikation realisiert mit externer Kommunikation [Grinewitschus et al., 2019]

Mit interner Kommunikation ist eine Kommunikation innerhalb des Gebäudes gemeint. Eine Applikation mit externer Kommunikation kann über die Gebäudegrenze hinaus einen Datenverkehr aufbauen.

Für Optionen ergeben sich nur die ersten beiden Ausbaustufen. Eine Bewertung der Kommunikation (intern/extern) erfolgt bereits über die zur Option gehörende Applikation. Eine Doppelwertung wird so vermieden. [Wald, 2018]

Die vorliegende Infrastruktur wird anhand der folgenden Abfragen bewertet:

- Kommunikation zu Sensor/Aktor mit Funk möglich?
- Kommunikation zu Sensor/Aktor mit Powerline Communication (PLC) möglich?

- Kommunikation zu Sensor/Aktor mit Leerrohr möglich?
- Kommunikation zu Sensor/Aktor mit LAN möglich? [Grinewitschus et al., 2019]

Je nach Ausbaustufe ergibt sich für eine Applikation folgende Berechnung:

$$S_{k,ij} = G_{k,ij} + Int_{k,ij} + Ext_{k,ij} + \overrightarrow{Inf}_{vorh.,k,ij} \circ \overrightarrow{Inf}_{Punkte,k,ij} \quad (3.12)$$

$S_{k,ij}$ :	Punktwert der Applikation $k$ aus der Funktionsgruppe $j$ hinsichtlich des Wirkungskriteriums $i$
$G_{k,ij}$ :	Grundwert für eine realisierte Applikation $k$
$Int_{k,ij}$ :	Punkte für eine vorhandene interne Kommunikation der Applikation $k$
$Ext_{k,ij}$ :	Punkte für eine vorhandene externe Kommunikation der Applikation $k$
$\overrightarrow{Inf}_{vorh.,k,ij}$ :	Eingabevektor der vorhandenen/nicht vorhandenen Infrastruktur für die Applikation $k$
$\overrightarrow{Inf}_{Punkte,k,ij}$ :	Bewertungsvektor der Kommunikationsinfrastruktur für die Applikation $k$

Bei nicht realisierter Applikation (Ausbaustufe 0) können Punkte für die Infrastruktur je nach vorhandener Kommunikationswege erreicht werden. Eine solche Bewertung der vorbereiteten Infrastruktur für smarte Technologien bildet einen großen Unterschied in der Methodik im Vergleich zum EU-Ansatz, in dem nur realisierte Funktionalitätslevel bewertet werden. Das Ziel der Bewertung der Smart Readiness wird damit besser gerecht auch im Bezug auf die EU-Gebäuderichtlinie (z.B. Leerrohre für Vorverkabelung E-Mobilität). Für Ausbaustufe 1 wird der Grundwert für die realisierte Applikation addiert und für die Ausbaustufen 2 und 3 zusätzlich noch jeweils die Punkte für interne/externe Kommunikation.

Eine Option wird nur nach realisiert/nicht realisiert bewertet. Eine realisierte Option erhält den Grundwert. Eine nicht realisierte Option mit mindestens einem möglichen Kommunikationsweg erhält den halben Grundwert. [Grinewitschus et al., 2019]

Damit wird eine doppelte Bewertung der Kommunikationswege bei vorhandener Option vermieden, jedoch ein positiver Einfluss einer vorbereiteten Kommunikation für eine Nachrüstung geschaffen [Wald, 2018]:

$$S_{k,ij} = \begin{cases} 0,5 * G_{k,ij}, & \text{falls } \overrightarrow{Inf}_{vorh.,k,ij} \neq 0 & \text{für nichtrealisierte Option} \\ G_{k,ij} & & \text{für realisierte Option} \end{cases} \quad (3.13)$$

$S_{k,ij}$ :	Punktwert der Option $k$ aus der Funktionsgruppe $j$ hinsichtlich des Wirkungskriteriums $k$
--------------	--

$G_{k,i,j}$ : Grundwert für eine realisierte Applikation  $k$   
 $\vec{Inf}_{vorh.,k,i,j}$ : Eingabevektor der vorhandenen/nicht vorhandenen Infrastruktur für die Applikation  $k$

Die Zahl der festzulegenden Punktwerte und Gewichtungen liegt deutlich unter der Anzahl im EU-Ansatz und unterstreicht die Praktikabilität des HEA-Ansatzes.

### 3.2.3 Wirkungskriterien, Funktionsgruppen, Applikationen/Optionen und Ausbaustufen

Die Wirkungskriterien des HEA-Ansatzes unterscheiden sich im Detail nicht sehr stark von denen des EU-Ansatzes. Im HEA-Ansatz werden 7 Wirkungskriterien differenziert [Grinewitschus et al., 2019].

Jedem Wirkungskriterium wird eine Gewichtung zugeordnet (vgl. 3.2.2). Die Gewichtungen stellen verschieden starke Einflüsse der Wirkungskriterien auf den Gesamt-SRI dar. Im Gegensatz zum EU-SRI wird anhand der Veränderbarkeit dieser Gewichte eine individuelle Bewertung verschiedener Gebäudetypen ermöglicht. Im EU-SRI wird dazu der gebäudespezifische Maximalwert variabel gehalten (vgl. 3.2.2).

Die Wirkungskriterien und die Gewichte, die im Rahmen der vorliegenden Grundlagenstudie als Default-Werte für den Feldtest gesetzt wurden, sind in Tab. 4.6 dargestellt.

**Tabelle 3.1:** Wirkungskriterien und Default-Gewichte HEA-SRI [Grinewitschus et al., 2019]

Wirkungskriterium	Gewicht (Default-Wert)		
Energie - Strom	$w_{Strom}$	=	0,25
Energie - Wärme	$w_{Wärme}$	=	0,25
Komfort	$w_{Komfort}$	=	0,10
Active Assisted Living (AAL)	$w_{AAL}$	=	0,05
Sicherheit	$w_{Sicherheit}$	=	0,10
Unterhaltung	$w_{Unterhaltung}$	=	0,05
Netzdienlichkeit	$w_{Netzdienlichkeit}$	=	0,20

Im Unterschied zum EU-SRI wird hier eine Unterscheidung zwischen Energie – Strom und Energie –Wärme vorgenommen. Mit einer Gesamtgewichtung von 50 % wird dem Energieaspekt eine große Bedeutung zugeschrieben für den Gesamt-SRI. Es sollte jedoch beachtet werden, dass die Werte für die Gewichtung der Wirkungskriterien für verschiedene Gebäudetypen angepasst werden können [Wald, 2018]. In der ersten veröffentlichten Grundlagenstudie wurden dazu noch keine konkreten Vorschläge veröffentlicht. Der Komfortaspekt ist analog zu dem gleichnamigen Wirkungskriterium im EU-Ansatz zu sehen. Das Kriterium AAL kann analog zu dem Kriterium Ge-

sundheit gesehen werden und „Netzdienlichkeit“ deckt den gleichen Wirkungsbereich wie „Flexibilität für das Stromnetz“ ab. Damit unterscheidet sich der HEA-Ansatz mit den Kriterien Sicherheit und Unterhaltung von den im EU-Ansatz betrachteten Aspekten Wartung und Informationen an den Gebäudenutzer. Dabei ist zu beachten, dass Services, die z.B. dem Bereich Information an den Gebäudenutzer zugeordnet sind auch in Kriterien des HEA-Ansatzes betrachtet werden können und andersherum. Eine konkrete Unterscheidung der abgedeckten Services bzw. Applikationen/Optionen ist über die Wirkungskriterien nicht möglich. Die Wirkungskriterien, auf die besonderen Wert gelegt wird von den beiden Studien, können so jedoch betrachtet werden.

Alle Applikationen und Optionen sind 14 Funktionsgruppen zugeordnet. Die Funktionsgruppen sind:

- Heizung
- Wohnungslüftung
- Trinkwarmwassererwärmung
- Beleuchtung
- Sonnenschutz
- Lastmanagement / elektrische Verbraucher
- Energiespeicher
- Energieerzeugung
- Monitoring und Betriebsoptimierung
- Sicherheit
- Unterhaltung
- AAL
- Elektromobilität
- Gebäude allgemein [Grinewitschus et al., 2019]

Auffällig im Vergleich zum EU-Ansatz und zur DIN V 18599-11 ist das Fehlen des Punktes „Kühlung“. Darüber hinaus, wie auch schon bei den Wirkungskriterien erkannt, sind die Funktionsgruppen Sicherheit und Unterhaltung/Multimedia vertreten.

Den 14 Funktionsgruppen sind 27 Funktionen zugeordnet mit insgesamt 94 Applikationen und Optionen [Grinewitschus et al., 2019]. Ein direkter Vergleich mit den als „Services“ benannten Funktionen aus dem EU-Ansatz ist nur bedingt möglich. Einige der 94 Applikationen und Optionen entsprechen einem Service im EU-Ansatz. Andere können gleichgesetzt werden mit einem Funktionalitätslevel eines Service. Eine große Überschneidung kann durch folgenden vergleichenden Ansatz erzielt werden. Die 94 Applikationen und Optionen teilen sich in 74 Applikationen und

20 Optionen auf [Grinewitschus et al., 2019]. Eine Applikation entspricht vom Funktionsumfang etwa dem eines Services des EU-Ansatzes. Damit liegt der Umfang des HEA-Ansatzes zwischen dem reduzierten (52) und dem vollständigen (112) EU-Ansatz. Jede Applikation kann dabei in drei weiteren Ausbaustufen der Kommunikation vorhanden sein (vgl. 3.2.2).

#### 3.2.4 Interoperabilität und Datenpunktbezeichnungen

In ihrer Definition von Smartness wird in der Grundlagenstudie der HEA die Interoperabilität als wichtiger Indikator für die Smartness einer Ausstattung aufgeführt. Proprietäre Systeme werden auch in Zukunft eine große Rolle im Smart-Home-Bereich spielen. Die Systemoperabilität wird dabei unterschieden zwischen einer offenen Programmierschnittstelle mit freiem Zugriff auf die Gerätefunktionen und –informationen, die Einbindung von Drittsystemen durch den jeweiligen Hersteller oder eben der vollständigen Isolation ohne Vernetzung mit anderen Systemen. [Grinewitschus et al., 2019]

Durch die Unterscheidung der Ausbaustufen der Applikationen von:

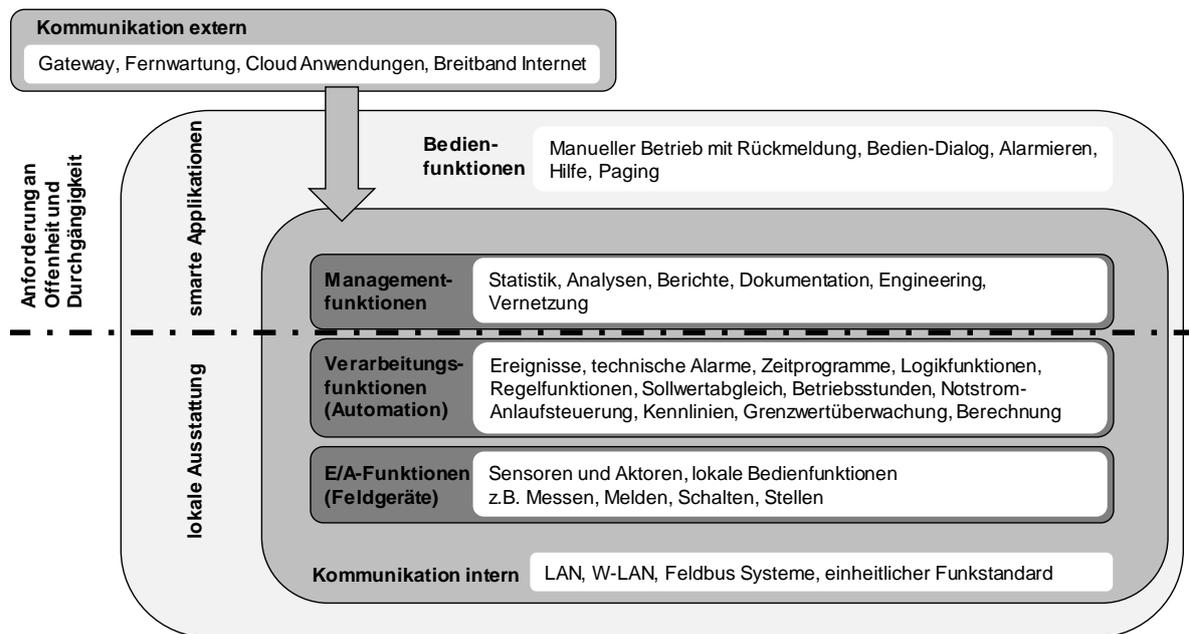
- Ausbaustufe 0: Applikation nicht realisiert
- Ausbaustufe 1: Applikation realisiert ohne Kommunikation
- Ausbaustufe 2: Applikation realisiert mit interner Kommunikation
- Ausbaustufe 3: Applikation realisiert mit externer Kommunikation [Grinewitschus et al., 2019]

wird die Möglichkeit gegeben, die Interoperabilität differenziert zu bewerten.

Die Bewertung der Interoperabilität baut dabei auf einem erweiterten Ebenenmodell nach [Deutsches Institut für Normung e.V., 2016] auf. Das erweiterte Ebenenmodell ist in Abb. 3.7 dargestellt.

Die Bedienfunktionen haben Zugriff auf Objekte aus allen Ebenen des Modells. Eine interne Kommunikation ist gegeben, wenn die Geräte der E/A-Funktionen und die Verarbeitungsfunktionen von einer übergeordneten Instanz gesteuert oder Daten ausgetauscht werden können. D.h., ist eine Durchgängigkeit zu den Managementfunktionen gegeben, so soll die Applikation mit „Kommunikation intern“ bewertet werden. Ist darüber hinaus ein Datenaustausch von dieser übergeordneten Instanz außerhalb der Systemgrenzen der Applikation möglich liegt eine externe Kommunikation vor und die maximale Punktzahl für die Interoperabilität wird für die jeweilige Applikation erreicht. [Grinewitschus et al., 2019]

Ähnlich wie in dem EU-Ansatz wird hierbei nur die Interoperabilität der realisierten Systeme innerhalb einer Applikation (vgl. Service im EU-Ansatz in 3.1.2, 3.1.3) bewertet. Durch eine vorhandene externe Kommunikation kann zwar eine Interoperabilität zu anderen Komponenten gegeben sein, ist aber nicht zwingend gewährleistet. Auch im Falle der Erweiterung eines Systems, der



**Abbildung 3.7:** Erweitertes Ebenenmodell nach DIN EN ISO 16484-2 [In Anlehnung an Grinewitschus et al. [2019]]

Zusammenschaltung oder dem Austausch ist durch die hier vorgestellte Methode keine Bewertung der Interoperabilität hinsichtlich genannter Aspekte möglich. In der veröffentlichten Grundlagenstudie wird das über die Herstellerneutralität des Indikators begründet [Grinewitschus et al., 2019]. Damit wird zwar im Vergleich zum EU-SRI eine explizite Bewertung der Interoperabilität der innerhalb einer Applikation arbeitenden Komponenten gegeben und darüber hinaus die externe Kommunikation betrachtet, eine vollständige und aussagekräftige Bewertung der Interoperabilität zu noch zu erweiternden Systemen, dem Zusammenschalten oder Mitbenutzen von Systemen oder dem Austausch von Komponenten ist jedoch nicht gegeben.

Das im Rahmen der Grundlagenstudie der HEA entwickelte Bewertungsverfahren setzt den Schwerpunkt auf den Smart-Home-Bereich [Wald, 2018]. Die Berücksichtigung von Datenpunktbezeichnungen, respektive der Nutzung eines einheitlichen Bezeichnungssystems, ist vorrangig für Smart-Building relevant [Strese et al., 2010]. Die Bezeichnung von Datenpunkten wird, wie auch im EU-Ansatz, an keiner Stelle der HEA-Grundlagenstudie genannt [Grinewitschus et al., 2019].

### 3.3 LEED

Das 1993 gegründete United States Green Building Council (USGBC) verfolgt das Ziel, ökologische Aspekte und nachhaltiges Design im Baugewerbe zu stärken [Zuo and Zhao, 2014]. Die vom USGBC zur Erreichung dieses Ziels entwickelten Standards werden im Rahmen des Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) Programms gesammelt [Zuo and Zhao, 2014]. LEED

zielt darauf ab, eine integrierte, kosteneffiziente Adaption von nachhaltigem Design, Bau und Betrieb ermöglichen [United States Green Building Council, 2019]. Dazu bietet LEED ein internationales Zertifizierungssystem für verschiedene Gebäudetypen [Magyar, 2018]. Das LEED-Zertifizierungsprogramm ist dabei nicht speziell für Smart Buildings oder Smart Homes, jedoch beinhaltet die neueste Version von LEED (LEED v4) Bewertungskriterien, die in den Bereich der intelligenten Gebäudeausrüstung fallen [Magyar, 2018].

Die Zertifizierung erfolgt anhand eines vorgegebenen Credit-Systems. Dabei werden je nach Gebäudetyp Punkte in den Bereichen

- Integrativer Prozess
- Lage und Transport
- Nachhaltige Standorte
- Wasser-Effizienz
- Energie und Atmosphäre
- Material und Ressourcen
- Innenraumqualität
- Innovation

vergeben. Jeder der Bereiche teilt sich zum einen in verschiedene Voraussetzungen, die erfüllt sein müssen, und zum anderen in mehrere Funktionsgruppen auf, in denen eine gewisse Punktzahl abhängig vom Gebäudetyp erreicht werden kann. [United States Green Building Council, 2019]

Von den Funktionsgruppen ist nur ein Bruchteil relevant für die Intelligenzfähigkeit von Gebäuden. Im Bereich Energie und Atmosphäre ist seit der neuesten Novellierung eine Bewertung der Netzdienlichkeit vorgesehen. Unter der Funktionsgruppe Demand-Response kann für die Fähigkeit der Interaktion mit dem Stromnetz eine Punktzahl von 3 erzielt werden (die in der LEED-Zertifizierung maximal erreichbare Punktzahl beträgt 110). Weiter kann durch eine selbstlernende Steuerung des Heizsystems ein weiterer Punkt erreicht werden und durch ein aufs Energiemanagement - also auf einen optimierten Betrieb von Erzeugungs- und Verbrauchseinheiten - ausgelegtes Energie-Metering (vernetzten Messen von erzeugter und verbrauchter Energie) weitere zwei Punkte. [Magyar, 2018]

Die neueste Version von LEED beinhaltet damit im Vergleich zu alten Versionen einige wenige Aspekte aus dem Bereich der Gebäudeintelligenz. In Relation zu den in 3.1 und 3.2 vorgestellten Ansätzen ist die Art und der Umfang jedoch irrelevant für die Bewertung der Gebäudeintelligenz von Smart Homes und Smart Buildings.

### 3.4 Weitere Zertifizierungsansätze in der Gebäudetechnik

Weitere Zertifizierungsansätze für die Gebäudetechnik wie das internationale BREEAM-Schema und der WELL-Gebäudestandard besitzen im Ansatz Einflüsse aus der intelligenten Gebäudetechnik. Das intelligente Energie-Metering wird im Rahmen von BREEAM mitbewertet. Im WELL-Gebäudestandard werden hingegen vorrangig Aspekte aus Gesundheit und Raumqualität betrachtet. Dabei haben intelligente Heiz- und Raumluftsysteme positiven Einfluss auf die Bewertung. [Magyar, 2018]

Damit wird analog zu der LEED-Zertifizierung auch in weiteren Zertifizierungsschemata immer mehr die intelligente Gebäudetechnik mitbewertet. Eine weitergehende Betrachtung der Bewertungssysteme ist aufgrund der Trivialität verglichen mit den SRI-Ansätzen hier jedoch nicht sinnvoll.

### 3.5 Vergleich und Bewertung der Ansätze

Der EU-Ansatz und der HEA-Ansatz zur Entwicklung eines Smart Readiness Indicator weisen eine Vielzahl an Gemeinsamkeiten auf. Beide Studien stützen sich auf ein ähnliches Konzept. Hinsichtlich der Methodik, der Art und des Umfangs der betrachteten intelligenten Gebäudeausstattung sowie insbesondere der Interoperabilität von smarten Technologien gibt es aber auch signifikante Unterschiede.

Hinsichtlich anderer Zertifizierungsansätze, welche sich zu Teilen mit Diensten aus Bereichen der intelligenten Gebäudetechnik befassen (LEED, BREEAM, WELL), existiert große Diskrepanz. Die bestehenden internationalen Zertifizierungsansätze weisen lediglich einen sehr kleinen Anteil an smarten Technologien in ihren Bewertungssystemen auf. Ein Vergleich zwischen den beiden expliziten Smart Readiness Indikatoren und den weiteren Zertifizierungsansätzen erscheint somit nicht sinnvoll.

Im Folgenden werden daher der EU-Ansatz und der HEA-Ansatz mit einer gewichteten multikriteriellen Entscheidungsanalyse verglichen, und somit der Ansatz gewählt, auf dem der weitere Verlauf dieser Arbeit für die Integration des Interoperabilitätskriteriums und der Datenpunktbezeichnung aufbaut.

Zunächst werden Überlegungen angestellt, anhand welcher Kriterien die Entscheidungsanalyse erfolgen soll:

Das von den SRI-Ansätzen abgedeckte **Spektrum an smarten Technologien** ist für die Aussagekraft eines Smart Readiness Indicators von großer Bedeutung.

Der **Aufwand für die Bewertung** von Gebäuden sollte dabei jedoch möglichst gering sein, um die monetäre Aufwendung für eine solche Zertifizierung zu begrenzen.

Für eine sinnvolle Anwendung des SRI sollte durch die Methodik ein möglichst großes **Spektrum an Gebäudetypen** evaluiert werden können. Dabei sollte die Andersartigkeit verschiedener Gebäudetypen hinsichtlich ihrer Nutzung Beachtung finden.

Die **Methodik des Berechnungsverfahrens** ist essenziell für die Akribie des berechneten SRI. Verschiedene intelligente Technologien sollten ihrem Einfluss auf die Wirkungskriterien gemäß verschieden gewertet werden können, ohne jedoch einen zu großen Implementierungsaufwand zur Festlegung der Gewichte und Werte zu erzeugen.

Die Intelligenzfähigkeit eines Gebäudes beinhaltet auch die Vorbereitung von (noch) nicht realisierten intelligenten Technologien – respektive die „Readiness“ dazu, intelligent zu agieren. Somit sollte auch die **vorbereitete Infrastruktur zur Implementierung intelligenter Gebäudetechnik** mitbewertet werden.

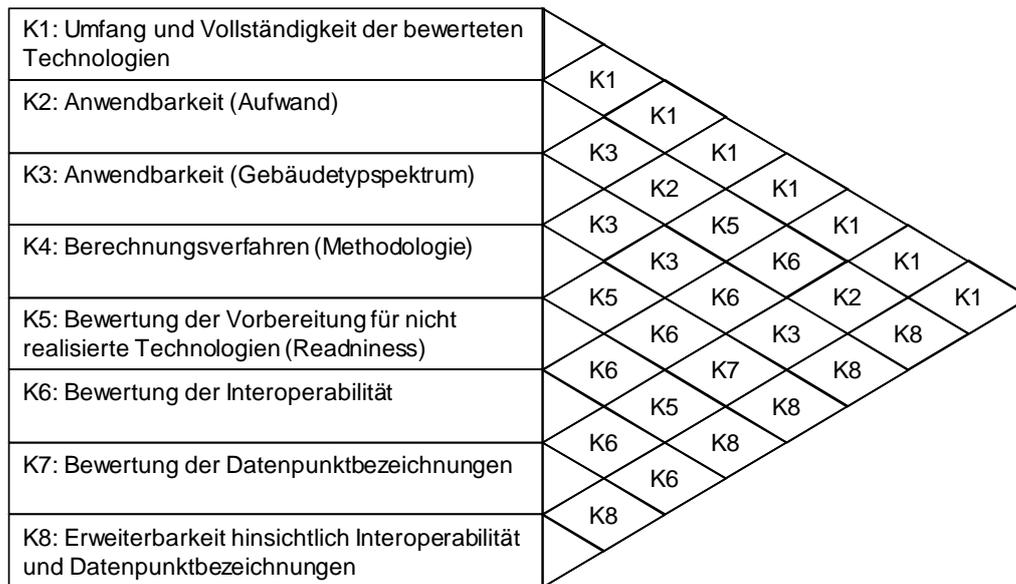
Die **Interoperabilität** und die **Datenpunktbezeichnungen** im Gebäude wurde im Rahmen dieser Arbeit und anhand von vorhergehenden Konsultationen und Studien (vgl. 2.1, 3.1.5, 3.2.4) als sehr wichtig für die Gebäudeintelligenz identifiziert. Ein SRI sollte diese Kriterien mitbewerten.

Die bisherigen Ergebnisse dieser Arbeit haben ergeben, dass die beiden Aspekte jedoch noch nicht ausreichend mit in die Bewertungen der beiden SRI-Ansätze einfließen. Damit spielt die **Erweiterbarkeit hinsichtlich der Interoperabilität und der Datenpunktbezeichnungen** eine wichtige Rolle für die Entscheidungsanalyse.

Die Kriterien für die gewichtete multikriterielle Entscheidungsanalyse werden zu folgenden bestimmt:

- Umfang und Vollständigkeit der bewerteten Technologien
- Anwendbarkeit (Aufwand)
- Anwendbarkeit (Gebäudetypenspektrum)
- Berechnungsverfahren (Methodik)
- Bewertung der Vorbereitung für nicht realisierte Technologien (Readiness)
- Bewertung der Interoperabilität
- Bewertung der Datenpunktbezeichnungen
- Erweiterbarkeit hinsichtlich der Interoperabilität und der Datenpunktbezeichnungen

Die Präferenzmatrix der Kriterien für die Entscheidungsanalyse ist in Abb. 3.8 dargestellt. Die aus der Präferenzmatrix resultierenden Gewichte sind in Tab. 3.2 dargestellt.



**Abbildung 3.8:** Präferenzmatrix der Kriterien für die Bewertung der SRI-Ansätze

**Tabelle 3.2:** Resultierende Gewichte der Kriterien für die Bewertung der SRI-Ansätze

Kriterium	Nennungen	Gewicht
K1: Umfang und Vollständigkeit der bewerteten Technologien	7	0,22
K2: Anwendbarkeit (Aufwand)	2	0,08
K3: Anwendbarkeit (Gebäudetypenspektrum)	4	0,14
K4: Berechnungsverfahren (Methodik)	0	0,03
K5: Bewertung der Vorbereitung für nicht realisierte Technologien (Readiness)	3	0,11
K6: Bewertung der Interoperabilität	6	0,19
K7: Bewertung der Datenpunktbezeichnungen	1	0,06
K8: Erweiterbarkeit hinsichtlich der Interoperabilität und der Datenpunktbezeichnungen	5	0,17

Das Ziel der aussagekräftigen Bewertung der Gebäudeintelligenz führt richtigerweise dazu, dass der Umfang und die Vollständigkeit der bewerteten Technologien ein stark zu gewichtendes Kriterium für die Bewertung der SRI-Ansätze bildet. Die Interoperabilität spielt gerade im Smart-Home-Bereich eine wichtige Rolle und sollte in der Bewertung der SRI-Ansätze eine starke Gewichtung erhalten (oder die Erweiterbarkeit hinsichtlich dieser). Die Anwendbarkeit sollte dabei jedoch nicht unberücksichtigt bleiben, wobei der Aufwand bei der Bewertung in den Hintergrund gerückt wird, um wichtige Kriterien wie die Interoperabilität einbinden zu können. Der Bewertung

der Datenpunktbezeichnungen wird hier nur eine kleine Bedeutung zugeschrieben, da die Anwendbarkeit im Smart-Home-Bereich zu einem unverhältnismäßig großen Aufwand führen würde. Die Einbeziehung über eine Bonuspunkteregel o.Ä. (vgl. Kapitel 4) sollte jedoch in Betracht gezogen werden.

Mithilfe der Gewichte wird in Kombination mit den Erfüllungsgraden der einzelnen Kriterien in Tab. 3.3 die gewichtete Entscheidungsmatrix gebildet, um den (vollständigen) EU- und den HEA-Ansatz zur Entwicklung eines SRI zu bewerten und zu vergleichen. Die Erfüllungsgrade (EG) sind auf einer Skala von 1 (nicht erfüllt) bis 9 (vollständig erfüllt) abgestuft und aus den vorangegangenen Recherchen und Überlegungen abgeleitet (3.1 und 3.2).

**Tabelle 3.3:** Entscheidungsmatrix zu den SRI-Ansätzen

Kriterien	Gewichte	EU-Ansatz		HEA-Ansatz	
		Erfüllungsgrad	Ergebnis	Erfüllungsgrad	Ergebnis
K1: Umfang und Vollständigkeit der bewerteten Technologien	0,22	8	<b>1,76</b>	7	<b>1,54</b>
K2: Anwendbarkeit (Aufwand)	0,08	5	<b>0,40</b>	7	<b>0,56</b>
K3: Anwendbarkeit (Gebäudetypenspektrum)	0,14	8	<b>1,12</b>	5	<b>0,70</b>
K4: Berechnungsverfahren (Methodik)	0,03	5	<b>0,15</b>	7	<b>0,21</b>
K5: Bewertung der Vorbereitung für nicht realisierte Technologien (Readiness)	0,11	1	<b>0,22</b>	7	<b>0,77</b>
K6: Bewertung der Interoperabilität	0,19	3	<b>0,57</b>	5	<b>0,95</b>
K7: Bewertung der Datenpunktbezeichnungen	0,06	1	<b>0,06</b>	1	<b>0,06</b>
K8: Erweiterbarkeit hinsichtlich der Interoperabilität und der Datenpunktbezeichnungen	0,17	5	<b>0,85</b>	7	<b>1,19</b>
<b>Summe</b>	<b>100 %</b>		<b>5,13</b>		<b>5,98</b>

Die Ergebnisse der SRI-Ansätze aus der Entscheidungsmatrix ergeben sich zu:

- HEA-Ansatz (5,98)
- EU-Ansatz (5,13)

Beide SRI-Ansätze erzielen ein vergleichbares Ergebnis, wobei der HEA-Ansatz etwas besser abschneidet. Das ist darauf zurückzuführen, dass beide auf einem ähnlichen Konzept aufbauen und eine Vielzahl an Parallelitäten aufweisen. Die Hauptunterschiede lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Die Interoperabilität wird vom HEA-Ansatz bereits jetzt direkt mitbewertet, wenn auch auf einem stark abstrahierten Level (vgl. 3.2.4). Im Vergleich zu der indirekten Bewertung des EU-Ansatzes (vgl. 3.1.5) bietet das den Vorteil, dass eine Integration in die Bewertungsmethodik vereinfacht

wird. Der weitere Vorteil des HEA-Ansatzes ist die Bewertung der vorbereiteten Infrastruktur (vgl. 3.2.2). Die Stärken des EU-Ansatzes, wie die bessere Anwendbarkeit auf verschiedene Gebäudetypen (vgl. 3.1.2) und der größere Umfang der Technologien durch die verschiedenen Funktionalitätslevel (vgl. 3.1.2), werden durch die Vorteile des HEA-Ansatzes hinsichtlich der in dieser Arbeit wichtigen Kriterien kompensiert.

### 3.6 Fazit

Zur Berechnung eines Smart Readiness Indicator wird im Auftrag der EU-Kommission ein Verfahren entwickelt. Parallel dazu arbeitet die HEA – Fachgemeinschaft für Energieeffizienz an einem praktischen Ansatz eines Smart Readiness Indicator mit Schwerpunkt Wohngebäude und der Erweiterung auf Smart-Living-Services und bringt diesen in nationale und europäische Diskussionen zum SRI ein. Internationale Zertifizierungssysteme bewerten zum Teil ebenfalls die Intelligenzfähigkeit von Gebäuden.

Der EU-Ansatz und der HEA-Ansatz zur Entwicklung eines Smart Readiness Indicators weisen eine Vielzahl an Gemeinsamkeiten auf. Beide Studien stützen sich auf ein ähnliches Konzept. Hinsichtlich der Methodik, der Art und des Umfanges der betrachteten intelligenten Gebäudeausstattung sowie insbesondere der Interoperabilität von smarten Technologien gibt es aber auch signifikante Unterschiede.

Hinsichtlich anderer Zertifizierungsansätze, welche sich zu Teilen mit Diensten aus Bereichen der intelligenten Gebäudetechnik befassen (LEED, BREEAM, WELL), existiert große Diskrepanz. Die bestehenden internationalen Zertifizierungsansätze weisen lediglich einen sehr kleinen Anteil an smarten Technologien in ihren Bewertungssystemen auf.

Kriterien, die für die Entwicklung eines SRI, insbesondere hinsichtlich der Integration von Interoperabilität, von Bedeutung sind, wurden herausgearbeitet und die Ansätze bewertet und miteinander verglichen. Eine gewichtete multikriterielle Entscheidungsanalyse führt basierend auf den erarbeiteten Kriterien zu dem Ergebnis, dass eine Erweiterung des HEA-Ansatzes zum SRI sinnvoll erscheint. Die Ergebnisse der Analyse sind in Tab. 3.3 dargestellt.

Basierend auf den Ergebnissen in diesem Kapitel kann im nächsten Kapitel die Integration der Interoperabilität und der Datenpunktbezeichnungen in den bestehenden Ansatz der HEA für einen SRI vorbereitet werden.



## 4 Integration des Interoperabilitätsaspektes und der Datenpunktbezeichnungen

Bevor die Interoperabilität und die Datenpunktbezeichnungen in den HEA-Ansatz zum Smart Readiness Indicator integriert werden können, ist eine intensive Betrachtung der Kommunikationsprotokolle im Smart-Home- sowie Smart-Building-Bereich vonnöten. Neben der reinen Interoperabilität zwischen den Kommunikationsprotokollen werden der Energieverbrauch und die verwendete Verschlüsselung analysiert und bewertet. Zusätzlich werden Datenpunktbezeichnungen und bestehende Bezeichnungssysteme betrachtet und verglichen. Die gewichtete multikriterielle Entscheidungsanalyse ermöglicht den Vergleich der Protokolle und Bezeichnungssysteme und liefert zusätzlich quantitative Ergebnisse, die für eine Integration in die Bewertungsmethodik des bestehenden SRI-Ansatzes unabdingbar sind. Abschließend erfolgt die Integration der Aspekte in die Bewertungsmethodik des HEA-SRI.

### 4.1 Kommunikationsprotokolle

Im Folgenden werden diverse drahtlose und kabelgebundene Kommunikationsprotokolle (respektive -netzwerke) vorgestellt, hinsichtlich Interoperabilität, IT-Sicherheit und Eigenstromverbrauch analysiert und anschließend mittels multikriterieller gewichteter Entscheidungsanalyse verglichen und bewertet, so dass die Integration dieser in die Bewertungsmethodik ermöglicht wird. Die betrachteten Kommunikationsprotokolle - ohne Anspruch auf Vollständigkeit, jedoch aus Sicht des Autors alle für diese Arbeit relevanten Protokolle - sind:

- (Teil-)Kabelgebundene Technologien
  - KNX
  - LON
  - BACnet
- Funkbasierte Vernetzung
  - ZigBee
  - Z-Wave
  - EnOcean

- Homematic IP
- Thread
- WLAN (IEEE 802.11)
- Bluetooth LE

### 4.1.1 KNX

KNX ist ein internationaler Standard (ISO/IEC 14543) für die Gebäudeautomation, entwickelt von der Konnex Association. KNX kombiniert die Standards von EIB (European Installation Bus), BatiBUS und EHS (European Home System). Für die Vernetzung mit KNX-Standard kann sowohl ein Twisted-Pair-Kabel mit KNX TP0 und KNX TP1, eine Powerline-Verbindung mit KNX PL132 und PL110, als auch eine funkbasierte Verbindung mit KNX RF erfolgen. Zusätzlich kann auch ein IP-basiertes Tunneling mit KNX net/IP genutzt werden. [IEE, 2008]

#### **Interoperabilität**

Das KNX-System besteht aus Sensoren, Aktoren, Verteiler-Einbaugeräten, Systemcontroller, Einzelraumregler und Systemkomponenten wie Stromversorgung, Linienkoppler, Bridges und dem Leitungsnetz für die Busgeräte sowie der Projektierungs- und Installationssoftware [Cremer et al., 2005]. Sensoren, Aktoren und weitere netzteilnehmende Objekte werden innerhalb eines KNX-Netzwerkes als eine Menge an Kommunikationsobjekten abgebildet. Beispielsweise ist eine Temperatur, die ein Sensor misst, der Zustand eines Schalters oder eine Stellgröße ein solches Kommunikationsobjekt. Über Gruppenadressen kommunizieren die einzelnen Kommunikationsobjekte untereinander. Ein Kommunikationsobjekt schickt z.B. seine Stellgröße an alle Aktoren und steuert eben nur die Objekte, deren Gruppenadresse mit dem des sendenden Kommunikationsobjektes übereinstimmen. Alle Kommunikationsobjekte innerhalb des Netzwerkes verwenden den gleichen Satz standardisierter Datenpunkttypen. Dadurch wird - verbunden mit einem hohen Installationsaufwand - eine Interoperabilität aller Geräte herstellerübergreifend (soweit in KNX-Allianz) gewährleistet. [Remmers et al., 2015][Mendes et al., 2015]

#### **IT-Sicherheit**

Im KNX-Standard wird ein Schema für einen Basis-Zugriffsschutz gegeben. Für jede der bis zu 255 verschiedenen Zugriffsebenen (mit verschiedenen großen Privilegien), kann ein 4 Byte langes Passwort spezifiziert werden. Das Schema für den Basis-Zugriffsschutz ist jedoch nur für den Konfigurations- bzw. Inbetriebnahmeprozess verfügbar. Während dem laufenden Systembetrieb ist der Datenverkehr ungeschützt. [Remmers et al., 2015][Mendes et al., 2015]

Zur Steigerung der IT-Sicherheit kann ein sogenannter KNX-Guard integriert werden. Der KNX-Guard ist in der Lage, den Gerätezugriff über physikalische Telegramme zu verhindern. Genutzte

KNX-Geräte können so gegen Manipulation geschützt werden. Für eine zuverlässige Absicherung muss ein solcher KNX-Guard in jedem Netzwerksegment installiert sein. [Remmers et al., 2015]

### **Eigenstromverbrauch**

Der Eigenstromverbrauch von KNX-Teilnehmern ist sehr gering im Vergleich zu Geräten, die andere Kommunikationsprotokolle nutzen. Jeder KNX-Teilnehmer hat einen Eigenbedarf von 150 *mWh* (Milliwatt) zur Versorgung des Mikroprozessors. Zusätzlich dürfen noch 50 mW vom Bus entnommen werden. [KNX, 2013] Bei normalem Betrieb führt das zu einem gemittelten Eigenstromverbrauch von ca. 2 *mWh/h* (Milliwattstunde pro Stunde). Bei der drahtlosen KNX-Kommunikation liegt der Stromverbrauch im Bereich von ca. 250  $\mu\text{Wh/h}$ .

### **4.1.2 BACnet**

Das Building Automation and Control Network (BACnet) ist ein international standardisiertes Kommunikationsprotokoll für die Gebäudeautomation und Regelungstechnik. Entwickelt wurde BACnet von der American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) [Park and Hong, 2009]. Das Hauptziel von BACnet ist es, eine Lösung für die Vernetzung von Gebäudeautomationssystemen unabhängig von der Größe und der Art zu bieten [Granzer et al., 2008]. BACnet ist im Vergleich zu anderen Kommunikationsprotokollen nicht an eine bestimmte Art der physikalischen Datenübertragung gebunden. [Granzer et al., 2008][Mendes et al., 2015]

### **Interoperabilität**

Innerhalb eines Netzwerkes erfolgt die Kommunikation über BACnet-Objekte. Jedes BACnet-Objekt kann als Server-Objekt von einem BACnet-Teilnehmer netzwerkweit zur Verfügung gestellt werden. Die Eigenschaften der Server-Objekte (Properties) können von anderen BACnet Geräten über definierte Dienste gelesen und/oder beschrieben werden. [Remmers et al., 2015]

Die Interoperabilität in BACnet-Systemen wird durch die definierten BACnet Interoperabilitätsbausteine (BIBBs) sichergestellt. BACnet-Einrichtungen werden diese Blöcke von einem oder mehreren Diensten als Profile zugeordnet. Zum Nachweis der Interoperabilität eines BACnet-Produktes muss der Hersteller mit einem Protocol Implementation Conformance Statement (PICS) die unterstützten BACnet-Dienste Kommunikationsmethoden und weitere Details festlegen. Durch native BACnet-Controller, die bereits eine Implementierung des BACnet-Protokolls enthalten, wird eine Systemkonfiguration oder ein -ausbau unabhängig vom GA-Hersteller ohne zusätzlichen Dienstleistungsaufwand und ohne Gateway ermöglicht. Eine Vielzahl an Herstellern bieten ihre Produkte zunehmend neben den proprietären Protokollen auch mit BACnet-Kommunikation an. [Remmers et al., 2015] [Cremer et al., 2005][Mendes et al., 2015]

### **IT-Sicherheit**

Durch sogenannte Addenda (Erweiterungen) wird der BACnet-Standard kontinuierlich erweitert. Gerade hinsichtlich IT-Sicherheit werden so immer die aktuellsten Sicherheitsmodelle integriert.

Das letzte große Addendum bezüglich der IT-Sicherheit definiert die Sicherheitsfunktionen Authentifizierung, Datenvertraulichkeit, Datenintegrität und Datenaktualität. Über eine Shared-Secret-Methode, d.h. die Verschlüsselung über Schlüsselpaare (Signatur- und Verschlüsselungsschlüssel) und die Spezifizierung von 6 Arten an Schlüsselpaaren ist eine hohe IT-Sicherheit gewährleistet. [Remmers et al., 2015][Peacock and Johnstone, 2014]

### **Eigenstromverbrauch**

Der Eigenstromverbrauch von BACnet Geräten im Netzwerk ist gerätespezifisch. Der Stromverbrauch eines typischen BACnet Gerätes liegt im Bereich zwischen  $0,1 \text{ mWh/h}$  und  $6 \text{ mWh/h}$  und liegt damit in der gleichen Größenordnung wie der von KNX-Geräten. [thermokon Sensortechnik, 2015]

### **4.1.3 LON**

Das Local Operating Network (LON) verwendet mit dem international standardisierten Kommunikationsprotokoll LonTalk. Innerhalb eines Netzwerkes werden die vom Hersteller bereits grundprogrammierten LON-Geräte per Binding mit anderen Geräten zur anlagenspezifischen Funktionserfüllung verbunden. Als physikalisches Übertragungsmedium stehen LON Zweidrahtleitungen, Ethernet, Powerline und Funk zur Verfügung. [Cremer et al., 2005][Mendes et al., 2015]

### **Interoperabilität**

Die Daten werden innerhalb des Netzwerkes als Netzwerkvariablen und Konfigurationsparameter weitergegeben. Die Interoperabilität wird durch die Verwendung von Standard-Netzwerkvariablen gewährleistet. Die Standard-Netzwerkvariablen werden für jedes Projekt individuell festgelegt und dokumentiert. Für die Interoperabilität müssen neben LonTalks noch weitere standardisierte Protokolle wie LonMark functional profiles im System konfiguriert werden. Damit gestaltet sich die Interoperabilität sehr projektindividuell. Viele Feldgeräte und Automationseinrichtungen von fast allen Herstellern haben eine LON-Schnittstelle integriert. [Cremer et al., 2005][Remmers et al., 2015][Mendes et al., 2015]

### **IT-Sicherheit**

LonTalks integriert für die IT-Sicherheit den Message Digest Algorithm 5 (DM5) [Peacock and Johnstone, 2014]. Der DM5 gilt bereits seit längerer Zeit als nicht mehr sicher [Remmers et al., 2015]. Die Verschlüsselung ist damit zwar besser als in einem KNX-Netzwerk ohne KNX-Guard, jedoch nicht ausreichend nach heutigem Stand der Technik [Peacock and Johnstone, 2014].

### **Eigenstromverbrauch**

Der Strombedarf von LON-Teilnehmern variiert von Gerät zu Gerät. Ein typischer Sensor/Aktor innerhalb eines LON-Netzwerkes hat einen Eigenstromverbrauch von rund  $2,5 \text{ mWh/h}$  und liegt

damit in dem Größenbereich der anderen (teil-)kabelgebundenen Kommunikationsprotokollen. [SysMik, 2013]

#### 4.1.4 ZigBee

Als Spezifikation der ZigBee-Allianz wurden ZigBee-Standards als Kommunikationsprotokoll konzipiert. Drahtlose Sensor-/Aktor-Netzwerke basierend auf ZigBee sind eine vergleichsweise junge Technologie mit großem Wachstumspotenzial [Mendes et al., 2015]. ZigBee setzt auf den von IEEE 802.15.4 spezifizierten Schichten für die Funkübertragung auf. [Remmers et al., 2015]

##### **Interoperabilität**

Ein ZigBee-Netzwerk baut sich aus drei Arten von Geräten auf. Einfache Geräte auf der Feldebene, wie simple Sensoren und Aktoren, unterstützen nur einen Teil des ZigBee-Protokolls. Diese Geräte melden sich bei einem ZigBee-Router an und bilden so eine Stern-Topologie im Netzwerk. Ein weiterer Gerätetyp sind die sogenannten Full Function Devices. Diese können neben der Funktion auf der Feldebene auch als Router auf der Backboneebene agieren und sich mit anderen Routern vernetzen. Die daraus resultierende Baum-Topologie bildet mit den Stern-Topologien zusammen ein vermaschtes Netzwerk. Ein Teilnehmer in einem ZigBee-Netzwerk agiert zusätzlich als Koordinator. Der Koordinator verwaltet und steuert das Netzwerk. Für den Fall, dass der Koordinator ausfällt, können andere Router so konfiguriert werden, dass diese dann als Koordinator dienen. Die Flexibilität der Netzwerktopologie und die große Anzahl an Herstellern und Geräten innerhalb der ZigBee-Allianz ermöglichen eine einfache Vernetzung mit einer großen Bandbreite an interoperablen Netzwerkteilnehmern. [Remmers et al., 2015][Mendes et al., 2015][Krauß and Konrad, 2014]

##### **IT-Sicherheit**

ZigBee bietet eine Vielzahl an Sicherheitsmechanismen. Für die Authentifizierung, den Datenspionage, die Datenaktualität und Datenvertraulichkeit existieren Verschlüsselungen im ZigBee-Protokoll. In jedem ZigBee-Knoten innerhalb eines Netzwerks gibt es einen Masterkey, der den Austausch der Linkkeys vertraulich hält. Zwei kommunizierende Knoten werden mit diesen Linkkeys nach dem Advanced Encryption Standard (AES) mit einer Schlüssellänge von 128 Bit verschlüsselt. Ein jedes Endgerät in dem Netzwerk erhält zusätzlich einen Network Key (AES, 128 bit) um wiederum mit den Knoten verbunden werden zu können. [Remmers et al., 2015][Krauß and Konrad, 2014]

##### **Eigenstromverbrauch**

ZigBee-Geräte haben einen geringen Stromverbrauch bei einer Sendereichweite von 10 Metern. Der geringe Stromverbrauch ermöglicht eine Energieautonomie der Geräte von 100 bis über 1000 Tagen [Mendes et al., 2015]. Ein ZigBee-Gerät, welches sich mit den in den vorangegangenen Kom-

munikationsprotokollen als Referenz genommenen Geräten für die Bestimmung des Energieverbrauchs vergleichen lässt, hat einen durchschnittlichen Energieverbrauch von rund  $200 \mu Wh/h$  [Krauße and Konrad, 2014].

### 4.1.5 Z-Wave

Z-Wave ist ein von Zensys und der Z-Wave Allianz entwickeltes funkbasiertes Protokoll für Automationstechnologien im Bereich Smart Home und Smart Building. Z-Wave zielt darauf ab, eine simple Möglichkeit zur kabellosen Steuerung automatisierter Geräte zu bieten. Z-Wave-Netzwerke zeichnen sich durch die zuverlässige Kurzübertragung von Informationen von der Steuereinheit an ein oder mehrere Geräte im Netzwerk mit minimalem Rauschen aus. Es gibt eine große Bandbreite an Z-Wave-Geräten von diversen Herstellern. [Yassein et al., 2016]

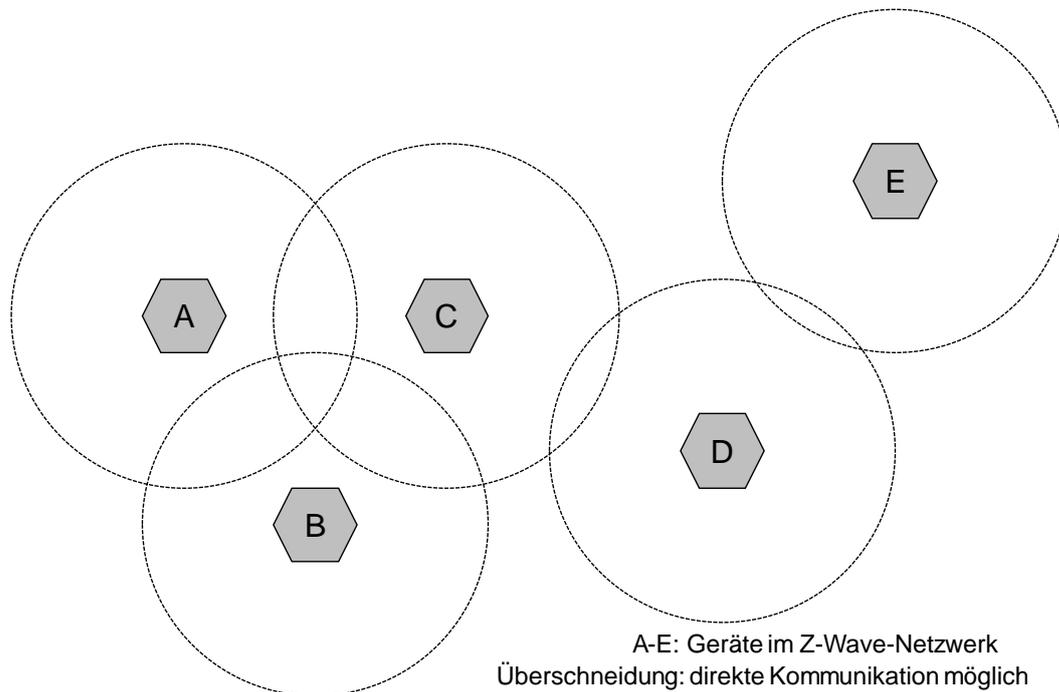
#### **Interoperabilität**

Innerhalb eines Z-Wave-Netzwerkes sind alle Komponenten in einer vermaschten Netzwerkkonfiguration zusammengefasst. Jede Einzelkomponente hat eine ungefähre Reichweite von 30 Metern. Damit kann jede Netzwerkkomponente mit denen in einem Umkreis von ca. 30 Metern kommunizieren. Dabei kann jedes Gerät auch als Verstärker für andere Geräte dienen. So kann ein Gerät über ein in der Nähe befindliches Gerät, welches dann als Vermittler dient, mit jedem Gerät in dessen Umkreis kommunizieren. So können die Distanzen, die überwunden werden können, entsprechend vergrößert werden. Ein Z-Wave-Netzwerk kann dabei aus bis zu 232 Geräten bestehen. Der Aufbau eines Z-Wave Netzwerkes ist in Abb.4.1 dargestellt. Der simple Aufbau eines vermaschten Z-Wave-Netzwerkes und die große Anzahl an Herstellern und Geräten innerhalb der Z-Wave Allianz ermöglichen eine einfache Netzwerkkonfiguration und -erweiterung mit einer großen Bandbreite an interoperablen Netzwerkteilnehmern. [Yassein et al., 2016][Remmers et al., 2015]

#### **IT-Sicherheit**

Das Z-Wave-Protokoll bietet Sicherheitsfunktionen in den Bereichen Datenintegrität, Datenaktualität, Authentifizierung und Verschlüsselung. Mithilfe eines 128 Bit Message Authentication Code (MAC) wird die Datenintegrität und Authentifizierung ermöglicht. Ein 64 Bit Nonce Code realisiert die Datenaktualität und die Verschlüsselung erfolgt mit dem als sicher geltenden Advanced Encryption Standard (siehe ZigBee). [Remmers et al., 2015]

Trotz des hohen Sicherheitsstandards von Z-Wave führte eine Schwäche bei der Implementierung des Schlüsselaustauschverfahrens 2013 dazu, dass es mit einem selbstgebauten Netzwerkcontroller möglich war, das Z-Wave-Netzwerk zu übernehmen. Damit ließ sich dann die Tür- und Fensterautomatik steuern. Laut Hersteller wurde die Sicherheitslücke umgehend geschlossen. [Fouladi and Ghanoun, 2013]



**Abbildung 4.1:** Vermaschtes Z-Wave-Netzwerk [In Anlehnung an [Remmers et al., 2015]]

### Eigenstromverbrauch

Z-Wave-Geräte verfügen über einen intelligenten Ruhemodus. Verbunden mit einem ohnehin geringen Stromverbrauch liegt der Eigenstromverbrauch von Z-Wave Systemen ungefähr bei dem von ZigBee-Geräten. [Mendes et al., 2015] [Wei et al., 2015]

### 4.1.6 EnOcean

EnOcean ist eine kabellose, ultra-low-power Kommunikationstechnologie welche durch Energy Harvesting mit Strom versorgt wird. EnOcean-Geräte kommen somit ohne Batterie aus. EnOcean wurde von der Firma EnOcean GmbH entwickelt und ist für Sensorsysteme im Smart-Home-Bereich spezialisiert. Eine Kombination von Kleinst-Energie-Konvertierern mit ultra-low-power Elektronik sowie der funkbasierten Kommunikation mit dem EnOcean-Protokoll ermöglicht den simplen Aufbau eines Netzwerks. [Remmers et al., 2015] [Li et al., 2014]

### Interoperabilität

Die Standard-EnOcean-Spezifikation arbeitet auf vier Schichten. Auf den ersten drei Schichten - der Bitübertragungsschicht (Physical Layer), der Sicherungsschicht (Data Link Layer) und der Vermittlungsschicht (Network Layer) - wird das international standardisierte Wireless Short-Packet Protokoll (WSP) verwendet [Ploenning et al., 2010]. Lediglich die Anwendungsschicht wird durch

die offene, unabhängige EnOcean Allianz standardisiert [Li et al., 2014]. Durch die Offenheit in den Kommunikationsprotokollen erlaubt EnOcean eine Gateway-Kommunikation mit anderen gängigen Automationssystemen [Mendes et al., 2015].

### **IT-Sicherheit**

Bis 2012 erhältliche Produkte verfügen über keine ausreichende IT-Sicherheit. Ein Schutz gegen Angreifer ist mit diesen Produkten nicht gegeben. Die 2012 erschienene Dolphin-Technologie führte zu einer Steigerung der IT-Sicherheit von EnOcean Systemen. Mit der Dolphin-Technologie kann die Datenaktualität über ein Zählersystem in den Datentelegrammen zwischen Sensor und Aktor sichergestellt werden. Zusätzlich erfolgt die Authentifizierung und Validierung über 32 Bit Message Authentication Codes (MAC). Die Verschlüsselung erfolgt wie bei ZigBee und Z-Wave über einen 128 Bit AES-Algorithmus. [Remmers et al., 2015][Li et al., 2014]

### **Eigenstromverbrauch**

Durch das Energy Harvesting - also die Energiebereitstellung über physikalische Effekte - und die hocheffiziente Übertragungstechnologie ist der Eigenstromverbrauch von EnOcean Systemen sehr gering. Die ultra-low-power Technologie ermöglicht trotz geringer Energiemenge, die für die Kommunikation aufgebracht werden muss, eine Sendereichweite von ca. 30 Metern. [Li et al., 2014]

#### **4.1.7 Homematic IP**

Homematic ist ein speziell für Smart Homes entwickeltes Hausautomationssystem. Entwickelt wurde Homematic von eq-3. Homematic-Systeme nutzen das ebenfalls von eq-3 entwickelte BidCoS-Kommunikationsprotokoll. Homematic bietet ein breites Angebot an Sensoren und Aktoren in den Bereichen Licht- bzw. Beschattungssteuerung, Heizungselemente, wetterabhängige Steuerungen sowie sicherheitstechnische Maßnahmen. [Praher and Lumetzberger, 2015]

### **Interoperabilität**

Das CCU2-System bildet die Zentrale innerhalb eines Homematic-Systems. Über ein Webinterface oder eine bereits vorhandene Smartphone-App können Daten abgerufen und Einstellungen für die Steuerungstechnik getroffen werden. Zusätzlich können weitere Homematic-Komponenten über die CCU2-Zentrale einfach hinzugefügt werden. Durch die Beschränkung auf das proprietäre Kommunikationsprotokoll BidCoS können jedoch nur die Homematic-Produkte ins Netz integriert werden. [Praher and Lumetzberger, 2015][van Venrooy, 2016]

Damit ist mit Homematic der einfache Aufbau eines Netzwerkes über das CCU2-System und die Interoperabilität zwischen den einzelnen Komponenten über das bidirektionale BidCoS-Protokoll gegeben. Homematic-Netzwerke bilden trotzdem innerhalb der Gebäudeautomation eines Smart-Homes meist eine Insellösung, da nicht alle intelligenten Services von Homematic-Systemen angeboten werden.

### **IT-Sicherheit**

Homematic verwendet zur Verschlüsselung ein AES-System (vgl. ZigBee). Der Homematic System-Sicherheitsschlüssel ist jedoch frei im Internet zugänglich. Bei der Systemkonfiguration sollte deshalb darauf geachtet werden, diesen neu zu konfigurieren. Das Setzen des Schlüssels ist im Web-Interface möglich. Durch die Verwendung einer XOR-Operation einer jeden Komponente vor Versendung der Daten ist der Inhalt der Nachrichten auch nicht davor geschützt, abgehört zu werden. [van Venrooy, 2016]

### **Eigenstromverbrauch**

Die Sendeleistung von Homematic-Komponenten ist, wie die anderen Funksysteme auch auf 25 *mW* begrenzt. Die Sendedauer wird ebenfalls auf 36 Sekunden pro Stunde limitiert. Damit liegen Homematic-Geräte bei einem durchschnittlichen Standby-Stromverbrauch in einem gemittelten Bereich von unter 250  $\mu Wh/h$ . [Praher and Lumetzberger, 2015] Genauere Werte bezüglich des Stromverbrauchs konnten auch nach intensiver Recherche nicht ermittelt werden.

### **4.1.8 WLAN (IEEE 802.11)**

Als WLAN wird hier die kabellose Kommunikation nach IEEE 802.11 bezeichnet und meint die Verwendung eben dieses Protokolls zum Aufbau eines Smart-Home- oder Smart-Building-Netzwerkes. Im Vergleich zu auf IEEE 802.15.4 basierenden Kommunikationsprotokollen (vg. ZigBee) ermöglicht WLAN eine wesentlich größere Übertragungsrate und Signalstärke. [Remmers et al., 2015] [Wang et al., 2015]

### **Interoperabilität**

Ein auf WLAN (IEEE 802.11) basierendes Netzwerk wird als Wifi-Based Wireless Sensor Network (WSN) bezeichnet. Über einfache elektronische Benennung der Komponenten (RFID) können Sensoren dem Netzwerk als Komponenten hinzugefügt werden. Im Vergleich zu den bisher betrachteten Kommunikationsprotokollen ist die Interoperabilität nicht auf bestimmte Systeme von bestimmten Herstellern beschränkt. Neben der großen Datenübertragung und Signalstärke ist die Robustheit der vermaschten Wifi-Based WSN sowie die Kosteneffizienz der Komponenten als Vorteil zu nennen. [Li et al., 2011]

### **IT-Sicherheit**

Ein auf IEEE 802.11 basierendes WSN ist kann wie jedes WLAN-Heimnetzwerk mit der als sicher geltenden WPA2-Verschlüsselung gesichert werden. Die Sicherheit von WPA2-verschlüsselten Netzwerken ist dabei abhängig vom verwendeten Schlüssel. [Remmers et al., 2015]

### **Eigenstromverbrauch**

Der größte Nachteil von IEEE 802.11-basierten Netzwerken ist der Stromverbrauch. Viele Geräte, die mit dem IEEE 802.11-Protokoll arbeiten, haben einen Eigenstromverbrauch, der im zweistelligen  $mWh/h$  Bereich liegt (oder sogar höher). Die Stromeinsparung durch verwendete intelligente Technologien kann dabei durch den Eigenstromverbrauch der Sensoren stark eingeschränkt werden. Auch eine Verschlechterung der Energieeffizienz ist möglich. Auf IEEE 802.11 basierende Netzwerke sollten daher nur bei einer benötigten hohen Datenübertragung, wie bspw. im Multimedia-Bereich verwendet werden. [Mendes et al., 2015]

### **4.1.9 Bluetooth LE**

Zur Datenübertragung auf kurze Distanz mit Funktechnik wurde in den 1990er Jahren der Industriestandard Bluetooth entwickelt (IEEE 802.15.1) [Remmers et al., 2015]. Der IEEE 802.15.1-Standard hat wie der IEEE 802.11-Standard das große Problem eines hohen Energieverbrauchs [Mendes et al., 2015]. Um Smart-Home-Netzwerke effizient mit Bluetooth aufzubauen, wurde das Kommunikationsprotokoll Bluetooth Low Energy (BLE) entwickelt [Collotta and Pau, 2015]. Bluetooth Low Energy wurde von der Bluetooth Special Interest Group als low-power Lösung für Steuerungs- und Monitoringprozesse entwickelt [Gomez et al., 2012].

### **Interoperabilität**

Ein BLE-Netzwerk baut sich nach einer Master-Slave-Topologie auf. Mehrere Zellen, die aus verschiedenen Feldgeräten aufgebaut sein können, sind über ein 2,4 GHz Band direkt mit einem sogenannten BLE Master verbunden. Zusätzlich können mobile Endgeräte (Smartphone, Tablet) mit dem Master zur Visualisierung und Einflussnahme auf die Regelung verbunden werden. Im Gegensatz zu Bluetooth Classic gibt es kein theoretisches Maximum an Slaves, die ein BLE Master haben kann. Die kurze Übertragungsdistanz sowie der eingeschränkte Datenaustausch führen jedoch dazu, dass die Anzahl an Slaves an einem BLE Master auch seine Grenzen hat. Die einzelnen Zellen agieren ähnlich wie ein Wireless Sensor Network (vgl. WLAN). Wie auch IEEE 802.11 (WLAN) kann BLE einfach mit Internetanwendungen oder anderen Systemen gekoppelt werden und die Interoperabilität ist nicht auf bestimmte Hersteller beschränkt. [Ramlee et al., 2012][Collotta and Pau, 2015]

### **IT-Sicherheit**

Bluetooth Low Energy bietet verschiedenen Sicherheitsfunktionen an. Auf zwei LE Security Modes können jeweils zwei bzw. drei Sicherheitslevel verwendet werden. Die Verschlüsselung erfolgt über eine 128-bit AES-Verschlüsselung (AES128). Die einzelnen Sicherheitslevel bestimmen die genutzte Sicherheitsfunktion beim Pairen von Komponenten im Netzwerk. Je nach Sicherheitslevel werden dabei Short-Time- oder Long-Time-Keys verwendet. Die IT-Sicherheit von solchen BLE-Netzwerken ist damit gewährleistet. [Gomez et al., 2012]

### Eigenstromverbrauch

Der Eigenstromverbrauch von Bluetooth Low Energy liegt weit unter dem von Bluetooth Classic und damit auch unter dem von IEEE 802.11. Auch im Vergleich mit ZigBee- und Z-Wave Geräten schneidet BLE sehr gut ab. Neue BLE-Module haben nur noch einen Eigenstromverbrauch von mehreren Mikrowatt. [Gomez et al., 2012]

## 4.2 Vergleich und Bewertung der Kommunikationsprotokolle

Die verschiedenen Kommunikationsprotokolle weisen unterschiedliche Stärken und Schwächen auf. Auf die intelligent vernetzten Systeme kann das verwendete Kommunikationsprotokoll innerhalb einer Automationstechnologie großen Einfluss haben. Bei manchen Protokollen handelt es sich um rein proprietäre Systeme, wobei andere nahezu grenzenlose Interoperabilität aufweisen. Der Installationsaufwand kann von einer aufwändigen, gebäudespezifischen Implementierung bis hin zu einem simplen Hinzufügen der Komponenten per App erfolgen. Auch hinsichtlich der IT-Sicherheit und dem Eigenstromverbrauch der Feldgeräte gibt es große Differenzen in den im Smart-Home- und Smart-Building-Bereich verwendeten Protokollen bzw. Technologien.

Im Folgenden wird daher eine gewichtete multikriterielle Entscheidungsanalyse aller zuvor vorgestellten Kommunikationsprotokolle durchgeführt. Die daraus resultierende quantitative Bewertung hinsichtlich aller wichtigen Kriterien kann als Grundlage für die Integration in die Berechnungsmethodik dienen. Zunächst werden Überlegungen angestellt, anhand welcher Kriterien die Analyse erfolgen soll:

**Interoperabilität** muss in erster Linie für die Bereitstellung eines gewünschten intelligenten Dienstes gewährleistet sein. Darüber hinaus ist Interoperabilität wichtig für die Erweiterung eines Dienstes, den Austausch von Sensorik und Aktorik oder die Verwendung eines Feldgeräts für die Bereitstellung eines anderen intelligenten Automationsdienstes. Die Anzahl an Produkten auf dem Markt sollte hier mitbetrachtet werden, da ein in sich proprietäres Protokoll mit einer Vielzahl an kompatiblen Geräten trotzdem über eine große Interoperabilität zu eben dieser Vielzahl an Geräten verfügt.

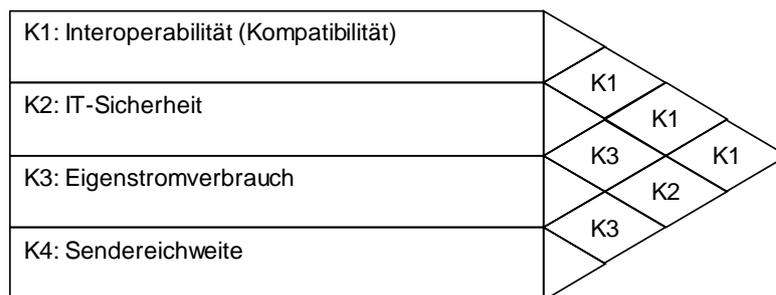
Die **IT-Sicherheit** der Kommunikationsprotokolle sollte im Gebäude immer gewährleistet sein. Insbesondere bei smarten Technologien, die Zugriff auf die Schließvorrichtungen von Tür- oder Fensteranlagen haben, spielt die IT-Sicherheit eine wichtige Rolle. Darüber hinaus sollten sämtliche Nutzerdaten vertraulich ausgetauscht werden können.

Intelligente Systeme werden vorrangig zur Effizienzsteigerung und Optimierung hinsichtlich des Energieverbrauchs eingesetzt. Verbraucht die Nutzung der mit dem intelligenten Service verbundenen Sensorik und Aktorik mehr Strom, respektive Energie, als eingespart wird, so ergibt sich kein positiver Effekt auf die Gebäudeintelligenz. Der **Eigenstromverbrauch** ist damit ein weiteres Bewertungskriterium.

Ein weiteres Kriterium bildet die **Sendereichweite**. Gerade für die Installation neuer Komponenten im System sollte die Reichweite der Kommunikationsteilnehmer betrachtet werden. Dabei ist die Netzwerktopologie ebenfalls zu beachten. In einem Netzwerk, in dem jede Komponente als Verstärker dient (vgl. Z-Wave), ist die Reichweite weniger relevant als in einem Netzwerk, in dessen Topologie eine direkte Verbindung zwischen Feldgerät und Zentralkomponente benötigt wird. Die Kriterien für die gewichtete multikriterielle Entscheidungsanalyse werden zu folgenden bestimmt:

- Interoperabilität (Kompatibilität)
- IT-Sicherheit
- Eigenstromverbrauch
- Sendereichweite

Die Präferenzmatrix der Kriterien für die Analyse ist in Abb. 4.2 dargestellt. Die aus der Präferenzmatrix resultierenden Gewichte sind in Tab. 4.1 dargestellt.



**Abbildung 4.2:** Präferenzmatrix der Kriterien für die Bewertung der Kommunikationsprotokolle

**Tabelle 4.1:** Resultierende Gewichte der Kriterien für die Bewertung der Kommunikationsprotokolle

Kriterium	Nennungen	Gewicht
K1: Interoperabilität (Kompatibilität)	3	0,40
K2: IT-Sicherheit	1	0,20
K3: Eigenstromverbrauch	2	0,30
K4: Sendereichweite	0	0,10

**Tabelle 4.2:** Bewertungsmatrix zu den Kommunikationsprotokollen

Kriterien	Gewichte	KNX		BACnet		LON	
		Erfüllungsgrad	Ergebnis	Erfüllungsgrad	Ergebnis	Erfüllungsgrad	Ergebnis
K1: Interoperabilität (Kompatibilität)	0,40	7	<b>2,8</b>	7	<b>2,8</b>	3	<b>1,2</b>
K2: IT-Sicherheit	0,20	7	<b>0,6</b>	7	<b>1,4</b>	3	<b>0,6</b>
K3: Eigenstromverbrauch	0,30	5	<b>1,5</b>	5	<b>1,5</b>	5	<b>1,5</b>
K4: Sendereichweite	0,10	9	<b>0,9</b>	9	<b>0,9</b>	9	<b>0,9</b>
<b>Summe</b>	<b>100 %</b>		<b>6,6</b>		<b>6,6</b>		<b>4,2</b>

Kriterien	Gewichte	ZigBee		Z-Wave		EnOcean	
		Erfüllungsgrad	Ergebnis	Erfüllungsgrad	Ergebnis	Erfüllungsgrad	Ergebnis
K1: Interoperabilität (Kompatibilität)	0,40	5	<b>2,0</b>	5	<b>2,0</b>	7	<b>2,8</b>
K2: IT-Sicherheit	0,20	9	<b>1,8</b>	5	<b>1,0</b>	7	<b>1,4</b>
K3: Eigenstromverbrauch	0,30	7	<b>2,1</b>	7	<b>2,1</b>	9	<b>2,7</b>
K4: Sendereichweite	0,10	5	<b>0,5</b>	9	<b>0,9</b>	7	<b>0,7</b>
<b>Summe</b>	<b>100 %</b>		<b>6,4</b>		<b>6,0</b>		<b>7,6</b>

Kriterien	Gewichte	Homematic		WLAN		BLE	
		Erfüllungsgrad	Ergebnis	Erfüllungsgrad	Ergebnis	Erfüllungsgrad	Ergebnis
K1: Interoperabilität (Kompatibilität)	0,40	3	<b>1,2</b>	7	<b>2,8</b>	5	<b>2,0</b>
K2: IT-Sicherheit	0,20	7	<b>1,4</b>	7	<b>1,4</b>	7	<b>1,4</b>
K3: Eigenstromverbrauch	0,30	7	<b>2,1</b>	1	<b>0,3</b>	9	<b>2,7</b>
K4: Sendereichweite	0,10	5	<b>0,5</b>	9	<b>0,9</b>	3	<b>0,3</b>
<b>Summe</b>	<b>100 %</b>		<b>5,2</b>		<b>5,4</b>		<b>6,4</b>

Mithilfe der Gewichte wird in Kombination mit den Erfüllungsgraden der Kommunikationsprotokolle hinsichtlich der einzelnen Kriterien in Tab. 4.2 die gewichtete Bewertungsmatrix gebildet um die Kommunikationsprotokolle zu vergleichen und quantitativ zu bewerten. Die Erfüllungsgrade (EG) sind auf einer Skala von 1 (nicht erfüllt) bis 9 (vollständig erfüllt) abgestuft und aus den vorangegangenen Überlegungen abgeleitet (4.1.1, 4.1.2, 4.1.3, 4.1.4, 4.1.5, 4.1.6, 4.1.7, 4.1.8, 4.1.9).

Die Ergebnisse der einzelnen Kommunikationsprotokolle, die aus der multikriteriellen gewichteten Entscheidungsanalyse resultieren, sind in der Lage, die Interoperabilität, IT-Sicherheit, den Eigenstromverbrauch und die Sendereichweite zu bewerten. Die aktuellen Ergebnisse befinden sich noch auf der Skala von eins bis neun (s.o.). Im Kapitel über die Integration in die Berechnungsmethodik (vgl. 4.5) werden diese sinnvoll skaliert und integriert. Zusammenfassend sind die Ergebnisse noch einmal dargestellt:

- KNX: 6,6
- BACnet: 6,6
- LON: 4,2
- ZigBee: 6,4
- Z-Wave: 6,0
- EnOcean: 7,6
- Homematic IP: 5,2
- WLAN: 5,4
- Bluetooth LE: 6,4

Bevor die Integration in die Berechnungsmethodik erfolgt, wird im nächsten Unterkapitel das Thema Datenpunktbezeichnungssysteme behandelt, um anschließend eine gemeinsame Integration beider Aspekte zu ermöglichen.

### 4.3 Datenpunktbezeichnungssysteme

Bei der Installation eines Netzwerks zur Gebäudeautomation mit einem der oben beschriebenen Kommunikationsprotokolle hat neben der Wahl des Protokolls ein weiterer Aspekt großen Einfluss auf die gebäudeübergreifende Interoperabilität von smarten Anwendungen. Insbesondere bei großen Automationssystemen in gewerblich genutzten Gebäuden (mit bspw. BACnet, BLE Sensoren, WSN etc.) haben die Bezeichnungen der Datenpunkte im Netzwerk großen Einfluss auf die Performance und Interoperabilität des Systems [Balaji et al., 2018]. Ein standardisiertes Bezeichnungssystem trägt dazu bei, die Performance zu erhöhen, den Aufwand für die Fehlererkennung und Erweiterung von Systemen zu vereinfachen und die Interoperabilität von Anwendungen gebäudeübergreifend zu steigern. Im Folgenden werden daher die wichtigsten bestehenden

Ansätze von Metadatenschemata und Bezeichnungssystemen vorgestellt. Neben den sehr fortschrittlichen Metadatenschemata wie Project Haystack und Brick, die in bestehenden Gebäuden aufgrund der Novität dieser Schemata erst selten zum Einsatz kommen, wird das häufig genutzte Bezeichnungssysteme nach VDI 3814 vorgestellt. Die Schemata werden analysiert und bewertet und mithilfe einer gewichteten multikriteriellen Entscheidungsanalyse verglichen und quantitativ bewertet.

### 4.3.1 Haystack

Das Project Haystack ist eine open-source Initiative, die das Ziel der Vereinheitlichung von Datenpunktbezeichnungen verfolgt. Project Haystack ist der State of the Art hinsichtlich der Standardisierung von Datenpunktbezeichnungen in Gebäudeautomationssystemen. [Balaji et al., 2018].

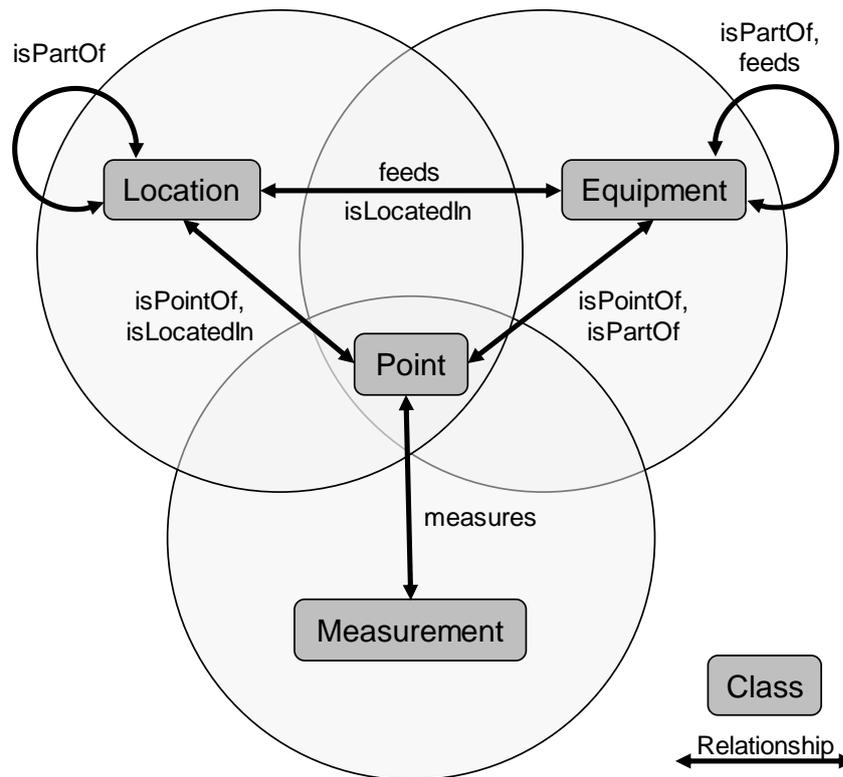
Project Haystack standardisiert Tag-Modelle, Datenformat und Datenstruktur im Netzwerk. Die verwendeten Tags bieten einen flexiblen Rahmen die Bezeichnungen von Datenpunkten zu vereinheitlichen. Mit Project Haystack wird ein Vokabular für die Kennzeichnung und Beschreibung der Metadaten von Gebäudeausrüstung, Wetter, Einheiten und Datentypen geschaffen. Die getagten Datenpunkte können über Referenzen miteinander verbunden werden, um Abhängigkeiten und Beziehungen darzustellen. Die Beziehungen könne jedoch nur innerhalb von Subsystemen einzelner Funktionsgruppen im Gebäudeautomationssystem dargestellt werden. Räumliche Beziehungen oder den Einfluss eines Gebäudeautomationssystems auf die verschiedenen Bereiche im Gebäude (Etagen, Räume, etc.) können mit dem Referenziermodell von Project Haystack nicht abgebildet werden. [Balaji et al., 2018][Bhattacharya et al., 2015]

### 4.3.2 Brick

Brick ist ein weiterer Ansatz zur Standardisierung der Bezeichnungen von Datenpunkten in Gebäudeautomationssystemen.

Das Brick-Schema bietet eine objektorientierte Klassenhierarchie zur Beschreibung der verschiedenen Teilsysteme der TGA im Gebäude und deren Komponenten, ein System zur Darstellung der Beziehungen und Verbindungen der einzelnen Komponenten zueinander sowie eine Methode zur Bildung von Funktionsgruppen zur Steigerung des Abstraktionsgrades und Vermeidung von Regelschleifen. [Balaji et al., 2016]

Aufbauend auf dem Tag-Konzept des Project Haystack wird im Brick-Schema eine Klassifizierungsothologie integriert, die eine sinnvolle Darstellung der Beziehungen ermöglicht. Die Klassenhierarchie der Objekte ermöglicht die eindeutige Zuordnung eines Datenpunktes in Lage, Anlage oder Anlagenkomponente und Messwert sowie die Beziehungen untereinander. [Balaji et al., 2018][Balaji et al., 2016]



**Abbildung 4.3:** Aufbau des Brick-Metadatenschema und den Beziehungen der Klassen [in Anlehnung an Balaji et al. [2016]]

Der Aufbau des Brick-Schema ist in Abb.4.3 dargestellt.

Ein Datenpunkt im Gebäude (Point) ist räumlich im Gebäude festgelegt (`isPointOf` oder `isLocatedIn` Location), ist einer Anlage oder Anlagenkomponente zugewiesen (`isPointOf` oder `isPartOf` Equipment) und beinhaltet einen bestimmten Messwert (`measures` Measurement). Räumliche Positionen können so auch untereinander in Beziehung gebracht werden oder Anlagenkomponenten in Beziehung zueinander gebraucht und räumlich positioniert werden. Damit bietet Brick im Vergleich zu Project Haystack zum Einen ein größeres Angebot an Tags (mit den klassenspezifischen Tagsets) und zum Anderen eine vollständigere Darstellbarkeit von für die Performance wichtigen Beziehungen.

#### 4.3.3 Industrial Foundation Classes (IFC)

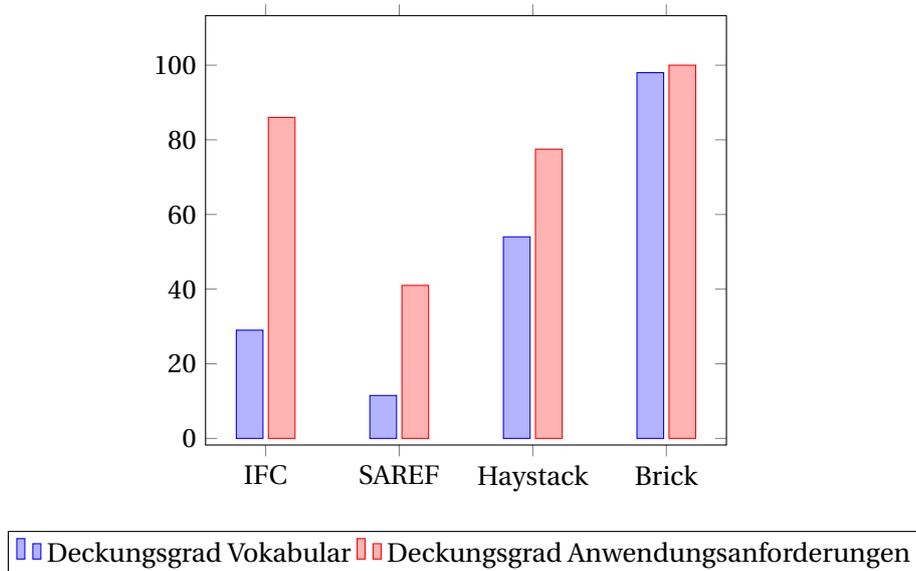
Das Industrial Foundation Classes (IFC) ist ein Standard, welcher im Building Information Modeling (BIM) zum Einsatz kommt. Die mechanischen Zusammenhänge können so neben den räumlichen Informationen in sehr hohem Detailgrad dargestellt werden. Die Funktionalitäten können in IFC jedoch nicht beschrieben werden. So ist es beispielsweise nicht möglich, zu bestimmen,

welche Temperatur ein Temperatursensor beschreibt. Die Erweiterung des Vokabulars ist darüber hinaus auch nicht möglich. [Balaji et al., 2018]

### 4.3.4 Smart Appliances References (SAREF)

Im Smart Appliances References (SAREF) Modell werden die Ontologien von Haystack und IFC mit Semantic Web verbunden um ein simples aber einheitliches Bezeichnungssystem für Datenpunkte im Gebäude zu entwickeln. Für SAREF wurden 20 Konzepte zur Semantik im Smart-Home- und Smart-Building-Bereich analysiert und in der SAREF-Ontologie verankert. Das SAREF-Modell ist dabei jedoch nicht in der Lage die gesamte Bandbreite an intelligent eingesetzten Technologien zu Beschreiben, da SAREF mehr auf die generischen Sensordaten abzielt als auf Gebäudeautomationstechnik in der raumspezifische Informationen benötigt werden. [Bhattacharya et al., 2015][Balaji et al., 2018]

Im Rahmen von [Bhattacharya et al., 2015] und [Balaji et al., 2018] wurden IFC, SAREF, Haystack und Brick anhand von 89 Applikationen und drei Gebäuden miteinander verglichen und bewertet. Die Bezeichnungssysteme für Datenpunkte im Gebäude wurden hinsichtlich Vollständigkeit der Metadaten, der Ausdruckfähigkeit von Beziehungen und der Flexibilität der Bezeichnungen bewertet. In Abb. 4.5 sind die Deckungsgrade des Vokabulars vom genutzten Tagging-Schema und der Anwendungsanforderungen dargestellt.

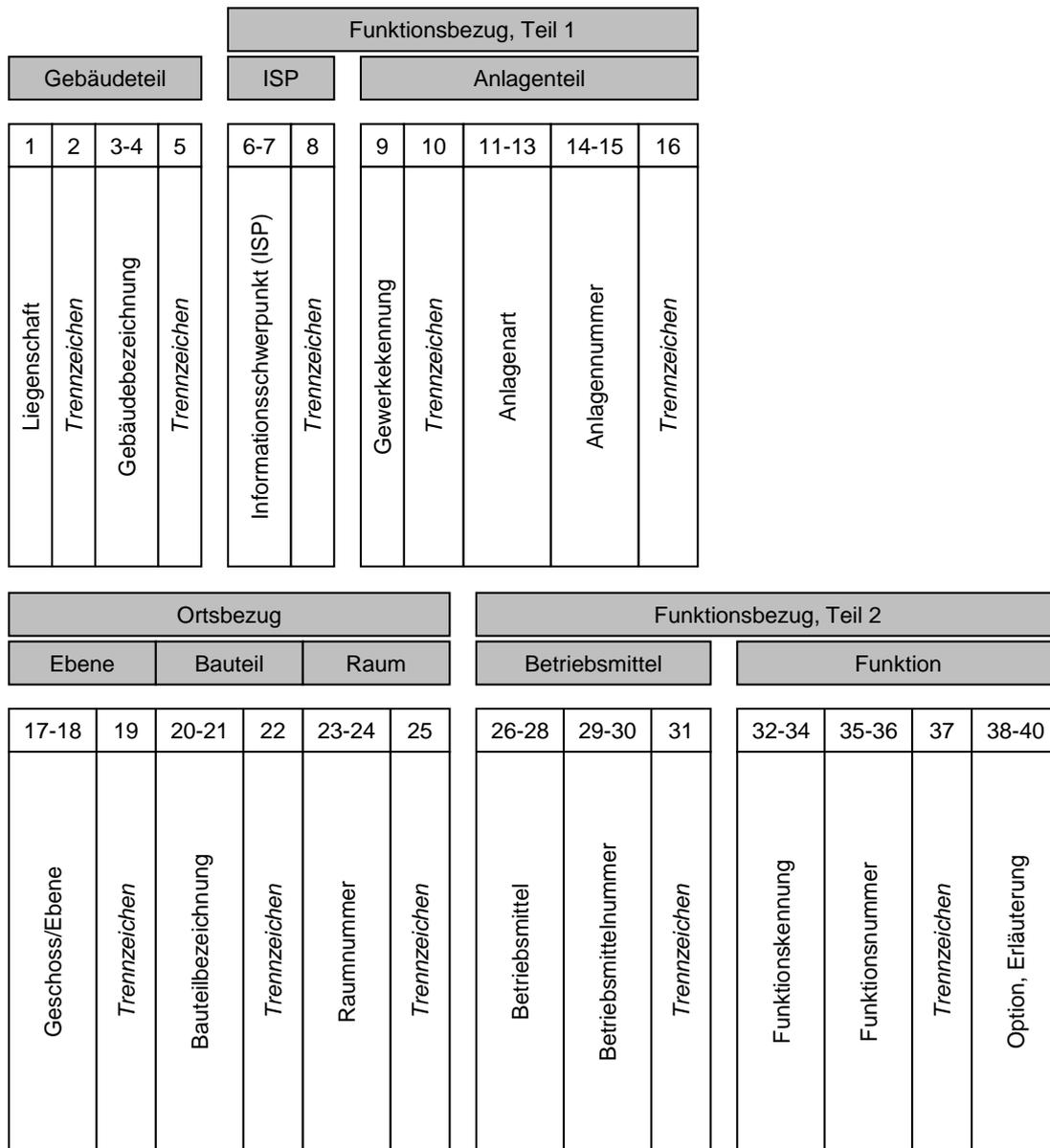


**Abbildung 4.4:** Vergleich der Metadatenschemata IFC, SAREF, Haystack und Brick [in Anlehnung an Bhattacharya et al. [2015] und Balaji et al. [2018]]

### 4.3.5 VDI 3814

Mit der VDI 3814 wird eine Richtlinienreihe für die Automation von Gebäuden gegeben. Blatt 4.1 gibt dabei Vorgaben für die Kennzeichnung und Dokumentation von Datenpunkten. Es werden darin Regeln aufgestellt, die die Erstellung eines einheitlichen Kennzeichnungssystems ermöglichen. Im Vergleich zu den bereits vorgestellten Schemata wird damit kein einzelnes standardisiertes Bezeichnungssystem gegeben. Im Rahmen der Richtlinie wird vielmehr das Grundgerüst für ein projektspezifisches Kennzeichnungssystem, das eine einheitliche Bezeichnung der Datenpunkte innerhalb aller Dokumente und Anlagenteile eines Gebäudes bzw. einer Liegenschaft sicherstellt. Einzelne Abschnitte des in Blöcken aufgebauten Kennzeichnungssystems können nach Bedarf entfallen oder zusammengefasst werden. Die Bestandteile des Kennzeichnungssystems nach VDI 3814 sind anhand eines Beispiels in Abb. 4.5 dargestellt. [Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2017]

Viele der Kennzeichnungsblöcke werden durch weitere Richtlinien oder Normen standardisiert (z.B. die Kennzeichnung der Gewerke durch die DIN 276-1). Damit kann durch ein Kennzeichnungssystem nach VDI 3814 auch eine gewisse gebäudeübergreifende Interoperabilität vorliegen, ist durch die Flexibilität der Kennzeichnungssysteme jedoch nicht gewährleistet.



**Abbildung 4.5:** Beispiel eines Kennzeichnungssystems nach VDI 3814 [in Anlehnung an Verein Deutscher Ingenieure e.V. [2017]]

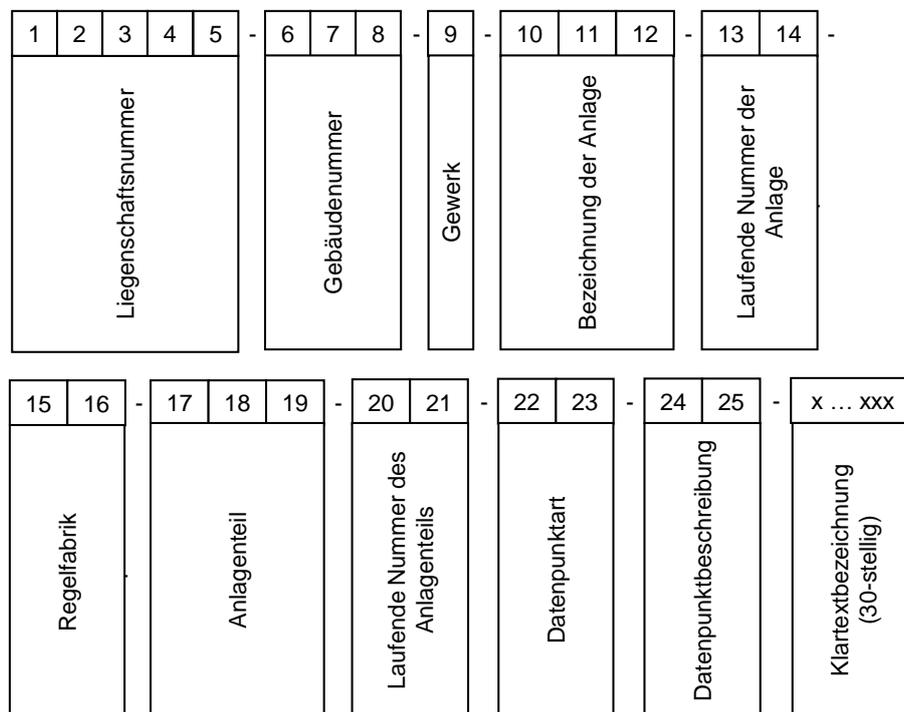
Ein Kennzeichnungssystem nach VDI 3814 ermöglicht die Bezeichnung von 21 Gewerken (z.B. Wärmeversorgungsanlage, Kälteanlage) mit 155 Anlagenbezeichnungen (z.B. Sonnenschutzanlage, Wärmepumpe) und 171 Geräte- und Komponentenbezeichnungen (z.B. Drehzahl Pumpe, Volumenstrom Abluft) mit 68 Funktionskennungen (z.B. Nachstellzeit, Sollwert Tag). Die Vollständigkeit der funktionsbezogenen Metadaten ist damit zu einem hohen Grad erfüllt. Auch der Ortsbezug ist über die Kennung von Raum, Bauteil und Ebene gewährleistet. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass der Ortsbezug nur in dem gegebenen Beispiel ausreichend vorhanden ist. Die orts-

bezogenen Kriterien müssen nicht immer in Kennzeichnungssystemen nach VDI 3814 vorhanden sein. Auch die Darstellbarkeit von Beziehungen ist nur indirekt gegeben. Ist ein Ortsbezug vorhanden, so kann eine eindeutige räumliche Zuordnung eines Datenpunktes erfolgen. Die Abbildung von Beziehungen einzelner Datenpunkte verschiedener Anlagenteile ist nicht möglich.

#### 4.3.6 Kennzeichnungssystem des Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen (AMEV)

Im Rahmen der Hinweise für Planung und Betrieb der Gebäudeautomation in öffentlichen Gebäuden (Gebäudeautomation 2005) des AMEV ist ein Kennzeichnungssystem beschrieben, welches die eindeutige Bezeichnung von Datenpunkten im Gebäude ermöglicht. Die Datenpunktbezeichnung (Datenpunktadresse genannt) setzt sich aus einer 25-stelligen Bezeichnung mit anschließendem maximal 30-stelligen Klartext zusammen. Das Kennzeichnungssystem ist in Abb. 4.6 dargestellt. [Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltung, 2005]

Die einzelnen Blöcke sind standardisiert und kombiniert mit der Liegenschaftsnummer und der Gebäude-Nummer ist somit eine gebäudeübergreifende Interoperabilität gewährleistet.



**Abbildung 4.6:** Kennzeichnungssystem nach AMEV [in Anlehnung an Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltung [2005]]

Das Kennzeichnungssystem ermöglicht die Bezeichnung von 11 Gewerken mit 82 Anlagenbe-

zeichnungen und 182 Bezeichnungen für Anlagenteile mit 14 Datenpunktarten und 99 Datenpunktbeschreibungen. Die funktionsbezogenen Metadaten decken damit einen großen Funktionsbereich ab. In dem vorliegenden Kennzeichnungssystem fehlen allerdings die gebäudeinternen ortsbezogenen Daten und eine Abbildung von Beziehungen ist auch nur bedingt möglich.

#### 4.4 Vergleich und Bewertung der Datenpunktbezeichnungssysteme

Die verschiedenen Bezeichnungssysteme für Datenpunkte im Gebäude weisen unterschiedliche Stärken und Schwächen auf. Auf die Performance und system- und gebäudeübergreifende Interoperabilität sowie die Fehlererkennung von intelligent vernetzten Systeme und Technologien kann das verwendete Bezeichnungsschema, respektive die Datenpunktbezeichnungen innerhalb einer Automationstechnologie großen Einfluss haben. Die Bezeichnungssysteme ermöglichen unterschiedliche Grade der Darstellbarkeiten von funktions- und ortsbezogenen Metadaten sowie von Beziehungen und Zusammenhängen unter Datenpunkten und Anlagen bzw. Anlagenkomponenten. Die verschiedenen Bezeichnungssysteme variieren auch in dem Grad der Standardisierung und der Flexibilität sowie Anwendbarkeit.

Im Folgenden wird daher eine gewichtete multikriterielle Entscheidungsanalyse der Bezeichnungssysteme respektive Datenpunktbezeichnungen durchgeführt. Die daraus resultierende quantitative Bewertung kann als Grundlage für die Integration in die Berechnungsmethodik des SRI-Ansatzes dienen. Zunächst werden sinnvolle Kriterien bestimmt, anhand welcher die Analyse erfolgen soll: Für eine großflächige Standardisierung der Datenpunktbezeichnungen und eine damit verbundene Steigerung der gebäudeübergreifenden Interoperabilität und Performance der Gebäudeautomationssystemen, sollte die Bandbreite des Vokabulars des Metadatenschemas möglichst groß sein. Die **Vollständigkeit der funktions- und ortsbezogenen Metadaten** vereinfacht die Zuordnung der Datenpunkte und ermöglicht den Einsatz des Bezeichnungssystems über das gesamte Spektrum an Gebäudetypen und Gebäudeautomationstechnologien.

Die **Darstellbarkeit von Beziehungen und Zusammenhängen** zwischen der Datenpunkte und Anlagen bzw. Anlagenkomponenten sowie Orten ist wichtig für die Darstellbarkeit einer großen Bandbreite an Anwendungsanforderungen respektive zum Erzielen eines hohen Deckungsgrades der Anwendungsanforderungen (vgl. 4.3).

Der **Grad der system- und gebäudeübergreifenden Standardisierung** der Bezeichnungssysteme hat großen Einfluss auf die system- und gebäudeübergreifende Interoperabilität und die Fehlererkennung.

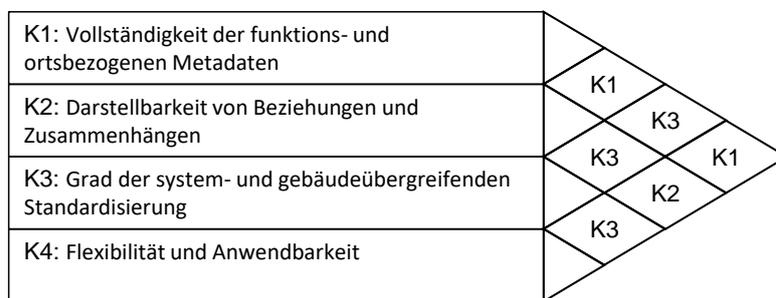
Dem gegenüber kann ein größerer Rahmen bei der Anwendung des Bezeichnungssystems wiederum die **Flexibilität und Anwendbarkeit** des Bezeichnungssystems erhöhen.

Die Kriterien für die gewichtete multikriterielle Entscheidungsanalyse werden zu folgenden bestimmt:

#### 4 Integration des Interoperabilitätsaspektes und der Datenpunktbezeichnungen

- Vollständigkeit der funktions- und ortsbezogenen Metadaten
- Darstellbarkeit von Beziehungen und Zusammenhängen
- Grad der system- und gebäudeübergreifenden Standardisierung
- Flexibilität und Anwendbarkeit

Die Präferenzmatrix der Kriterien für die Analyse ist in Abb. 4.7 dargestellt. Die aus der Präferenzmatrix resultierenden Gewichte sind in Tab. 4.3 dargestellt.



**Abbildung 4.7:** Präferenzmatrix der Kriterien für die Bewertung der Bezeichnungssysteme bzw. Datenpunktbezeichnungen

**Tabelle 4.3:** Resultierende Gewichte der Kriterien für die Bewertung der Bezeichnungssysteme bzw. Datenpunktbezeichnungen

Kriterium	Nennungen	Gewicht
K1: Vollständigkeit der funktions- und ortsbezogenen Metadaten	2	0,30
K2: Darstellbarkeit von Beziehungen und Zusammenhängen	1	0,20
K3: Grad der system- und gebäudeübergreifenden Standardisierung	3	0,40
K4: Flexibilität und Anwendbarkeit	0	0,10

Mithilfe der Gewichte wird in Kombination mit den Erfüllungsgraden der Bezeichnungssysteme hinsichtlich der einzelnen Kriterien in Tab. 4.4 die gewichtete Bewertungsmatrix gebildet um die Bezeichnungssysteme zu vergleichen und quantitativ zu bewerten. Die Erfüllungsgrade sind auf einer Skala von 1 (nicht erfüllt) bis 9 (vollständig erfüllt) abgestuft und aus den vorangegangenen Überlegungen abgeleitet (4.3.1, 4.3.2, 4.3.3, 4.3.4, 4.3.5, 4.3.6, Abb. 4.5).

**Tabelle 4.4:** Bewertungsmatrix zu den Kommunikationsprotokollen

Kriterien	Gewichte	Haystack		Brick		IFC	
		Erfüllungsgrad	Ergebnis	Erfüllungsgrad	Ergebnis	Erfüllungsgrad	Ergebnis
K1: Vollständigkeit der funktions- und ortsbezogenen Metadaten	0,30	5	<b>1,5</b>	9	<b>2,7</b>	3	<b>0,9</b>
K2: Darstellbarkeit von Beziehungen und Zusammenhängen	0,20	7	<b>1,4</b>	9	<b>1,8</b>	7	<b>1,4</b>
K3: Grad der system- und gebäudeübergreifenden Standardisierung	0,40	9	<b>3,6</b>	5	<b>2,0</b>	9	<b>3,6</b>
K4: Flexibilität und Anwendbarkeit	0,10	3	<b>0,3</b>	1	<b>0,1</b>	5	<b>0,5</b>
<b>Summe</b>	<b>100 %</b>		<b>6,8</b>		<b>6,6</b>		<b>6,4</b>

Kriterien	Gewichte	SAREF		System nach VDI 3814		AMEV	
		Erfüllungsgrad	Ergebnis	Erfüllungsgrad	Ergebnis	Erfüllungsgrad	Ergebnis
K1: Vollständigkeit der funktions- und ortsbezogenen Metadaten	0,30	3	<b>0,9</b>	9	<b>2,7</b>	5	<b>1,5</b>
K2: Darstellbarkeit von Beziehungen und Zusammenhängen	0,20	5	<b>1,0</b>	5	<b>1,0</b>	5	<b>1,0</b>
K3: Grad der system- und gebäudeübergreifenden Standardisierung	0,40	5	<b>2,0</b>	6	<b>2,4</b>	8	<b>3,2</b>
K4: Flexibilität und Anwendbarkeit	0,10	7	<b>0,7</b>	9	<b>0,9</b>	7	<b>0,7</b>
<b>Summe</b>	<b>100 %</b>		<b>4,6</b>		<b>7,2</b>		<b>6,4</b>

Kriterien	Gewichte	individuelles Bezeichnungssystem	
		Erfüllungsgrad	Ergebnis
K1: Vollständigkeit der funktions- und ortsbezogenen Metadaten	0,30	7	<b>2,1</b>
K2: Darstellbarkeit von Beziehungen und Zusammenhängen	0,20	5	<b>1,0</b>
K3: Grad der system- und gebäudeübergreifenden Standardisierung	0,40	1	<b>0,4</b>
K4: Flexibilität und Anwendbarkeit	0,10	9	<b>0,9</b>
<b>Summe</b>	<b>100 %</b>		<b>4,4</b>

Die Ergebnisse der einzelnen Bezeichnungssysteme, die aus der multikriteriellen gewichteten Entscheidungsanalyse resultieren, sind in der Lage, die system- und gebäudeübergreifende Interoperabilität, die Güte der Metadaten sowie die Flexibilität und Anwendbarkeit zu bewerten. Zu Beachten ist hierbei die die Differenz der Erfüllungsgrade von einem Bezeichnungssystem nach VDI 3814 und von AMEV hinsichtlich der Vollständigkeit der funktions- und ortsbezogenen Metadaten sowie bezüglich des Grades der system- und gebäudeübergreifenden Standardisierung, die auf der Tatsache beruht, dass insbesondere die ortsbezogenen Metadaten mit einem System nach VDI 3814 grundsätzlich in vollem Umfang möglich sind, in dem AMEV Bezeichnungssystem jedoch nicht integriert sind dadurch jedoch die Standardisierung durch diese Festlegung erhöht wird. Die aktuellen Ergebnisse befinden sich noch auf der Skala von eins bis neun (s.o.). Im Kapitel über die Integration in die Berechnungsmethodik (vgl. 4.5) werden diese sinnvoll skaliert und integriert. Zusammenfassend sind die Ergebnisse noch einmal dargestellt:

- Haystack: 6,8
- Brick: 6,6
- IFC: 6,4
- SAREF: 4,6

- Bezeichnungssystem nach VDI 3814: 7,2
- AMEV: 6,4
- individuelles Bezeichnungssystem: 4,4

Im nächsten Kapitel findet aufbauend auf den Ergebnissen die Integration in die Bewertungsmethodik statt.

## 4.5 Integration in Bewertungsmethodik

Die Integration des Interoperabilitätsaspektes inklusive der Bewertung der IT-Sicherheit und des Eigenstromverbrauchs der Kommunikationsprotokolle sowie der Bewertung der Datenpunktbezeichnungssysteme erfolgt anhand der vorangegangenen Analyse der Bewertungsmethodik (3.2.2) und der Bewertungen der Kommunikationsprotokolle (4.2) und Datenpunktbezeichnungen (4.4).

### 4.5.1 Interoperabilität

Die Bewertung der genutzten Kommunikationsprotokolle wird sinnvollerweise an der Stelle in der Methodik integriert, an der die Bewertung der internen sowie externen Kommunikation stattfindet. Das hat den Vorteil, dass auf der untersten Bewertungsebene die neue Berechnung integriert wird und damit eine serviceindividuelle Bewertung ermöglicht wird. Da eine smarte Anwendung durch die reine Funktionstüchtigkeit bereits eine Interoperabilität und Nutzung des gleichen Kommunikationsprotokolls voraussetzt (siehe Interoperabilität EU-Ansatz), ist eine Bewertung der Kommunikationsprotokolle der Applikation ausreichend.

Sinnvoll für die Bewertung der Interoperabilität wäre auch eine Betrachtung der Kombinationen der Kommunikationsprotokolle im Gebäude. So sollte die gleichzeitige Verwendung verschiedener Kommunikationsprotokolle, die nicht interoperabel sind, zu einer Verschlechterung der Bewertung führen (auch wenn diese für grundverschiedene Services eingesetzt werden). Da eine solche Bewertung jedoch den Bewertungsaufwand unverhältnismäßig steigern würde, wird von einer solchen Implementation an dieser Stelle abgesehen. Stattdessen werden die eingesetzten Kommunikationsprotokolle der Applikationen bewertet.

Ausgehend von der Formel 3.12 wird für die zugrunde liegenden Berechnungen der Applikationen ein Summand für den Punktwert des genutzten Kommunikationsprotokolls hinsichtlich Interoperabilität, IT-Sicherheit und Eigenstromverbrauch hinzugefügt:

$$S_{k,ij} = G_{k,ij} + Int_{k,ij} + Ext_{k,ij} + \mathbf{KP}_{k,ij} + \overrightarrow{Inf}_{vorh.,k,ij} \circ \overrightarrow{Inf}_{Punkte,k,ij} \quad (4.1)$$

$S_{k,ij}$ : Punktwert der Applikation  $k$  aus der Funktionsgruppe  $j$  hinsichtlich

	des Wirkungskriteriums $i$
$G_{k,ij}$ :	Grundwert für eine realisierte Applikation $k$
$Int_{k,ij}$ :	Punkte für eine vorhandene interne Kommunikation der Applikation $k$
$Ext_{k,ij}$ :	Punkte für eine vorhandene externe Kommunikation der Applikation $k$
$\overrightarrow{Inf_{vorh.,k,ij}}$ :	Eingabevektor der vorhandenen/nicht vorhandenen Infrastruktur für die Applikation $k$
$\overrightarrow{Inf_{Punkte,k,ij}}$ :	Bewertungsvektor der Kommunikationsinfrastruktur für die Applikation $k$
<b><math>KP_{k,ij}</math>:</b>	<b>Punkte für das genutzte Kommunikationsprotokoll der Applikation <math>k</math> aus der Funktionsgruppe <math>j</math> hinsichtlich des Wirkungskriteriums <math>i</math></b>

Die Punktwerte zur Bewertung der Kommunikationsinfrastruktur einer Applikation liegen im Größenbereich zwischen 0,5 und 2,0 mit einem kumulierten Maximum je Service zwischen 8,5 und 9,5. Die Bewertung des Kommunikationsprotokolls sollte sinnvollerweise eine stärkere Beachtung als die bisherige Bewertung der internen/externen Kommunikation (0,5 - 1,0) jedoch einen schwächeren Einfluss als die kumulierte Bewertung der Kommunikationsinfrastruktur (8,5 - 9,5) aufweisen. Die in 4.2 berechneten quantitativen Bewertungen der Kommunikationsprotokolle werden somit auf folgende Werte skaliert:

**Tabelle 4.5:** Punkte für die Bewertung der Kommunikationsprotokolle

Kommunikationsprotokoll	Punktewert
KNX	$KP_{KNX} = 3,3$
BACnet	$KP_{BACnet} = 3,3$
LON	$KP_{LON} = 2,1$
ZigBee	$KP_{ZigBee} = 3,2$
Z-Wave	$KP_{Z-Wave} = 3,0$
EnOcean	$KP_{EnOcean} = 3,8$
HomematicIP	$KP_{HomematicIP} = 2,6$
WLAN	$KP_{WLAN} = 2,7$
Bluetooth LE	$KP_{BLE} = 3,2$

#### 4.5.2 Datenpunktbezeichnung

Der Einfluss und die Bewertbarkeit der Datenpunktbezeichnungssysteme wurde insbesondere für Wohngebäude als zu aufwändig in Relation zur Wirkung festgestellt. Für große Automationssysteme in vorrangig Nichtwohngebäuden (aber auch vereinzelt Wohngebäuden) ist der Einfluss auf die Interoperabilität, Verringerung des Aufwandes für Fehlererkennung und Erweiterung sowie

Performancesteigerung relevant. Die Integration der Bewertung der Bezeichnungssysteme für Datenpunkte im Gebäude erfolgt daher sinnvollerweise nicht auf der unteren Bewertungsebene (vgl. 4.5.1) sondern im Top-Level der Methodik als eine Art "Bonuspunktregel". Da die Bezeichnungssysteme vorrangig bei Gesamtsystemen Relevanz finden, hat der Ansatz im Top-Level den Vorteil, dass eine Bewertung mit geringem Aufwand in den meisten Fällen ermöglicht wird.

Dazu wird der Funktionsgruppe "Gebäude allgemein" der Menge  $J$  an Funktionsgruppen eine applikationsähnliche Bewertungszeile hinzugefügt, die eine Bewertung eines genutzten Bezeichnungssystems für Datenpunkte im Gebäude über Bonuspunkte ermöglicht. Der positive Einfluss der Bezeichnungssysteme auf Interoperabilität und Performance erfordert sinnvollerweise eine Höhe der Bonuspunkte in der Größenordnung einer Applikation mit realisierten Optionen (ca. 25).

Durch Einbezug der Bewertungen aus Kapitel 4.4 ergeben sich durch Skalierung der Werte aus der multikriteriellen gewichteten Entscheidungsanalyse folgende Bonuspunkte für genutzte Bezeichnungssysteme bzw. die Datenpunktbezeichnungen:

**Tabelle 4.6:** Punkte für die Bewertung der Bezeichnungssysteme bzw. der Datenpunktbezeichnungen

Bezeichnungssystem	Punktwert		
Haystack	$BP_{Haystack}$	=	20,4
Brick	$BP_{Brick}$	=	25,8
IFC	$BP_{IFC}$	=	19,2
SAREF	$BP_{SAREF}$	=	13,8
Bezeichnungssystem nach VDI3814	$BP_{VDI}$	=	20,4
AMEV	$BP_{AMEV}$	=	19,8
individuelles Bezeichnungssystem	$BP_{individ}$	=	13,2

## 4.6 Fazit

Das von intelligenten Technologien genutzte Kommunikationsprotokoll hat großen Einfluss auf die Interoperabilität der Systeme. Das Spektrum reicht dabei von offenen hin zu gänzlich proprietären Technologien, mit starkem Einfluss auf die Performance eines Gebäudes. Auch bei der IT-Sicherheit und dem Stromverbrauch gibt es große Differenzen zwischen den in der intelligenten Gebäudetechnologie verwendeten Kommunikationsprotokollen.

Die gängigen Kommunikationsprotokolle im Smart-Home- und Smart-Building-Bereich wurden in diesem Kapitel hinsichtlich der Interoperabilität, der IT-Sicherheit und des Stromverbrauches analysiert, bewertet und verglichen. Eine multikriterielle gewichtete Entscheidungsanalyse liefert

quantitative Ergebnisse. Durch die in Kapitel 2 erfolgte Analyse der Bewertungsmethodik kann eine sinnvolle Integration der Bewertung der Kommunikationsprotokolle erfolgen. Die Bewertungsmethodik wird mithilfe der Ergebnisse der Analyse der Protokolle erweitert.

$$S_{k,ij} = G_{k,ij} + Int_{k,ij} + Ext_{k,ij} + \mathbf{KP}_{k,ij} + \overrightarrow{Inf}_{vorh.,k,ij} \circ \overrightarrow{Inf}_{Punkte,k,ij} \quad (4.2)$$

$S_{k,ij}$ :	Punktewert der Applikation $k$ aus der Funktionsgruppe $j$ hinsichtlich des Wirkungskriteriums $i$
$G_{k,ij}$ :	Grundwert für eine realisierte Applikation $k$
$Int_{k,ij}$ :	Punkte für eine vorhandene interne Kommunikation der Applikation $k$
$Ext_{k,ij}$ :	Punkte für eine vorhandene externe Kommunikation der Applikation $k$
$\overrightarrow{Inf}_{vorh.,k,ij}$ :	Eingabevektor der vorhandenen/nicht vorhandenen Infrastruktur für die Applikation $k$
$\overrightarrow{Inf}_{Punkte,k,ij}$ :	Bewertungsvektor der Kommunikationsinfrastruktur für die Applikation $k$
$\mathbf{KP}_{k,ij}$ :	<b>Punkte für das genutzte Kommunikationsprotokoll der Applikation <math>k</math> aus der Funktionsgruppe <math>j</math> hinsichtlich des Wirkungskriteriums <math>i</math></b>

Bei der Installation eines Netzwerks zur Gebäudeautomation mit einem der oben beschriebenen Kommunikationsprotokollen hat neben der Wahl des Protokolls ein weiterer Aspekt großen Einfluss auf die gebäudeübergreifende Interoperabilität von smarten Anwendungen. Insbesondere bei großen Automationssystemen in gewerblich genutzten Gebäuden (mit bspw. BACnet, BLE Sensoren, WSN etc.) haben die Metadaten der Datenpunkte im Netzwerk großen Einfluss auf die Performance und Interoperabilität des Systems. Ein standardisiertes Bezeichnungssystem für die Datenpunkte im Gebäude trägt dazu bei, die Performance zu erhöhen, den Aufwand für die Fehlererkennung und Erweiterung von Systemen zu vereinfachen und die Interoperabilität von Anwendungen gebäudeübergreifend zu steigern.

Gängige Bezeichnungssysteme für die Datenpunkte im Gebäude wurden analysiert und bewertet. Die quantitativen Ergebnisse einer multikriteriellen gewichteten Entscheidungsanalyse kombiniert mit der Analyse der Methodik in Kapitel 2 ermöglicht eine Integration der Bewertung der Bezeichnungssysteme durch eine Bonuspunkteregel auf der obersten Bewertungsebene. Eine Erweiterung der Menge  $J$  an Funktionsbereichen durch eine applikationsähnliche Bewertungszeile realisiert die Integration der Bewertung von Datenpunktbezeichnungen.

Damit wurde die Bewertung der Interoperabilität, der IT-Sicherheit und des Stromverbrauches durch die verwendeten Kommunikationsprotokolle ermöglicht sowie ein positiver Einfluss auf die Performance von genutzten standardisierten Datenpunktbezeichnungen in die Methodik eines SRI integriert. Die erweiterte Excel-Bewertungsmatrix kann im Anhang vollständig eingesehen werden.

Im nächsten Kapitel wird der erweiterte Smart Readiness Indicator abschließend im Rahmen von zwei Feldtests in der Praxis getestet.



## 5 Feldtests

Der um die Bewertung von Kommunikationsprotokollen und Metadatenschemata erweiterte Smart Readiness Indicator wird im Folgenden an zwei Beispielgebäuden getestet. Das erste Testgebäude ist das Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität in Berlin, das zweite Testgebäude das E.ON Energy Research Center der RWTH Aachen. Damit wird ein (Projekt-)Wohngebäude und ein Bürogebäude getestet. Die Datenerfassung erfolgte dabei aus einer Kombination von einer Einsichtnahme der Datenblätter, einer Begehung und einer Befragung eines mit der Gebäudetechnik vertrauten Angestellten. Damit wird eine Vergleichbarkeit mit den Feldtests, die im Rahmen der Grundlagenstudie der HEA sowie dem Gutachten der EU-Kommission durchgeführt wurden, ermöglicht.

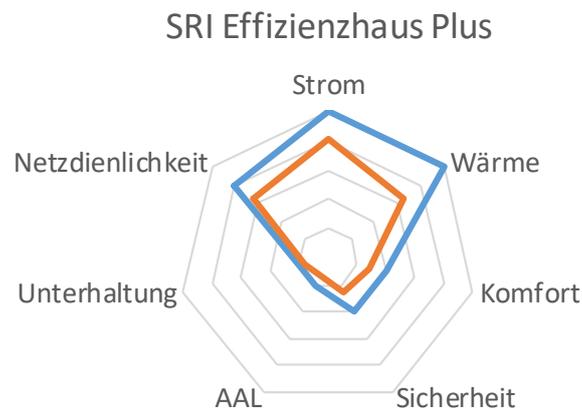
### 5.1 Feldtest 1: Effizienzhaus Plus Berlin

Das Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität in Berlin ist ein 2011 eröffnetes, 130  $m^2$  großes Testwohngebäude. Eine Photovoltaikanlage auf Dach und Fassadenfläche kombiniert mit Hochleistungsbatterien und einer Luft-Wasser-Wärmepumpe sowie eine optimierte Gebäudetechnik und isolierte Gebäudehülle sorgen dafür, dass im Gebäude mehr Energie produziert als verbraucht wird.

Die Gebäudeautomation basiert zum Großteil auf einem kabelgebunden KNX-Netzwerk. Über zwei Smart-Panels im Gebäude lässt sich ein großer Teil der Gebäudetechnik steuern. Ein Monitoring-System ermöglicht die Visualisierung aller Verbräuche. AAL-Systeme sind im Gebäude nicht vorgesehen.

Im Rahmen einer Begehung in Kombination mit einer Befragung eines Angestellten des Effizienzhaus Plus konnten innerhalb eines Zeitrahmens von ca. zwei Stunden alle für die Bewertung nötigen Informationen gesammelt werden.

Das Ergebnis des Feldtests ist in Abb.5.1 dargestellt. Bei dem Netzdiagramm ist zu beachten, dass die äußere Linie die unter den gewählten Gewichten für die Wirkungskriterien maximal möglichen Punkte anzeigt und die innere Linie das Ergebnis des SRI im getesteten Gebäude. Dabei wurden die gleichen Default-Gewichte wie in den vorangegangenen Feldtests der Grundlagenstudie der HEA zum SRI verwendet. Dabei wird ein Gesamt-SRI von 79,45 % erreicht. Die gesamte Bewertungsmatrix kann im Anhang eingesehen werden.



**Abbildung 5.1:** SRI vom Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität Berlin

## 5.2 Feldtest 2: E.ON Energy Research Center der RWTH Aachen

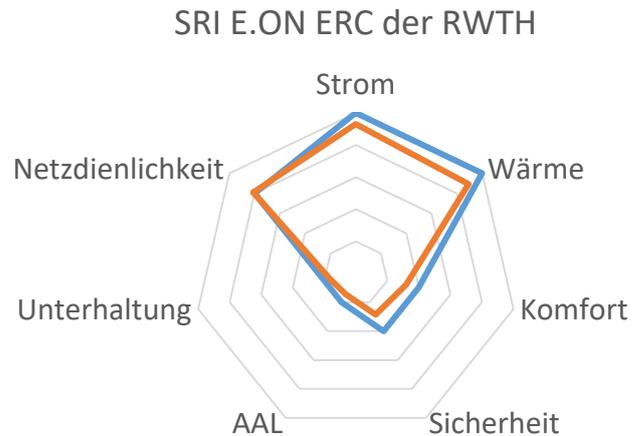
Das Hauptgebäude des E.ON Energy Research Center der RWTH Aachen ist ein Bürogebäude (Nichtwohngebäude) mit einer komplexen, intelligenten technischen Gebäudeausrüstung. Ein komplexes Netzwerk aus Sensoren, Aktoren und Monitoring-Systemen kombiniert mit einem Regelungs-Optimierungs-System ist in der Lage, anhand von verschiedenen Daten, wie Wetterdaten, Daten zum Innenraumkomfort und Energiedaten, eine intelligente Gebäudeautomatisierung zu realisieren und alle energietechnischen Prozesse zu optimieren.

Die Gebäudeautomation erfolgt über ein BACnet IP Kommunikationsprotokoll auf der Management-Ebene und ein BACnet MS/TP Protokoll auf der Automationsebene. Über eine OPC-Schnittstelle ist zusätzlich eine externe SQL-Datenbank eingebunden.

Durch eine Befragung eines Angestellten und einer Recherche der über die Gebäudetechnik veröffentlichten Informationen konnte innerhalb eines Zeitrahmens von ca. drei Stunden eine komplette Bestimmung des erweiterten SRI erfolgen.

Das Ergebnis des Feldtests ist in Abb.5.2 dargestellt. Dabei wurden die gleichen Default-Gewichte wie in den vorangegangenen Feldtests verwendet. Dabei wird ein Gesamt-SRI von 87,79 % erreicht. Die gesamte Bewertungsmatrix kann im Anhang eingesehen werden.

Eine Schwäche des SRI, die direkt bei der Bewertung auffällt, ist das Fehlen der Unterscheidung verschiedener Gebäudetypen. Eine Triage-Phase zur Bestimmung der relevanten Services erfolgt im HEA-Ansatz im Vergleich zum EU-Ansatz nicht. Der Funktionsbereich „Unterhaltung“ und „AAL“ besitzt im Nichtwohngebäude trivialerweise keine Relevanz und sollte somit geeignet gekennzeichnet oder weggelassen werden. Durch eine Art Triage-Phase vor der eigentlichen Bewertung oder eine gebäudetypspezifische Wahl der Gewichte der Wirkungskriterien kann diese Schwäche jedoch mit geringem Aufwand beseitigt werden. Auf das Optimierungspotenzial wird



**Abbildung 5.2:** SRI vom E.ON Energy Research Center der RWTH Aachen

im Ausblick noch einmal genauer eingegangen. Ebenso sollte die Bewertung der Kommunikationsinfrastruktur überarbeitet werden. Ein in höchster Funktionalität vorhandener Service, welcher jedoch keine Anbindung über PLC besitzt oder theoretisch möglich ist (da eine Anbindung bereits über eine andere Technologie vorliegt) sollte keine Punkte verlieren über den nicht vorhandenen Kommunikationsweg.

Aufgrund dieser noch zu optimierenden Faktoren fällt die Bewertung trotz fast aller realisierten Services auf höchster Funktionalitätsstufe etwas schlechter aus, als sie sollte.



## 6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel werden eine Übersicht über die zentralen Ergebnisse dieser Arbeit gegeben sowie im Rahmen eines Ausblicks Ansätze zur weiteren Optimierung des erweiterten Smart Ready Indicators aufgezeigt.

### 6.1 Zusammenfassung

Zur Berechnung eines Smart Readiness Indicators wird im Auftrag der EU-Kommission ein Verfahren entwickelt. Eine von der HEA und BDEW herausgegebene Grundlagenstudie zum Smart Readiness Indicator stellt einen die Erkenntnisse des EU-SRI berücksichtigenden Ansatz einer Interpretation des SRI vor, der den Grad der Technologiefähigkeit von Gebäuden ausweist. Internationale Zertifizierungssysteme bewerten zum Teil ebenfalls die Intelligenzfähigkeit von Gebäuden.

Der EU-Ansatz und der HEA-Ansatz zur Entwicklung eines Smart Readiness Indicators weisen eine Vielzahl an Gemeinsamkeiten auf. Beide Studien stützen sich auf ein ähnliches Konzept. Hinsichtlich der Methodik, der Art und des Umfangs der betrachteten intelligenten Gebäudeausstattung sowie insbesondere der Interoperabilität von smarten Technologien gibt es aber auch signifikante Unterschiede.

Kriterien, die für die Entwicklung eines SRI, insbesondere hinsichtlich der Integration von Interoperabilität, von Bedeutung sind, wurden herausgearbeitet und die Ansätze bewertet und miteinander verglichen. Eine gewichtete multikriterielle Entscheidungsanalyse führt basierend auf den erarbeiteten Kriterien zu dem Ergebnis, dass eine Erweiterung des HEA-Ansatzes zum SRI sinnvoll erscheint.

Das von intelligent vernetzten Technologien genutzte Kommunikationsprotokoll hat großen Einfluss auf die Interoperabilität der Systeme. Das Spektrum reicht dabei von offenen hin zu gänzlich proprietären Technologien, mit starkem Einfluss auf die Performance eines Gebäudes. Auch bei der IT-Sicherheit und dem Stromverbrauch gibt es große Differenzen zwischen den in der intelligenten Gebäudetechnologie verwendeten Kommunikationsprotokollen.

Die gängigen Kommunikationsprotokolle im Smart-Home- und Smart-Building-Bereich wurden hinsichtlich der Interoperabilität, der IT-Sicherheit und des Stromverbrauches analysiert, bewertet und verglichen. Eine multikriterielle gewichtete Entscheidungsanalyse liefert quantitative Ergebnisse. Durch die Analyse der Bewertungsmethodik konnte eine sinnvolle Integration der Be-

wertung der Kommunikationsprotokolle erfolgen. Die Bewertungsmethodik wurde mithilfe der Ergebnisse der Analyse der Protokolle erweitert.

Bei der Installation eines Netzwerks zur Gebäudeautomation mit einem der analysierten Kommunikationsprotokollen hat neben der Wahl des Protokolls ein weiterer Aspekt großen Einfluss auf die gebäudeübergreifende Interoperabilität von smarten Anwendungen. Insbesondere bei großen Automationssystemen in gewerblich genutzten Gebäuden (mit bspw. BACnet, BLE Sensoren, WSN etc.) haben die Metadaten der Datenpunkte im Netzwerk großen Einfluss auf die Performance und Interoperabilität des Systems. Ein standardisiertes Metadatenschema trägt dazu bei, die Performance zu erhöhen, den Aufwand für die Fehlererkennung und Erweiterung von Systemen zu vereinfachen und die Interoperabilität von Anwendungen gebäudeübergreifend zu steigern.

Gängige Bezeichnungssysteme für Datenpunkte im Gebäude wurden analysiert und bewertet. Die Ergebnisse kombiniert mit der Analyse der Methodik ermöglichten eine Integration der Bewertung der Metadatenschemata durch eine Bonuspunkteregel auf der obersten Bewertungsebene. Eine Erweiterung der Menge an Funktionsbereichen durch eine applikationsähnliche Bewertungszeile realisiert die Integration der Bewertung von Metadatenschemata (Anhang A).

Damit wurde die Bewertung der Interoperabilität, der IT-Sicherheit und des Stromverbrauches durch die verwendeten Kommunikationsprotokolle ermöglicht sowie ein positiver Einfluss auf die Performance von genutzten standardisierten Metadatenschemata in die Methodik eines SRI integriert.

Im Rahmen von zwei Feldtests an einem Wohn- und einem Nichtwohngebäude (Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität Berlin und E.ON Energy Research Center der RWTH Aachen) konnte die Anwendbarkeit der entwickelten Bewertungsmethodik nachgewiesen werden. Der Zeitaufwand für die Bewertung befindet sich dabei in einem angemessenen Rahmen. Durch den Feldtest konnten zudem einige Inkonsistenzen bei der praktischen Anwendung in der bestehenden Bewertungsmethodik des HEA-SRI-Ansatzes aufgezeigt werden.

### 6.2 Ausblick

Die aufgezeigten Inkonsistenzen bei der praktischen Anwendung des erweiterten HEA-Ansatzes zum SRI können in einem nächsten Schritt beseitigt werden. Durch die in dieser Arbeit gegebene Analyse der Bewertungsmethodik des EU-Ansatzes, können die herausgearbeiteten Vorteile des EU-Ansatzes dabei helfen, die Probleme des HEA-Ansatzes zu lösen und durch Kombination der Stärken der beiden Ansätze einen verbesserten Smart Readiness Indicator zu schaffen. Als ein Beispiel kann hier die Triage-Phase in der praktischen Anwendung des EU-Ansatzes genannt werden. Eine einfache Überführung dieser in den HEA-Ansatz könnte die Probleme bei der Bewertung verschiedener Gebäudetypen lösen. Zudem sollte die sinnvolle Festlegung der Punktwerte und Gewichte in der Bewertungsmethodik erfolgen. Die Arbeitsgruppe B des zweiten Gutachtens für den

EU-Ansatz beschäftigt sich aktuell mit diesem Thema. Die Ergebnisse sollten in dem erweiterten Ansatz Verwendung finden. Ebenso sollte aufbauend auf den Ergebnissen dieser Arbeit der Dialog zu der genannten Arbeitsgruppe, die sich mit der Bewertungsmethodik beschäftigt, gesucht werden, um auch dort die Integration der Interoperabilitätsaspekte und Metadatenschemata anzuregen.



## Literaturverzeichnis

*6th IEEE International Conference on Industrial Informatics, 2008: INDIN 2008 ; Daejeon, South Korea, 13-16 July 2008*, Piscataway, NJ, 2008. IEEE Service Center. ISBN 978-1-4244-2170-1.

Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltung. Hinweise für planung, ausführung und betrieb der gebäudeautomation in öffentlichen gebäuden (gebäudeautomation 2005), 2005.

Bharathan Balaji, Yuvraj Agarwal, Mario Berges, David Culler, Rajesh Gupta, Mikkel Baun Kjærgaard, Mani Srivastava, Kamin Whitehouse, Arka Bhattacharya, Gabe Fierro, Jingkun Gao, Joshua Gluck, Dezhi Hong, Aslak Johansen, Jason Koh, and Joern Ploennigs. Portable queries using the brick schema for building applications. In Unknown, editor, *Proceedings of the 3rd ACM International Conference on Systems for Energy-Efficient Built Environments - BuildSys '16*, pages 219–220, New York, New York, USA, 2016. ACM Press. ISBN 9781450342643. doi: 10.1145/2993422.2996411.

Bharathan Balaji, Arka Bhattacharya, Gabriel Fierro, Jingkun Gao, Joshua Gluck, Dezhi Hong, Aslak Johansen, Jason Koh, Joern Ploennigs, Yuvraj Agarwal, Mario Bergés, David Culler, Rajesh K. Gupta, Mikkel Baun Kjærgaard, Mani Srivastava, and Kamin Whitehouse. Brick : Metadata schema for portable smart building applications. *Applied Energy*, 226:1273–1292, 2018. ISSN 03062619. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.02.091.

Arka Bhattacharya, Joern Ploennigs, and David Culler. Short paper: Analyzing metadata schemas for buildings. In David Culler, Yuvraj Agarwal, and Rahul Mangharam, editors, *Proceedings of the 2nd ACM International Conference on Embedded Systems for Energy-Efficient Built Environments - BuildSys '15*, pages 33–34, New York, New York, USA, 2015. ACM Press. ISBN 9781450339810. doi: 10.1145/2821650.2821669.

A. H. Buckman, M. Mayfield, and Stephen B.M. Beck. What is a smart building? *Smart and Sustainable Built Environment*, 3(2):92–109, 2014. ISSN 2046-6099. doi: 10.1108/SASBE-01-2014-0003.

Mario Collotta and Giovanni Pau. A solution based on bluetooth low energy for smart home energy management. *Energies*, 8(10):11916–11938, 2015. doi: 10.3390/en81011916.

Cremer, Funk, Fries, Gerhard, Hall, Hardkop, Kroll, Matysiak, Person, Schreiber, Speelmanns, and Zint. Hinweise für planung, ausführung und betrieb der gebäudeautomation in öffentlichen gebäuden, 2005.

- L. C. De Silva, C. Morikawa, and I. M. Petra. State of the art of smart homes. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(7):1313–1321, 2012.
- Deutsches Institut für Normung e.V. Gebäudeautomationssysteme - teil 2: Hardware, 2016.
- Deutsches Institut für Normung e.V. Energetische bewertung von gebäuden - berechnung des nutz-, end- und primärenergiebedarfs für heizung, kühlung, lüftung, trinkwasser und beleuchtung - teil 11: Gebäudeautomation, 2018.
- Europäisches Parlament und Rat. Richtlinie (eu) 2018/ des europäischen parlaments und des rates vom 30. mai 2018 zur änderung der richtlinie 2010/31/eu über die gesamtenergieeffizienz von gebäuden und der richtlinie 2012/27/eu über energieeffizienz, 2018.
- Behrang Fouladi and Sahand Ghanoun. Security evaluation of the z-wave wireless protocol, 2013.
- Carles Gomez and Josep Paradells. Wireless home automation networks: A survey of architectures and technologies. *IEEE Communications Magazine*, 48(6):92–101, 2010. ISSN 0163-6804. doi: 10.1109/MCOM.2010.5473869.
- Carles Gomez, Joaquim Oller, and Josep Paradells. Overview and evaluation of bluetooth low energy: An emerging low-power wireless technology. *Sensors*, 12(9):11734–11753, 2012. doi: 10.3390/s120911734.
- Wolfgang Granzer, Wolfgang Kastner, and Christian Reinisch. Gateway-free integration of bac-net and knx using multi-protocol devices. In *6th IEEE International Conference on Industrial Informatics, 2008*, pages 973–978, Piscataway, NJ, 2008. IEEE Service Center. ISBN 978-1-4244-2170-1. doi: 10.1109/INDIN.2008.4618243.
- Viktor Grinewitschus, David Reiners, and Andre Beblek. Grundlagenstudie: Smart readiness indicator (sri), 2019.
- KNX. Grundlagenwissen zum knx standard, 2013.
- Markus Krauß and Rainer Konrad. *Drahtlose ZigBee-Netzwerke*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2014. ISBN 978-3-658-05820-3. doi: 10.1007/978-3-658-05821-0.
- Jarek Kurnitski and Jaap Hogeling. Smart readiness indicator (sri) for buildings not so smart as expexted. *REHVA Journal*, (8):6–9, 2018.
- Li Li, Hu Xiaoguang, Chen Ke, and He Ketai. The applications of wifi-based wireless sensor network in internet of things and smart grid. In *2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, pages 789–793. IEEE, 2011. ISBN 978-1-4244-8754-7. doi: 10.1109/ICIEA.2011.5975693.
- Xiaohui Li, Guang Chen, Bing Zhao, and Xiaobing Liang. A kind of intelligent lighting control system using the enocean network. In *2014 International Conference on Computer, Information and Telecommunication Systems (CITS)*, pages 1–5. IEEE, 2014. ISBN 978-1-4799-4383-8. doi: 10.1109/CITS.2014.6878964.

- Zoltan Magyar. The possibilities for labelling of smart buildings, 2018.
- Tiago Mendes, Radu Godina, Eduardo Rodrigues, João Matias, and João Catalão. Smart home communication technologies and applications: Wireless protocol assessment for home area network resources. *Energies*, 8(7):7279–7311, 2015. doi: 10.3390/en8077279.
- Philippe Moseley. Eu support for innovation and market uptake in smart buildings under the horizon 2020 framework programme. *Buildings*, 7(4):105–129, 2017. doi: 10.3390/buildings7040105.
- Birgit Müller, Olaf Zeidler, Maxim Geier, André Badura, Wolfram Müller, Kathrin Richter-Kowalewski, and Andreas Ulbrich. Leitfaden zur gebäudeautomation in öffentlichen gebäuden zur energetischen optimierung und effizienzsteigerung gebäudetechnischer anlagen, 2018.
- Nesen Sürmeli-Anac and Andreas H. Hermelink. The smart readiness indicator: A potential, forward-looking energy performance certificate complement?, 2018.
- Tae-Jin Park and Seung-Ho Hong. Experimental case study of a bacnet-based lighting control system. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 6(2):322–333, 2009. ISSN 1545-5955. doi: 10.1109/TASE.2008.2008148.
- Matthew Peacock and Michael N. Johnstone. An analysis of security issues in building automation systems, 2014.
- Joern Ploenning, Uwe Rysse, and Klaus Kabitzsch. Performance analysis of the enocean wireless sensor network protocol. In *2010 IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2010)*, Piscataway, NJ, 2010. IEEE. ISBN 9781424468508.
- Mathias Praher and Hannes Lumetzberger. *Integration von Sensoren in ein bestehendes Netzwerk für für Hausautomation*. PhD thesis, Höhere technische Bundeslehranstalt Perg, Perg, 2015.
- R. A. Ramlee, D. H. Z. Tang, and M. M. Ismail. Smart home system for disabled people via wireless bluetooth. In *2012 International Conference on System Engineering and Technology (ICSET)*, pages 1–4. IEEE, 2012. ISBN 978-1-4673-2376-5. doi: 10.1109/ICSEngT.2012.6339347.
- Sascha Remmers, Falk Gaentzsch, and Norbert Pohlmann. *Hausautomatisierung. IT-Sicherheit im Haus der Zukunft: Dozentenhandbuch*. Handwerkskammer Rheinhessen, Mainz a Rhein, 2015. ISBN 9783944916125.
- Thorsten Schneiders, Tobias Rehm, and Lukas Hilger. Forschungsstudie smarthome rösrath, 2018.
- Hartmut Strese, Uwe Seidel, Thorsten Knappe, and Alfons Botthof. Smart home in deutschland: Untersuchungen im rahmen der wissenschaftlichen begleitung zum programm next generation media (ngm) des bundesministeriums für wirtschaft und technologie, 2010.
- SysMik. Lon compact controllers: Lcc-410 lcc-410m, 2013.
- thermokon Sensortechnik. Stc bacnet ip, 2015.

- United States Green Building Council. Leed v4 for building design and construction, 2019.
- Bastian van Venrooy. *Sicherheit in der Heimautomatisierung*. PhD thesis, Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Bonn, 2016.
- S. Verbeke, P. Waide, K. Bettgenhäuser, M. Uslar, and Bogaert S. et al. Support for setting up a smart readiness indicator for buildings and related impact assessment - final report, 2018.
- Verein Deutscher Ingenieure e.V. Gebäudeautomation (ga) methoden und arbeitsmittel für planung, ausführung und Übergabe - kennzeichnung, adressierung und listen, 2017.
- Maurice Wald. Experteninterview zum smart readiness indicator mit prof. dr.-ing. viktor grinewitschus, 2018.
- Lei Wang, Dunlu Peng, and Ting Zhang. Design of smart home system based on wifi smart plug. *International Journal of Smart Home*, 9(6):173–182, 2015. ISSN 19754094. doi: 10.14257/ijsh.2015.9.6.19.
- Ching-Chuan Wei, Yan-Ming Chen, Chao-Chieh Chang, and Chi-Han Yu. The implementation of smart electronic locking system based on z-wave and internet. In *2015 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, pages 2015–2017. IEEE, 2015. ISBN 978-1-4799-8697-2. doi: 10.1109/SMC.2015.351.
- Muneer Bani Yassein, Wail Mardini, and Ashwaq Khalil. Smart homes automation using z-wave protocol. In *2016 International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS)*, pages 1–6. IEEE, 2016. ISBN 978-1-5090-5579-1. doi: 10.1109/ICEMIS.2016.7745306.
- J. Zuo and Z. Y. Zhao. Green building research - current status and future agenda: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30:271–281, 2014.
- ZVEI. Smart home und smart building, 2019. URL <https://www.zvei.org/themen/gebaeude/smart-home-und-smart-building/>.

# Anhang



**A Erweiterte Excel-Bewertungstabelle mit den Ergebnissen aus  
Feldtest 1 (Effizienzhaus Plus)**

				Anforderungen Sensorik/Aktorik																				
				1: Applikation / 2: Option /	max. Punkte (Applikation + Kommunikation)	Punktueller Bewertung der Applikation	Präsenzsensor (Applikation + Kommunikation)	Außentemperatursensor	motorisch betreibbare Stellantriebe	Zeitschaltuhr mit Kommunikation zum Aktor	Raumtemperatursensor	Fenster-/Türkontakt	Regelbare Pumpe	Differenzdruckmessung	frequenzgesteuerter Lüfter	CO2-Sensor	Feuchtigkeitssensor (Innen und Außen)	frequenzgesteuerter Verdichter	Temperaturfühler TWW	elektronisch betreibbares Mischventil	Strahlungssensor	Tageslichtsensor	motorisch betriebener Antrieb	
<b>Heizung</b>																								
1		<b>Wärmeübergabe: Regelung der Raumtemperatur</b>																						
	1.1	Keine oder manuelle Regelung	1	0	0																			
	1.2	Automatische örtliche Regelung	1	17,3	5			x		x														
	1.2a	Regelung über Präsenzerfassung	2	4	4	x																		
	1.2b	Regelung über Zeitprogramm	2	4	4				x															
	1.2c	Absenktemperatur bei Fensteröffnung	2	4	4						x													
2		<b>Wärmeerzeugung: Regelung der Vorlauftemperatur</b>																						
	2.1	Keine Regelung, konstante Vorlauftemperatur	1	0	0																			
	2.2	Witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung	1	15,3	3		x																	
	2.3	Bedarfsgeführte Vorlauftemperaturregelung (in Abhängigkeit der Raumtemperaturen)	1	19,3	7																			
3		<b>Wärmeverteilung: Regelung der Umwälzpumpen</b>																						
	3.1	Keine Regelung, feste Drehzahl	1	0	0																			
	3.2	Einstellung verschiedener Drehzahlstufen	1	15,3	3							x												
	3.3	Stufenlose Drehzahlregelung	1	19,3	7							x	x											











Anforderungen Kommunikation										Kommunikationsprotokoll										Bewertung vorhandene Infrastruktur																	
Schaltaktor im Verteilerschrank	Unterputzsteckdosenschaltaktor	Leistungsmesser pro Stromkreis / Raum in Verteilerschrank	Leistungsmesser pro Stromverbraucher	Schaltbare Zwischenstecker	Rauch-, Gas-, Wassersensor	Kamera	Fensterbruchsensor	elektronisches Türschloss	Kommunikationsschnittstelle intern	offene Kommunikationsschnittstelle extern	Kommunikation zu Sens./Akt.n:- Funk möglich?	Kommunikation zu Sens./Akt.n:- PLC möglich?	Kommunikation zu Sens./Akt.n:- Leerrohr vorhanden?	Kommunikation zu Sens./Akt.n:- LAN möglich?	Netzspannungsversorgung Sensor/Aktor notwendig?	Breitbandinternet	Wärmemengenzähler, Impulskontakt	moderne Messeinrichtung gem § 2 MsbG	Smart Meter Gateway § 2 MsbG	KNX	BACnet	LON	ZigBee	Z-Wave	EnOcean	HomematicIP	WLAN	Bluetooth LE	(Welche) Technik vorhanden?	Kommunikationsprotokoll	Kommunikation zu Sens./Akt.n:- Funk möglich?	Kommunikation zu Sens./Akt.n:- PLC möglich?	Kommunikation zu Sens./Akt.n:- Leerrohr vorhanden?	Kommunikation zu Sens./Akt.n:- LAN möglich?	verkabelte Stromversorgung		
									0,5	1,0	2,0	2,0	1,0	2,0		0				3,3	3,3	2,1	3,2	3	3,8	2,6	2,7	3,2	0	3	6	1	1	0	1		
																													1								
									0,5	1,0	2,0	2,0	1,0	2,0						3,3	3,3	2,1	3,2	3	3,8	2,6	2,7	3,2	0	0	1	1	0	1			
									0,5	1,0	2,0	2,0	1,0	2,0						3,3	3,3	2,1	3,2	3	3,8	2,6	2,7	3,2	0	0	1	1	0	1			
																													0								
									0,5	1,0	2,0	2,0	1,0	2,0						3,3	3,3	2,1	3,2	3	3,8	2,6	2,7	3,2	0	0	1	1	0	1			
									0,5	1,0	2,0	2,0	1,0	2,0						3,3	3,3	2,1	3,2	3	3,8	2,6	2,7	3,2	3	6	1	1	0	1			













<b>50</b>																	
<b>28,8</b>																	
0		2,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0	0	0	0	0	0	0	0
16,3		2,0	3,0	1,0	0,0	1,0	0,0	0,0		32,6	48,9	16,3	0	16,3	0	0	0
1,5		2,0	3,0	2,0	0,0	1,0	0,0	0,0		3	4,5	3	0	1,5	0	0	0
5		2,0	3,0	2,0	0,0	1,0	0,0	0,0		10	15	10	0	5	0	0	0
2		2,0	3,0	2,0	0,0	1,0	0,0	0,0		4	6	4	0	2	0	0	0
4		2,0	3,0	2,0	0,0	1,0	0,0	0,0		8	12	8	0	4	0	0	0
<b>19,8</b>																	
0		0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0	0	0	0	0	0	0	0
16,3		0,0	3,0	1,0	0,0	1,0	0,0	0,0		0	48,9	16,3	0	16,3	0	0	0
3,5		0,0	3,0	1,0	0,0	1,0	0,0	0,0		0	10,5	3,5	0	3,5	0	0	0
<b>48,5</b>																	
0		0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0	0	0	0	0	0	0	0
6		0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0	18	0	0	0	0	0	0
3,5		0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0	10,5	0	0	0	0	0	0
0		2,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0	0	0	0	0	0	0	0
6		2,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0		12	18	6	0	0	0	0	0
6		2,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0		12	18	6	0	0	0	0	0
<b>34,5</b>																	
0		3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0	0	0	0	0	0	0	0
16,3		3,0	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0		48,9	0	16,3	16,3	16,3	16,3	0	0
3,5		3,0	0,0	3,0	1,0	3,0	0,0	0,0		10,5	0	10,5	3,5	10,5	0	0	0
3,5		3,0	0,0	3,0	3,0	3,0	0,0	0,0		10,5	0	10,5	10,5	10,5	0	0	0
7		3,0	0,0	3,0	2,0	2,0	0,0	0,0		21	0	21	14	14	0	0	0
<b>22,5</b>																	

	0		0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0	0	0	0	0	0	
	15,3		0,0	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0		0	30,6	15,3	15,3	15,3	15,3	0
	4		0,0	2,0	2,0	1,0	1,0	0,0	0,0		0	8	8	4	4	0	0
	3		0,0	2,0	2,0	1,0	1,0	0,0	0,0		0	6	6	3	3	0	0
	<b>72,5</b>																
	0		3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0	0	0	0	0	0	0
	18,3		3,0	0,0	2,0	0,0	2,0	0,0	1,0		54,9	0	36,6	0	36,6	0	18,3
	11,3		3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0		33,9	0	0	0	0	0	11,3
	17,3		3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0		51,9	0	0	0	0	0	51,9
	18,3		3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0		54,9	0	0	0	0	0	36,6
	21,3		3,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	3,0		63,9	0	21,3	0	0	0	63,9
	<b>39</b>																
	0		3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0	0	0	0	0	0	0
	22,3		3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0		66,9	0	0	0	0	0	66,9
	0		0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0	0	0	0	0	0	0
	6		0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0		0	18	0	0	0	0	12
	<b>94</b>																
	17,3		3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		51,9	0	0	0	0	0	0
	6		2,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0		12	12	0	0	0	0	6
	6		2,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		12	12	0	0	0	0	0
	0		3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0	0	0	0	0	0	0
	17,3		3,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	1,0		51,9	0	17,3	0	0	0	17,3
	7		3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0		21	0	0	0	0	0	14

	4,5	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0		13,5	0	0	0	0	0	13,5
	7,5	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0		22,5	0	0	0	0	0	37,5
	<b>117</b>															
	6	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		18	0	0	0	0	0	0
	6	3,0	0,0	1,0	1,0	1,0	0,0	1,0		18	0	6	6	6	0	6
	6	3,0	0,0	1,0	1,0	1,0	0,0	3,0		18	0	6	6	6	0	18
	18,3	3,0	0,0	2,0	2,0	3,0	0,0	7,0		54,9	0	36,6	36,6	54,9	0	128,1
	13,3	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0	39,9	0	0	0	0	0
	13,3	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0	39,9	0	0	0	0	0
	13,3	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0	39,9	0	0	0	0	0
	6	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0	18	0	0	0	0	0
	13,3	0,0	3,0	0,0	1,0	2,0	0,0	0,0		0	39,9	0	13,3	26,6	0	0
	6	0,0	3,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0	18	12	0	0	0	0
	7,8	3,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		23,4	23,4	0	0	0	0	0
	<b>125</b>															

12,3	0,0	0,0	0,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0	0	0	36,9	12,3	0	0
3	0,0	0,0	0,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0	0	0	9	3	0	0
3	0,0	0,0	1,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0	0	3	9	3	0	0
3	0,0	0,0	1,0	3,0	2,0	0,0	0,0	0	0	3	9	6	0	0
3	0,0	0,0	1,0	3,0	2,0	0,0	0,0	0	0	3	9	6	0	0
3	0,0	0,0	1,0	3,0	2,0	0,0	0,0	0	0	3	9	6	0	0
3	0,0	1,0	2,0	3,0	2,0	0,0	0,0	0	3	6	9	6	0	0
12,3	0,0	0,0	2,0	3,0	2,0	0,0	0,0	0	0	24,6	36,9	24,6	0	0
3	0,0	0,0	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	9	0	0	0
3	0,0	0,0	1,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0	0	3	9	3	0	0
12,3	0,0	0,0	1,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0	0	12,3	36,9	12,3	0	0
11,3	0,0	0,0	1,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0	0	11,3	33,9	11,3	0	0
10,3	0,0	0,0	1,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0	0	10,3	30,9	10,3	0	0
10,3	0,0	0,0	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	30,9	0	0	0
10,3	0,0	0,0	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	30,9	0	0	0
10,3	0,0	0,0	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	30,9	0	0	0
<b>21</b>														
10,3	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	3,0	0,0	0	0	10,3	0	0	30,9	0
10,3	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	3,0	0,0	0	0	10,3	0	0	30,9	0
3	1,0	0,0	1,0	0,0	0,0	3,0	0,0	3	0	3	0	0	9	0
<b>28</b>														
3	2,0	2,0	1,0	1,0	3,0	0,0	0,0	6	6	3	3	9	0	0
3	1,0	0,0	1,0	1,0	3,0	0,0	0,0	3	0	3	3	9	0	0
3	0,0	1,0	1,0	1,0	3,0	0,0	0,0	0	3	3	3	9	0	0
3	0,0	0,0	1,0	1,0	3,0	0,0	0,0	0	0	3	3	9	0	0
<b>69,5</b>														
6	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6	0	0	0	0	0	0
18,3	2,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	1,0	36,6	0	36,6	0	0	0	18,3

	5	1,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	1,0		5	0	5	0	0	0	5
	1,5	2,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	1,0		3	0	1,5	0	0	0	1,5
	3	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0		9	0	0	0	0	0	9
	<b>12</b>															
	6	1,0	1,0	2,0	1,0	1,0	2,0	1,0		6	6	12	6	6	12	6
	4	1,0	1,0	2,0	1,0	1,0	1,0	0,0		4	4	8	4	4	4	0
	13,2	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0		39,6	39,6	39,6	39,6	39,6	39,6	39,6
									Summe:	985,8	759,3	546,6	530,3	474	158	580,7
										1159,1	1093,9	711	765,1	677,8	148,8	667
										85,0%	69,4%	76,9%	69,3%	69,9%	106,2%	87,1%



**B Erweiterte Excel-Bewertungstabelle mit den Ergebnissen aus  
Feldtest 2 (E.ON ERC)**

				Anforderungen Sensorik/Aktorik																				
				1: Applikation / 2: Option /	max. Punkte (Applikation + Kommunikation)	Punktuelle Bewertung der Applikation	Präsenzsensor (Applikation + Kommunikation)	Außentemperatursensor	motorisch betreibbare Stellantriebe	Zeitschaltuhr mit Kommunikation zum Aktor	Raumtemperatursensor	Fenster-/Türkontakt	Regelbare Pumpe	Differenzdruckmessung	frequenzgesteuerter Lüfter	CO2-Sensor	Feuchtigkeitssensor (Innen und Außen)	frequenzgesteuerter Verdichter	Temperaturfühler TWW	elektronisch betreibbares Mischventil	Strahlungssensor	Tageslichtsensor	motorisch betriebener Antrieb	
<b>Heizung</b>																								
1		<b>Wärmeübergabe: Regelung der Raumtemperatur</b>																						
	1.1	Keine oder manuelle Regelung	1	0	0																			
	1.2	Automatische örtliche Regelung	1	17,3	5			x		x														
	1.2a	Regelung über Präsenzerfassung	2	4	4	x																		
	1.2b	Regelung über Zeitprogramm	2	4	4				x															
	1.2c	Absenktemperatur bei Fensteröffnung	2	4	4						x													
2		<b>Wärmeerzeugung: Regelung der Vorlauftemperatur</b>																						
	2.1	Keine Regelung, konstante Vorlauftemperatur	1	0	0																			
	2.2	Witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung	1	15,3	3		x																	
	2.3	Bedarfsgeführte Vorlauftemperaturregelung (in Abhängigkeit der Raumtemperaturen)	1	19,3	7																			
3		<b>Wärmeverteilung: Regelung der Umwälzpumpen</b>																						
	3.1	Keine Regelung, feste Drehzahl	1	0	0																			
	3.2	Einstellung verschiedener Drehzahlstufen	1	15,3	3							x												
	3.3	Stufenlose Drehzahlregelung	1	19,3	7							x	x											























Bewertung der möglichen und aktuellen Ausstattung (Kommunikation)	Gewichtung zur Berechnung Bereich SRI							Berechnung Bereich SRI						
	Energie - Strom	Energie - Wärme	Komfort	Sicherheit	AAL	Unterhaltung	Netzdienlichkeit	Energie - Strom	Energie - Wärme	Komfort	Sicherheit	AAL	Unterhaltung	Netzdienlichkeit
<b>79,5</b>														
<b>23,8</b>														
0	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0	0	0	0
<b>1</b> 15,8	0,0	3,0	1,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0	47,4	15,8	0	15,8	0	0
<b>1</b> 2	0,0	3,0	2,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0	6	4	0	4	0	0
<b>1</b> 4	0,0	3,0	2,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0	12	8	0	8	0	0
<b>1</b> 2	0,0	3,0	2,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0	6	4	0	4	0	0
<b>19,8</b>														
0	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0	0	0	0
13,8	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	41,4	0	0	0	0	0
6	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	18	0	0	0	0	0
<b>23,8</b>														
0	2,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0	0	0	0
6	2,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12	18	0	0	0	0	0
17,8	2,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	35,6	53,4	0	0	0	0	0

<b>50</b>																	
<b>29,8</b>																	
0		2,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0	0	0	0	0	0	0	0
15,8		2,0	3,0	1,0	0,0	1,0	0,0	0,0		31,6	47,4	15,8	0	15,8	0	0	0
3		2,0	3,0	2,0	0,0	1,0	0,0	0,0		6	9	6	0	3	0	0	0
5		2,0	3,0	2,0	0,0	1,0	0,0	0,0		10	15	10	0	5	0	0	0
2		2,0	3,0	2,0	0,0	1,0	0,0	0,0		4	6	4	0	2	0	0	0
4		2,0	3,0	2,0	0,0	1,0	0,0	0,0		8	12	8	0	4	0	0	0
<b>19,3</b>																	
0		0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0	0	0	0	0	0	0	0
15,8		0,0	3,0	1,0	0,0	1,0	0,0	0,0		0	47,4	15,8	0	15,8	0	0	0
3,5		0,0	3,0	1,0	0,0	1,0	0,0	0,0		0	10,5	3,5	0	3,5	0	0	0
<b>48,5</b>																	
0		0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0	0	0	0	0	0	0	0
15,8		0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0	47,4	0	0	0	0	0	0
3,5		0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0	10,5	0	0	0	0	0	0
0		2,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0	0	0	0	0	0	0	0
6		2,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0		12	18	6	0	0	0	0	0
17,8		2,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0		35,6	53,4	17,8	0	0	0	0	0
<b>34,5</b>																	
0		3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0	0	0	0	0	0	0	0
15,8		3,0	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0		47,4	0	15,8	15,8	15,8	15,8	0	0
7		3,0	0,0	3,0	1,0	3,0	0,0	0,0		21	0	21	7	21	0	0	0
7		3,0	0,0	3,0	3,0	3,0	0,0	0,0		21	0	21	21	21	0	0	0
3,5		3,0	0,0	3,0	2,0	2,0	0,0	0,0		10,5	0	10,5	7	7	0	0	0
<b>22,5</b>																	

	0		0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0	0	0	0	0	0	
	14,8		0,0	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0		0	29,6	14,8	14,8	14,8	14,8	0
	2		0,0	2,0	2,0	1,0	1,0	0,0	0,0		0	4	4	2	2	0	0
	6		0,0	2,0	2,0	1,0	1,0	0,0	0,0		0	12	12	6	6	0	0
	<b>72,5</b>																
	0		3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0	0	0	0	0	0	0
	17,8		3,0	0,0	2,0	0,0	2,0	0,0	1,0		53,4	0	35,6	0	35,6	0	17,8
	10,8		3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0		32,4	0	0	0	0	0	10,8
	16,8		3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0		50,4	0	0	0	0	0	50,4
	17,8		3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0		53,4	0	0	0	0	0	35,6
	20,8		3,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	3,0		62,4	0	20,8	0	0	0	62,4
	<b>39</b>																
	0		3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0	0	0	0	0	0	0
	21,8		3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0		65,4	0	0	0	0	0	65,4
	0		0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0	0	0	0	0	0	0
	21,8		0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0		0	65,4	0	0	0	0	43,6
	<b>94</b>																
	16,8		3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		50,4	0	0	0	0	0	0
	20,8		2,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0		41,6	41,6	0	0	0	0	20,8
	6		2,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		12	12	0	0	0	0	0
	0		3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0	0	0	0	0	0	0
	16,8		3,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	1,0		50,4	0	16,8	0	0	0	16,8
	7		3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0		21	0	0	0	0	0	14

	9	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0		27	0	0	0	0	0	27
	15	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0		45	0	0	0	0	0	75
	<b>117</b>															
	6	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		18	0	0	0	0	0	0
	6	3,0	0,0	1,0	1,0	1,0	0,0	1,0		18	0	6	6	6	0	6
	6	3,0	0,0	1,0	1,0	1,0	0,0	3,0		18	0	6	6	6	0	18
	17,8	3,0	0,0	2,0	2,0	3,0	0,0	7,0		53,4	0	35,6	35,6	53,4	0	124,6
	12,8	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0	38,4	0	0	0	0	0
	12,8	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0	38,4	0	0	0	0	0
	12,8	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0	38,4	0	0	0	0	0
	14,8	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0	44,4	0	0	0	0	0
	12,8	0,0	3,0	0,0	1,0	2,0	0,0	0,0		0	38,4	0	12,8	25,6	0	0
	14,8	0,0	3,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0	44,4	29,6	0	0	0	0
	7,3	3,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		21,9	21,9	0	0	0	0	0
	<b>125</b>															

11,8	0,0	0,0	0,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0	0	0	35,4	11,8	0	0
9,8	0,0	0,0	0,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0	0	0	29,4	9,8	0	0
9,8	0,0	0,0	1,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0	0	9,8	29,4	9,8	0	0
3	0,0	0,0	1,0	3,0	2,0	0,0	0,0	0	0	3	9	6	0	0
3	0,0	0,0	1,0	3,0	2,0	0,0	0,0	0	0	3	9	6	0	0
3	0,0	0,0	1,0	3,0	2,0	0,0	0,0	0	0	3	9	6	0	0
3	0,0	1,0	2,0	3,0	2,0	0,0	0,0	0	3	6	9	6	0	0
3	0,0	0,0	2,0	3,0	2,0	0,0	0,0	0	0	6	9	6	0	0
3	0,0	0,0	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	9	0	0	0
3	0,0	0,0	1,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0	0	3	9	3	0	0
11,8	0,0	0,0	1,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0	0	11,8	35,4	11,8	0	0
10,8	0,0	0,0	1,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0	0	10,8	32,4	10,8	0	0
9,8	0,0	0,0	1,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0	0	9,8	29,4	9,8	0	0
9,8	0,0	0,0	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	29,4	0	0	0
9,8	0,0	0,0	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	29,4	0	0	0
9,8	0,0	0,0	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	29,4	0	0	0
<b>21</b>														
3	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	3,0	0,0	0	0	3	0	0	9	0
3	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	3,0	0,0	0	0	3	0	0	9	0
3	1,0	0,0	1,0	0,0	0,0	3,0	0,0	3	0	3	0	0	9	0
<b>28</b>														
3	2,0	2,0	1,0	1,0	3,0	0,0	0,0	6	6	3	3	9	0	0
3	1,0	0,0	1,0	1,0	3,0	0,0	0,0	3	0	3	3	9	0	0
3	0,0	1,0	1,0	1,0	3,0	0,0	0,0	0	3	3	3	9	0	0
3	0,0	0,0	1,0	1,0	3,0	0,0	0,0	0	0	3	3	9	0	0
<b>69,5</b>														
6	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6	0	0	0	0	0	0
17,8	2,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	1,0	35,6	0	35,6	0	0	0	17,8

	5	1,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	1,0		5	0	5	0	0	0	5
	3	2,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	1,0		6	0	3	0	0	0	3
	3	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0		9	0	0	0	0	0	9
	<b>12</b>															
	6	1,0	1,0	2,0	1,0	1,0	2,0	1,0		6	6	12	6	6	12	6
	6	1,0	1,0	2,0	1,0	1,0	1,0	0,0		6	6	12	6	6	6	0
	13,2	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0		39,6	39,6	39,6	39,6	39,6	39,6	39,6
									Summe:	1074	971,3	562,6	540,2	479,5	115,2	668,6
										1159,1	1093,9	711	765,1	677,8	148,8	667
										92,7%	88,8%	79,1%	70,6%	70,7%	77,4%	100,2%



## **Eigenständigkeitserklärung**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß übernommen sind, sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht als Prüfungsarbeit eingereicht worden. Ich erkläre mich damit einverstanden, dass die vorliegende Arbeit in der Lehrstuhlbibliothek und Datenbank aufbewahrt und für den internen Gebrauch kopiert werden darf.

Aachen, 2. Juni 2019

DEIN NAME