

Protokolle der Application Layer im industriellen Internet der Dinge

Elena Balzert

Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt, Konrad-Zuse-Straße 2, 97421 Schweinfurt, elena.balzert@student.fhws.de

Alexander Dobhan

Professor für Business Process Management and Business Application, Leiter ERP-Labor, Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt, Konrad-Zuse-Straße 2, 97421 Schweinfurt, alexander.dobhan@fhws.de

1	Einleitung.....	80
2	Literaturanalyse	82
3	Untersuchung.....	91
4	Zusammenfassung und Fazit	107
5	Literaturverzeichnis	108

Abstract:

Die zentrale Idee des Internet of Things (IoT) ist die digitale Vernetzung und der damit einhergehende Informationsfluss zwischen unterschiedlichen Objekten. Der Informationsaustausch wird mit Hilfe von entsprechenden Protokollen realisiert. Ziel der Untersuchung ist eine Analyse des betrieblichen Entscheidungsprozesses zur Protokollauswahl auf der Application Layer sowie die Identifikation und Beschreibung der zu berücksichtigenden Entscheidungsparameter. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden Experteninterviews durchgeführt und im Rahmen einer qualitativen Inhaltsanalyse ausgewertet. Zentrales Ergebnis aus dieser Untersuchung ist eine Übersicht über Entscheidungsparameter zur Protokollauswahl in Abhängigkeit vom Anwendungskontext.

JEL Classification: O3

Keywords: IoT-Architektur, Application Layer, Protokolle, Protokollauswahl, Entscheidungsparameter.

1 Einleitung

Mit der Idee des Internet der Dinge (IoT) geht eine steigende Bedeutung der Vernetzung von Systemen und Geräten einher. Zur Veranschaulichung der Vernetzung und zur Darstellung der IoT-Architektur werden in der Regel Referenzmodelle oder Referenzarchitekturen mit mehreren Schichten verwendet (z.B. Atzori *et al.* (2010), Khan *et al.* (2012) und Guth *et al.* (2016)). Die Sensorik und die Maschine stellen dabei das eine Ende der Architektur dar, die Geschäftsprozesse und deren Automatisierung in Geschäftsapplikationen das andere. Nachfolgende Abbildung bezieht sich beispielsweise auf die Fünf-Schicht-Referenzarchitektur nach Khan *et al.* (2012).

Business Layer	<ul style="list-style-type: none"> ✓ System Management ✓ Geschäftsmodelle ✓ Geschäftsprozessmodelle
Application Layer	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Anwendungssoftware (z.B. Business Apps oder andere Geschäftssoftware, wie ERP-System oder BI-Tools)
Middleware Layer	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Integrationskonzepte ✓ Datenbanken ✓ Architekturen und Plattformen
Network Layer	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Übermittlungsprotokolle (wie z.B. http, LTE, 5G, etc.) ✓ Kommunikationsinfrastruktur
Perception Layer	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Sensoren ✓ Physische Objekte

Abbildung 1: IoT-Referenzarchitektur (eigene Darstellung in Anlehnung Khan *et al.* (2012))

Die Schicht der Geschäftsapplikationen wird auch als Application Layer bezeichnet, die Sensorik-Ebene als Perception Layer. Vernetzung kann ebenenübergreifend aber auch innerhalb einer Ebene erfolgen. Werden Sensordaten innerhalb von Unternehmen genutzt, geschieht dies häufig ebenenübergreifend. Werden Geschäftsprozesse vollständig automatisiert, ist zudem eine Vernetzung zwischen Systemen der Application Layer notwendig. Da die digitale Integration der Sensordaten in Geschäftsprozessen vor allem auf der Application Layer (ERP, MES etc.) stattfindet, liegt der Fokus dieser Arbeit auf der Application Layer mit der Vernetzung von Elementen untereinander und mit Elementen anderen Ebenen. Damit wird diese Arbeit auch der zunehmenden Bedeutung dieser Thematik gerecht: Die Veröffentlichungen zum Suchbegriff „IoT protocol Application Layer“ steigen von Jahr zu Jahr an. Im Jahr 2016 waren es 11.000 Publikationen und im Jahr 2019 bereits 29.200 Veröffentlichungen (Google Scholar, Stand: 06.10.2020).

Für die Vernetzung und damit den Datenaustausch sind Protokolle notwendig (Wendzel, 2018, S. 26). Als wichtigste Protokolle der Application Layer gelten CoAP, XMPP, REST, MQTT, WebSocket, AMQP und DDS. (Elhadi *et al.*, 2018; Sethi und Sarangi, 2017; Al-Fuqaha *et al.*, 2015) Elhadi *et al.* (2018) haben den wichtigsten Protokollen der Application Layer Anwendungen zugeordnet, bspw. kann MQTT für eine Erweiterung der Enterprise Messaging-Systeme auf IoT-Anwendungen ausgewählt und eingesetzt werden. Auf Grund der zahlreichen Protokollalternativen werden in der Literatur auch fehlende Standards in Bezug auf IoT-Infrastrukturen genannt und gemeinsame Standards von Unternehmen gefordert (Salazar Ch. *et al.*, 2018). Darüber hinaus tragen Entscheidungsparameter zur Auswahl des richtigen Protokolls bei. Das führt zu einem Forschungsbedarf, welcher in der nachfolgenden Forschungsfrage beschrieben ist:

Wie muss ein Entscheidungsprozess für Protokolle der Application Layer bei der digitalen Integration von Sensordaten in eine Anwendung im betrieblichen Umfeld von systemanwendenden und systembereitstellenden Unternehmen konzipiert sein und welche Entscheidungsparameter sind zu berücksichtigen?

Hieraus ergeben sich drei Forschungsziele:

- Gegenüberstellung unterschiedlicher IoT-Referenzmodelle der Application Layer zur digitalen Integration von Sensordaten in ein System.
- Übersicht der Möglichkeiten zum Nachrichtenaustausch auf und mit der Application Layer zur digitalen Integration von Sensordaten in ein System.
- Beschreibung von Entscheidungsparametern und deren Bedeutung für die Anwendung von Protokollen der Application Layer für die digitale Integration von Sensordaten in ein System.

Die Forschungsziele 1 und 2 können im Zuge der Literaturanalyse in Abschnitt 2 weitgehend beantwortet werden. Für das dritte Forschungsziel, der Untersuchung des Entscheidungsprozesses zur Protokollauswahl, existieren bislang dagegen nur wenig Vorarbeiten. Entsprechend fordern Elhadi *et al.* (2018) zu diesem Thema auch weitere Untersuchungen. Zur Erfüllung des dritten Forschungsziels soll ein Entscheidungsmodell zur Protokollauswahl geschaffen werden. Deshalb wird eine Untersuchung mit Hilfe von Experteninterviews durchgeführt. Diese sind für die Analyse des Entscheidungsprozesses (Prozesswissen) geeignet. (Bogner *et al.*, 2014, S. 18) Die Experten sind sowohl in Unternehmen tätig, die Technologie zur Vernetzung anbieten, als auch solchen die diese zur Nutzung von Sensordaten anwenden.

Zu Beginn dieses Beitrags wird in Abschnitt 2 eine Literaturanalyse beschrieben und so der theoretische Hintergrund erläutert. Die Eingrenzung des Themas ist die Grundlage für das Forschungsdesign in Kapitel 3. Im weiteren Verlauf wird die Durchfüh-

rung der Experteninterviews mit der Vorstellung der Experten beschrieben und analysiert. Eine Auswertung und Interpretation der Ergebnisse aus den Experteninterviews werden in Kapitel 4 veranschaulicht. Kapitel 5 schließt die Untersuchung mit einer Zusammenfassung und einem Fazit ab.

2 Literaturanalyse

Die Literaturanalyse bezieht sich auf wissenschaftliche Beiträge (Journals und Konferenzbeiträge), die Ergebnisse einer Literaturrecherche mit Google Scholar und ScienceDirect waren. Die Suchergebnisse wurden auf IEEE-, Elsevier- und Springer-Veröffentlichungen ab 2015 eingegrenzt. Zur Suche wurden folgende Schlagwörter genutzt: IoT Internet of Things, IoT reference model, Internet of Things reference model, Application Layer reference model, Reference model classification, Application Layer protocols.

Als Ergebnis wurden insgesamt 49 für die Forschungsfrage relevante Titel untersucht, mit dem Ziel, Literatur entsprechend der Forschungsfrage und Forschungsziele zu ermitteln. Die gefundene Literatur befasst sich, mit einigen Ausnahmen, mit „IoT-Referenzmodellen“ und zusätzlich „IoT-Protokollen“. Eine Übersicht über die Literatur findet sich in der Tabelle oben. Neben den Protokollen und den Referenzmodellen, wurden dabei auch noch Quellen berücksichtigt, die sich auf die Middleware an die Application Layer angrenzende Schicht beziehen. Außerdem wurde erfasst, welche Quellen Entscheidungsparameter allgemein und zu den Protokollen im Speziellen berücksichtigen. Insgesamt erfolgt aber dennoch in der Analyse eine starke Fokussierung auf die Protokolle innerhalb von IoT-Architekturen.

Abbildung 2 zeigt eine Zuordnung von Protokollen zu den einzelnen Schichten. Jedes einzelne Protokoll weist verschiedene Eigenschaften auf, die anwendungsorientiert ausgewählt werden können. (Elhadi *et al.*, 2018) Eine Zuordnung der Protokolle zu den Schichten unternehmen ebenfalls Al-Fuqaha *et al.* (2015) und Sethi und Sarangi (2017) in ihren Beiträgen. Die Ergebnisse aus diesen Beiträgen stimmen mit den Ergebnissen von Elhadi *et al.* (2018) überein. Tabelle 2 enthält die Protokolle der Application Layer. Diese dient als Grundlage für ein mögliches Entscheidungsmodell, aber auch für die Untersuchung des Entscheidungsprozesses zur Protokollauswahl in der Praxis. (siehe auch Al-Fuqaha *et al.* (2015))

		Protokoll als Teil von IoT Referenzmodellen				Entscheidungsparameter bei IoT Anwendungen von Referenzmodellen			
Nr.	Artikel	IoT-Protokolle			IoT- Architekturen				
		Protokoll- arten	Protokollei- genschaften	Auswahl- kriterien	Anforde- rungen	Referenz- modell	Entscheidungs- parameter		
1	Al-Fuqaha et al. (2015)	x	x			x			
2	Atzori et al. (2010)	x	x	x		x			
3	Bandyopadhyay et al. (2011)					x			
4	Becker et al. (2007)					x			
5	Cereda und Neto (2017)					x			
6	Chaqfeh und Mohamed (2017)					x			
7	Cruz et al. (2018)	x	x			x			
8	Diaz et al. (2005)	x				x			
9	Farahzadi et al. (2018)					x			
10	Fersi (2015)					x			
11	Fettke und Loos (2003)					x			
12	Fettke und Loos (2004)					x	x		
13	Fettke (2009)					x			

		Protokoll als Teil von IoT Referenzmodellen			Entscheidungsparameter bei IoT Anwendungen von Referenzmodelle		
Nr.	Artikel	IoT-Protokolle			IoT- Architekturen		
		Protokoll- arten	Protokollei- genschaften	Auswahl- kriterien	Anforderungen	Referenz- modell	Entscheidungs- parameter
14	Gubbi et al. (2013)		x			x	
15	Guth et al. (2016)					x	
16	Guth et al. (2018)	x				x	
17	Heinzelman et al. (2004)					x	
18	Hill et al. (2000)	x				x	
19	Ismail und Kastner (2016)	x	x			x	
20	Khalid et al. (2019)					x	
21	Khan et al. (2012)		x			x	
22	Khan et al. (2016)	x					
23	Klötzer und Pflaum (2017)					x	
24	Kokkonis et al. (2018)	x	x				
25	Kondratenko et al. (2018)						x
26	Li et al. (2015)	x		x		x	
27	Madakam et al. (2015)	x	x			x	

Nr.	Artikel	Protokoll als Teil von IoT Referenzmodellen				Entscheidungsparameter bei IoT Anwendungen von Referenzmodelle			
		IoT-Protokolle				IoT- Architekturen			
		Protokoll- arten	Protokollei- genschaften	Auswahl- kriterien	Anforderungen	Referenz- modell	Entscheidungs- parameter		
28	Melik-Merkumians et al. (2012)	x							
29	Ngu et al. (2017)				x	x			
30	Ouedraogo et al. (2018)	x				x			
31	Perera et al. (2014a)					x			
32	Perera et al. (2014b)					x			
33	Radanliev et al. (2018)							x	
34	Rausch et al. (2018)	x	x					x	
35	Razzaque et al. (2016)				x	x			
36	Salazar Ch. et al. (2018)	x	x			x			
37	Sethi und Sarangi (2017)	x	x	x		x			
38	Sheng et al. (2013)	x	x						
39	Spieß et al. (2009)					x			
40	Stojkoska und Trivodaliev (2017)	x	x	x		x			

		Protokoll als Teil von IoT Referenzmodellen				Entscheidungsparameter bei IoT Anwendungen von Referenzmodelle			
Nr.	Artikel	IoT-Protokolle			IoT- Architekturen				
		Protokoll- arten	Protokollei- genschaften	Auswahl- kriterien	Anforderungen	Referenz- modell	Entscheidungs- parameter		
41	Tan und Wang (2010)				x	x			
42	Thangavel et al. (2014)	x	x						
43	Wang et al. (2008)					x			
44	Weyrich und Ebert (2016)				x				
45	Whitmore et al. (2015)					x			
46	Wu et al. (2010)	x	x			x			
47	Xu et al. (2014)				x	x	x		
48	Yang et al. (2010)	x							
49	Yang et al. (2011)					x			

Tabelle 1: Kategorisierung der Literatur (eigene Darstellung)

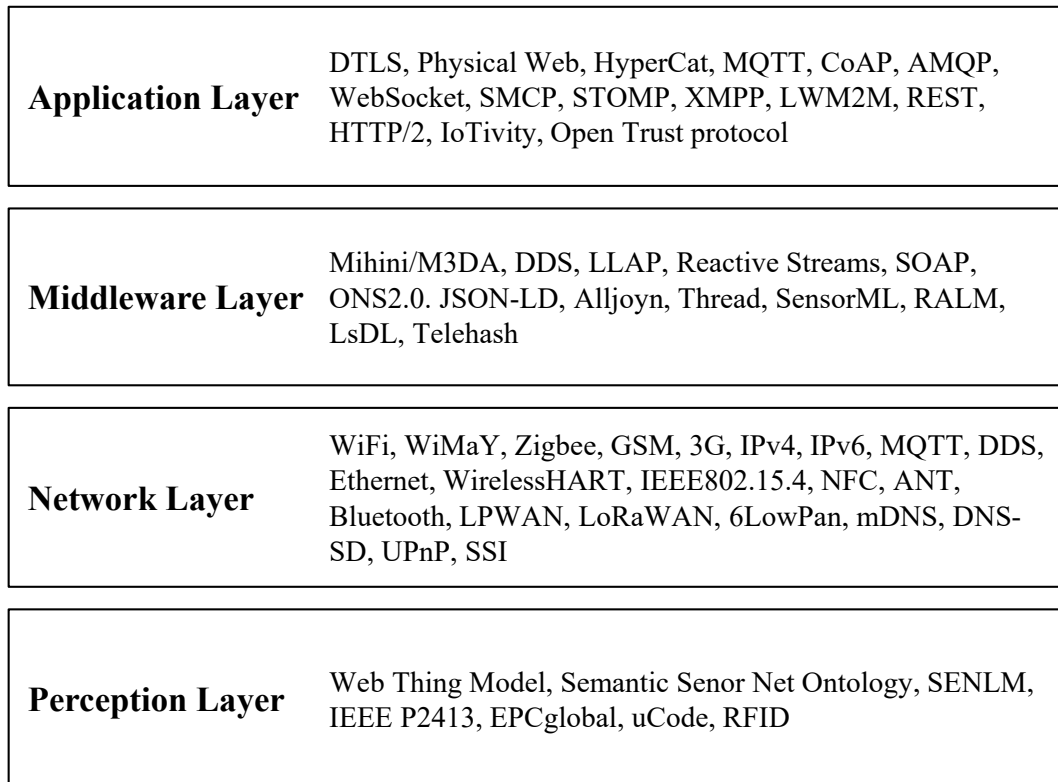


Abbildung 2: IoT-Architektur mit Protokollen
(eigene Darstellung in Anlehnung an Elhadi et al. (2018))

In der Rubrik (Daten-)Transport unterscheiden sich die aufgeführten Protokolle. (Elhadi *et al.*, 2018; Salazar Ch. *et al.*, 2018) Zum Beispiel wendet CoAP einen User Datagram Protocol (UDP)-basierten Transport an, welcher zur Folge hat, dass eine Bestätigung des erfolgreichen Transports ausbleibt. (Rayes und Salam, 2017, S. 313–314) Im Gegensatz zu CoAP nutzt MQTT ein Transmission Control Protocol (TCP)-Port (Elhadi *et al.*, 2018; Salazar Ch. *et al.*, 2018), welches mehr Zuverlässigkeit bei der Datenübertragung bietet (Rayes und Salam, 2017, S. 312). TCP überprüft hierbei die zu übermittelnden Pakete auf Fehlerhaftigkeit und doppelte sowie verloren gegangene Pakete. (Rayes und Salam, 2017, S. 30) Den Transportmechanismen können die Kommunikationsmodelle Request/Response und Publish/Subscribe angebunden werden.

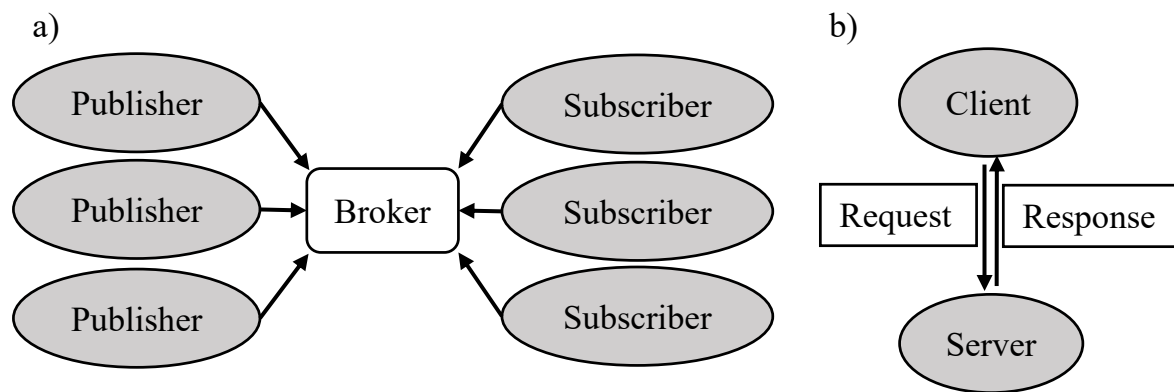


Abbildung 3: a) Publish/Subscribe Kommunikation (eigene Darstellung in Anlehnung an Eugster et al. (2003) und Sahingoz und Sonmez (2007)), b) Client/Server Kommunikation (eigene Darstellung in Anlehnung an Sahingoz und Sonmez (2007))

Abbildung 3 a) bezieht sich auf eine Publish/Subscribe (Pub/Sub)-Kommunikation, die z. B. von den Protokollen XMPP, MQTT, oder DDS genutzt wird (Salman und Jain, 2017; Elhadi *et al.*, 2018). Bei dieser Art der asynchronen Kommunikation veröffentlicht der Publisher seine Nachricht an einen Broker, der als Nachrichtenvermittler dient. Anschließend werden die Nachrichten vom Subscriber abonniert. (Sahingoz und Sonmez, 2007). Als weitere Möglichkeit ist eine synchrone Client/Server-Kommunikation (Request/Response - Req/Res) in Abbildung 3 b) dargestellt. (Sahingoz und Sonmez, 2007) Request/Response findet z. B. bei den Protokollen CoAP, XMPP, RESTful HTTP und MQTT Anwendung. (Salman und Jain, 2017; Elhadi *et al.*, 2018) Der Client erhält die Antwort (Response) erst nach einer direkten Anfrage beim Server (Request). (Sahingoz und Sonmez, 2007)

Neben den Transportmechanismen und den Kommunikationsmodellen ist die Quality of Service (QoS) eine weitere relevante Protokolleigenschaft. QoS ist eine Richtlinie, die verschiedene Attribute für Anwendungsprotokolle beinhaltet. Hierzu zählen die Ressourcenauslastung, Datenrechtzeitigkeit, Datenverfügbarkeit und Datenübermittlung. (Rayes und Salam, 2017, S. 119–122) QoS beinhaltet die 3 Stufen QoS 0, QoS 1 und QoS 2. (Tandale *et al.*, 2017) Bei QoS 0 wird eine Nachricht an einen Broker gesendet, ohne hierfür eine Bestätigung zu erwarten. QoS 1 erfordert das mehrfache Verschicken von Daten, QoS 2 bedeutet, dass die Nachricht genau einmal gesendet wird, allerdings erst nachdem eine entsprechende Rückmeldung des Empfängers eingegangen ist. QoS nutzen u. a. CoAP, RESTful HTTP, MQTT, AMQP, DDS. (Elhadi *et al.*, 2018)

	CoAP	XMPP	RESTful HTTP	MQTT	WebSocket	AMQP	DDS
Standard	IETF	IETF	REST	OASIS IBMs	HTML5	OASIS	OMG
Technologie	XML	XML	XML, HTML, JSON	Unabhängig von der Implementierungssprache	XML, JSON	Unabhängig von der Implementierungssprache	C, C++, C#, Java, Scala, Lua, Pharo und Ruby
Transport	UDP	TCP	TCP	TCP	TCP	TCP	TCP/UDP
Architektur	Req/Res	Pub/Sub Req/Res	Req/Res	Pub/Sub Req/Res	Pub/Sub	Pub/Sub	Pub/Sub
Anwendung	Versorgungsnetz	Remote Management von Konsumgütern	Smart Energy Profile 2 (basic energy management, home services)	Erweitern von Enterprise Messaging auf IoT-Anwendungen	Realtime Anwendungen: Real-time Dashboards, Teamwork	Hybride Anwendungen: die Integration von Computersystemen nach einer Fusion	Verteilte Anwendungen
Sicherheit & QoS	Sicherheit & QoS	Sicherheit	Sicherheit & QoS	Sicherheit & QoS	Sicherheit	Sicherheit & QoS	QoS

	CoAP	XMPP	RESTful HTTP	MQTT	WebSocket	AMQP	DDS
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Multicast • Geringer Overhead • Mini-mierte Komplexität • Flexibilität • Niedrige Latenz 	<ul style="list-style-type: none"> • Echtzeit • Niedrige Latenz • Leicht, einfach • Erweiterbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Einfache Wartung 	<ul style="list-style-type: none"> • Einfache Implementierung • Nützlich für Remote • Leicht • Asymmetrische Client-Server-Beziehung 	<ul style="list-style-type: none"> • Vereinfachte Webkommunikation und Netzwerk-kompatibilität 	<ul style="list-style-type: none"> • ISO-Norm • Zuverlässigkeit und Sicherheit • Einfache Erweiterung • Symmetrische Client-Server-Beziehung 	<ul style="list-style-type: none"> • Echtzeit • Dezentrale Architektur • Dynamische Erkennung von Abonnementen
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Sicherheit auf Kommunikationsebene • Wenige Bibliotheken 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Datenoverhead • Nicht geeignet für eingebettete IoT-Anwendungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Lokale Datenspeicherung 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Fehlerbehandlung • Schwierige Erweiterungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Spezifische Hardware-Anforderungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Größere Paketgrößen 	

Tabelle 2: Übersicht Application Layer-Protokolle
(eigene Darstellung in Anlehnung an Elhadi et al. (2018) und Elhadi et al. (2019))

Die Literaturrecherche in diesem Abschnitt verdeutlicht, dass der Entscheidungsprozess und die Entscheidungsparameter in Bezug auf IoT-Protokolle der Application Layer bisher nicht ausführlich und empirisch untersucht sind. Lediglich eine Untersuchung und Aufführung der wichtigsten Protokolle wird vorgenommen (Elhadi *et al.*, 2018; Sethi und Sarangi, 2017; Al-Fuqaha *et al.*, 2015). Deshalb wird nachfolgend eine Untersuchung des Entscheidungsprozesses zur Protokollauswahl der Application Layer und der dazugehörigen Entscheidungsparameter durchgeführt.

3 Untersuchung

3.1 Forschungsdesign

Ziel dieser Untersuchung ist, mit Hilfe der beschriebenen Methodik die Analyse des Entscheidungsprozesses der Protokollauswahl auf der Application Layer und entsprechende Entscheidungsparameter als Grundlage eines Entscheidungsmodells zu definieren. Mit dem Ziel einer umfassenden Datenerhebung und der Datenvergleichbarkeit wird ein systematisierendes Experteninterview angewendet, welches das Einsatzgebiet „Prozesswissen“ abdeckt und eine qualitative Inhaltsanalyse als Auswertungsmethode einsetzt. (Bogner *et al.*, 2014, S. 24–25) Die Auswahl der Experten erfolgte wie in der Literatur vorgeschlagen. (Bogner *et al.*, 2014, S. 35; siehe auch Meuser und Nagel 2009, S. 466-470 und Tesch *et al.*, 2017)

Anbieter/ Anwender	Nr.	Branche	Funktion
Anbieter	1	Telematik (Off-Highway)	Leiter Produktmanagement
Anbieter & Anwender	2	Maschinenbau	Entwicklungsingenieur
Anbieter	3	Sondermaschinenbau	Entwicklungsleiter
Anbieter & Anwender	4	Systemlieferant	Leiter Education Network
Anbieter	5	Maschinenbau	Entwicklungsingenieur
Anwender	6	Werkzeugbau, Maschinenbau	Head of technical IT
Anwender	7	Automobilzulieferer	Systemanalyst

Tabelle 3: Anonymisierte Vorstellung der Experten (eigene Darstellung)

Zur systematischen Befragung der Experten wird ein Interviewleitfaden erstellt. Dazu werden aus den Elementen der Forschungsfrage und der Forschungsziele Interviewfragen abgeleitet (Tabelle 4). Diese werden zunächst einem Pretest unterzogen, bei dem Fragen umformuliert, hinzugefügt oder gelöscht werden können, um einen optimierten Leitfaden zu erhalten. Daneben wird zur Überprüfung der Zielgerichtetheit eine initiale Auswertung in Hinblick auf die Forschungsfrage und -hypothesen durchgeführt, um so gegebenenfalls Änderungen am Forschungsdesign vorzunehmen. (Weichbold, 2019, S. 349–350; Kaiser, 2014, S. 69-70) Die einzelnen Interviewfragen gehen mit Forschungshypothesen einher, welche im Zuge der Auswertung bestätigt bzw. verworfen werden.

Analyse- dimension	Fragenkomplexe	Interviewfragen	Hypothesen zu den Fragenkomplexen
Unternehmen	Verfügbarkeit von IoT-Geräten (Sensoren, Aktoren, ...) im Unternehmen	Welche IoT-basierte Geräte, Produkte und Maschinen produzieren Sie in Ihrem Unternehmen?	Die Verfügbarkeit bzw. der Einsatz von IoT-Geräten sind im Unternehmen gegeben.
		Welche Mehrwerte/Schwierigkeiten sehen Sie beim Einsatz von IoT-basierten Geräten?	
Protokolle der Application Layer	Nachrichtenaustausch	Nutzen Sie mehrere Protokolle der Application Layer für unterschiedliche Projekte?	Es werden verschiedene Protokolle der Application Layer für unterschiedliche Projekte genutzt.
	Interne Anforderungen	Welche internen Anforderungen gibt es an die Protokolle der Application Layer?	Interne Anforderungen werden für die Protokollauswahl der Application Layer berücksichtigt.
	Kundenanforderungen	Welche Kundenanforderungen gibt es an die Protokolle der Application Layer?	Kundenanforderungen werden bei der Protokollauswahl der Application Layer berücksichtigt.

Analyse- dimension	Fragenkomplexe	Interviewfragen	Hypothesen zu den Fragenkomplexen
	Technische Aspekte	Welche technischen Aspekte müssen die Protokolle der Application Layer erfüllen?	Technische Aspekte werden bei der Auswahl von Protokollen der Application Layer berücksichtigt.
	Ökonomische Aspekte	Auf welche ökonomischen Anforderungen wird bei der Auswahl von Protokollen der Application Layer eingegangen?	Bei der Protokollauswahl der Application Layer wird auf ökonomische Anforderungen eingegangen.
Entscheidungsparameter	Protokolle der Application Layer	Nach welchen Parametern werden Protokolle der Application Layer ausgesucht, erstellt und eingesetzt?	Es existieren klar definierte Parameter zur Auswahl von Protokollen der Application Layer.
		Nach welchen Entscheidungsregeln werden Protokolle der Application Layer ausgesucht und eingesetzt?	Es existieren strukturierte Entscheidungsregeln zur Auswahl von Protokollen der Application Layer.
Datenübertragung	Übertragungsart	Welche Datenübertragungsarten (kabellos, kabelgebunden) nutzen Sie für Ihre Produkte?	Die Übertragungsart ist relevant für die Auswahl von Protokollen der Application Layer.
	Datenübermittlung	Welche Protokolle nutzen Sie für die Application Layer?	Es existieren unterschiedliche Protokolle für die Application Layer.
	Datenintegration	Welche Systeme (z. B. Planungssysteme (ERP, MES, ...), Anwendungssystem (Dashboards, ...) nutzen Sie?	Es werden Daten in ein Planungssystem und/oder Anwendungssystem eingebettet.

Tabelle 4: Operationalisierung der Forschungsfrage und Aufstellung von Hypothesen
(eigene Darstellung)

Für die Auswertung mit der Methode der qualitativen Inhaltsanalyse werden zunächst die Interviews durchgeführt, abgeschlossen und vollständig transkribiert. Transkription und Auswertung werden mit Hilfe der Software „MAXQDA“ durchgeführt. (Kuckartz und Rädiker, 2010, S. 734–735) Eine protokollbasierte Analyse wird für die Transkription eines Experteninterviews genutzt, da ein Experte seine Zustimmung zur Aufzeichnung nicht gegeben hat. Währenddessen werden Notizen erstellt und zeitnah verschriftlicht. (Kuckartz, 2010, S. 39) Bei den verbleibenden Experteninterviews wird eine transkriptbasierte Analyse durchgeführt, bei der Audio- und Videodateien vollständig transkribiert werden. (Kuckartz, 2010, S. 39) Für die Transkription wird in dieser Untersuchung nicht zwischen einer Video- und einer Audio-datei unterschieden, sodass für beides die gleichen Transkriptionsregeln gelten. In der Literatur werden verschiedene Transkriptionsregeln u. a. von Kuckartz (2010, S. 41–47), Bogner *et al.* (2014, S. 42–43) und Dresing und Pehl (2010, S. 723–729) veröffentlicht, die für diese Untersuchung eingesetzt werden. Nach der Transkription erfolgt die Textkodierung. Kuckartz und Rädiker (2010, S. 741–742) weisen darauf hin, dass bei der Kodierung darauf zu achten ist, dass „So viel wie nötig, so wenig wie möglich“ hervorgehoben wird, damit die markierte Passage kontextfrei genutzt und verstanden werden kann. Die durch das beschriebene Vorgehen erzielten Ergebnisse werden im folgenden Kapitel vorgestellt.

3.2 Auswertung und Interpretation der Interviews

Zu Beginn dieses Kapitels werden zunächst die unterschiedlichen Begriffsverständnisse der Experten dargestellt und geklärt, bevor dann die Ergebnisse beschrieben und interpretiert werden. Im Zuge der Durchführung der Experteninterviews wurde zunächst das initiale Begriffsverständnis der Experten zum Begriff Application Layer sowie die in den jeweiligen Unternehmen verwendeten Anwendungen und Protokolle abgefragt. Eine Übersicht dazu ist in Tabelle 5 zusammengefasst. Hier zeigt sich, dass die Unternehmen verwenden die Protokolle teilweise für einseitige (Experten 2, 5 und 7) und teilweise für bidirektionale Kommunikation (Experte 1, 3 und 4) mit den Sensoren nutzen.

Ex- perte	Sicht auf Application Layer	Anwendung	Protokoll	Kommunika- tionsweg
1	Oberhalb der Cloud hin zur Applikation	Webanwendung (Datenportal)	RestAPI über HTTPS	bidirektionale Kommunika- tion
2	Oberhalb der Cloud hin zur Applikation	Webanwendung (Datenportal)	OPC-UA, RestAPI	einseitige Kommunika- tion

Ex- perte	Sicht auf Application Layer	Anwendung	Protokoll	Kommunika- tionsweg
3	Oberhalb der Ma- schine zur Kundenan- wendung	Cloud, MES, SCADA (vom Kun- den)	OPC-UA	bidirektionale Kommunika- tion
4	Von der Maschine bis zu SCADA	Maschine, Cloud, SCADA	OPC-UA over TSN	bidirektionale Kommunika- tion
5	von den digitalen Ser- vices zur Kundenan- wendung	digitale Services, Kundenanwendung	RestAPI	einseitige Kommunika- tion
6	Oberhalb der Cloud hin zur Applikation	ERP-, MES-Sys- tem, Varianten- und Konfigurationsma- nagement	AMQP, Rest	einseitige Kommunika- tion
7	Oberhalb des ERP- Systems zur Applika- tion	MES-System	RFC	einseitige Kommunika- tion

Tabelle 5: Beschreibung und Auswertung der Unternehmenssituation (eigene Darstellung)

3.2.1 Hypothesenbezogene Auswertung der Ergebnisse

Hypothese 1: Die Verfügbarkeit bzw. der Einsatz von IoT-Geräten sind in den Unternehmen gegeben.

Den Aussagen der Experten 2, 3 und 5 zufolge befinden sich die Unternehmen mit der Entwicklung von IoT-basierten Geräten im Anfangsstadium. Experte 1 betont, dass sein Unternehmen bereits lange im Sinne von IoT handelt. Ähnliches wird von Experte 4 angebracht, der darauf hinweist, dass die Produktionsstandorte des Unternehmens bereits seit langem einen hohen Digitalisierungsgrad aufweisen und zum Beispiel Digital Twins einsetzen. Experte 6 gibt an, dass ein wissensbasiertes Konfigurationsmanagement, um strukturierte Daten an die Maschine zu bringen, eingesetzt wird. Im Unternehmen von Experte 7 wird die Kommunikation mit Sensoren über Steuergeräte sichergestellt. Die Hypothese lässt sich für drei Unternehmen nur teilweise bestätigen, da sich diese noch am Anfang der Entwicklung befinden. Für zwei Unternehmen lässt sich die Hypothese vollständig verifizieren.

Hypothese 2: Es existieren klar definierte Parameter zur Auswahl von Protokollen der Application Layer.

Für die Auswahl von Protokollen der Application Layer werden verschiedene Entscheidungsparameter genannt, welche anwendungsabhängig sind und dem Entscheidungsprozess dienen. Tabelle 6 führt die genannten Entscheidungsparameter für die Protokollauswahl der Application Layer mit einer Zugehörigkeit der Experten auf.

Experte	1	2	3	4	5	6	7
Entscheidungsparameter							
Schnelle Entscheidungsfindung (Kostenminimierung)	X						
Erfüllung der vordefinierten Anforderungen		X					
Integrierbarkeit in bestehende Systeme	X	X	X				
Marktakzeptanz des Protokolls		X					
Marktdurchdringung des Protokolls		X	X		X		
Datenrate/Datendurchsatz		X					
Zykluszeit		X					
Kosten		X	X				
Einfachheit			X				
Zukunftsfähigkeit		X					
Zuverlässigkeit						X	
Flexibilität						X	
Sicherheit und Datenschutz						X	
Frequenz							X
Datenvolumen							X
Feedback							X
Aktualität des Interfaces							X

Tabelle 6: Entscheidungsparameter zur Protokollauswahl der Application Layer
(eigene Darstellung)

Auffällig hierbei ist, dass Integrierbarkeit in bestehende Systeme, Marktdurchdringung des Protokolls und Kosten von mehreren Experten genannt werden, die verschiedene Anwendungen mit den Protokollen bedienen. Als marktbezogene Attribute lassen sich Marktakzeptanz des Protokolls, Marktdurchdringung des Protokolls, Kosten, Sicherheit und Datenschutz zusammenfassen. Trotzdem kann die Hypothese nicht vollständig bestätigt werden, da zwei befragte Experten angeben, dass sie das verwendete Protokoll vom Kunden vorgegeben bekommen und es vom Anwendungsfall abhängt und so keine allgemein gültigen Entscheidungsparameter zur Protokollauswahl der Application Layer existieren.

Hypothese 3: Es existieren strukturierte Entscheidungsregeln zur Auswahl von Protokollen der Application Layer.

Experte 2 beschreibt explizit eine Reihenfolge zur Berücksichtigung von Entscheidungsparametern: (1) Erfüllung der Anforderungen, (2) Technische Umsetzbarkeit, (3) Marktakzeptanz des Protokolls, (4) Marktdurchdringung des Protokolls, (5) Marktverfügbarkeit des Protokolls, (6) Kosten des Protokolls. Allerdings handelt es sich bei der Entscheidungsregel nicht um einen institutionalisierten Prozess im Unternehmen. Die anderen teilnehmenden Experten können keine Entscheidungsregeln nennen. Zum einen aus dem Grund, dass sie die zu verwendenden Protokolle vom Kunden vorgegeben bekommen und zum anderen, dass die Auswahl in den bisherigen Anwendungsfällen alternativlos war. Trotzdem werden grundsätzlich Kosten von den Experten bei der Protokollauswahl der Application Layer als nebensächlich bezeichnet, wichtig ist nach den Meinungen der Experten 2 und 7 die technische Umsetzbarkeit. Anhand der aufgeführten Argumentation muss die Hypothese zur Existenz von Entscheidungsregeln zur Protokollauswahl der Application Layer verworfen werden.

Hypothese 4: Es werden verschiedene Protokolle der Application Layer für unterschiedliche Projekte genutzt.

Für den Anwendungsfall einer Webapplikation wird im Unternehmen von Experte 1 RestAPI eingesetzt, da hierzu kein alternatives Protokoll besteht. Das verwendete Protokoll ist nach den Meinungen der Experten 3 und 4 kundenabhängig, somit können verschiedene Protokolle bei unterschiedlichen Projekten/Produkten verwendet werden. Der Kunde entscheidet bzw. gibt vor, welches Protokoll er für die Application Layer einsetzen möchte. Experte 2 und 5 argumentieren, dass für ihr Produkt nur ein Protokoll genutzt wird, es sei denn der Kunde wünscht ein anderes Protokoll, so wird es speziell für ihn neu implementiert. Das Unternehmen von Experte 6 nutzt verschiedene Protokolle der Application Layer, um in der eigenen Produktion Daten an eine Maschine zu senden. Die Hypothese kann dahingehend verifiziert werden, dass der Kunde basierend auf seinen Anwendungen und Systemen das Protokoll für die Application Layer auswählt.

Hypothese 5: Interne Anforderungen werden für die Protokollauswahl der Application Layer berücksichtigt.

Die internen Anforderungen, die von den Experten genannt werden, sind in der folgenden Tabelle 7 aufgeführt.

Experte	1	2	3	4	5	6	7
Interne Anforderungen							
Zykluszeit		X			X		
Datendurchsatz		X					
Integrierbarkeit		X					
Schnittstellenbedienung von Produkt und Prozessor		X					
Ausreichende Rechenleistung		X					
Langlebigkeit der Batterie		X					
Energieverbrauch		X					
Störfestigkeit und Störsicherheit		X					
Sicherheit und Datenschutz					X		X
Zuverlässigkeit					X		
Beschränkungen in der Teilnehmerzahl					X		
Manuelle Nacharbeit/Aufwand der Schnittstellenwartung							X
Supportfähigkeit der Schnittstelle							X
Erfüllung der Softwareanforderungen							X
Einfache Bereitstellung							X
Übertragungsgeschwindigkeit							X
Frequenz							X
Datenvolumen							X

Tabelle 7: Interne Anforderungen an das Protokoll der Application Layer (eigene Darstellung)

Wie bei den internen Anforderungen zu erkennen ist, wird die Zykluszeit sowie Sicherheit und Datenschutz als interne Anforderung von jeweils zwei Experten genannt. Alle anderen internen Anforderungen werden nur einfach genannt. Allerdings nennen die Experten 1, 3, 4 und 6 keine internen Anforderungen an das Protokoll der Application Layer, da die Protokollauswahl in den bisherigen Entscheidungssituationen eher beschränkt. Die Hypothese zur Berücksichtigung von internen Anforderungen kann bestätigt werden.

Hypothese 6: Kundenanforderungen werden bei der Protokollauswahl der Application Layer berücksichtigt.

Externe Anforderungen bzw. Kundenanforderungen werden bei den Interviews mit der Integrierbarkeit in ein bestehendes System beim Kunden und entstehenden Zusatzkosten genannt. Dementsprechend lässt sich die Hypothese bestätigen.

Hypothese 7: Technische Aspekte werden bei der Auswahl von Protokollen der Application Layer berücksichtigt.

Die Experten 2 und 5 können explizit technische Aspekte zur Protokollauswahl der Application Layer nennen. Hierzu zählen die Störfestigkeit und Störsicherheit, die Zykluszeit sowie die Beschränkungen in der Teilnehmerzahl. Die Hypothese kann bestätigt werden.

Hypothese 8: Bei der Protokollauswahl der Application Layer wird auf ökonomische Anforderungen eingegangen.

Grundsätzlich werden sowohl lizenzierte Protokolle (Experte 7) als auch kostenlose Protokolle wie zum Beispiel RestAPI (Experte 1) angewendet. Experte 3 beschreibt die ökonomischen Anforderungen als Aufwandskosten in der Programmierung oder Anpassungskosten sowie Kosten für benötigte Schnittstellenmodule. Weitere Kosten sind in der Durchführung mittels einer Cloud oder On-Premise bedingt. Die Hypothese ist zu bestätigen. Allerdings muss die Aussage dahingehend abgeschwächt werden, dass die Kosten bei der Protokollauswahl nach der Meinung der Experten 2 und 7 eher nachgeordnet zur technischen Umsetzbarkeit sind.

Hypothese 9: Die Übertragungsart ist relevant für die Auswahl von Protokollen der Application Layer.

Vier Experten nutzen für ihre Produkte eine kabelgebundene Variante. Experte 4 trifft keine Aussage über die Übertragungsart. Er merkt an dieser Stelle an, dass hier bei den Echtzeit-Protokollen eine Unterscheidung vorgenommen werden muss. Für eine Echtzeit-Übertragung ist eine kabelgebundene Variante besser geeignet. Die kabelgebundene Form ist weniger störungsanfällig und sicherheitsunkritischer als die Funk-Variante. Im Unternehmen von Experte 6 wird eine kabellose Variante bevorzugt, da es für seinen beschriebenen Anwendungsfall besser geeignet ist. Zwei Experten sind der Ansicht, dass die Übertragungsart auf der Netzwerkebene zu bestimmen ist. Zu den Übertragungsarten zählt z. B. WLAN, welches Experte 6 einsetzt. Die Forschungshypothese ist zu verwerfen.

Hypothese 10: Es existieren unterschiedliche Protokolle für die Application Layer.

Bei der unternehmensbezogenen Auswertung wird ersichtlich, dass die einzelnen Unternehmen verschiedene Anwendungen mit diversen Protokollen bedienen. Tabelle 8 zeigt eine Zusammenfassung der eingesetzten Protokolle mit Bezug zur Application Layer.

Eingesetztes Protokoll	Anwendung	Experten
RestAPI	Webapplikation (Dashboard)	1, 2, 5
OPC-UA	ERP-System	2
	Dashboard	2
	Cloud	3
	MES-System	3
	SCADA	3
OPC-UA over TSN	Sensoren/Aktoren	4
	Prozessleitsystem	
AMQP	Asynchrone Anwendung (Cloud, Black-box)	6
REST/AMQP	Synchrone Anwendung	6
RFC	Anbindung von ERP-System an ein MES-System	7

Tabelle 8: Eingesetzte Protokolle und deren Anwendung mit Bezug zur Application Layer (eigene Darstellung)

Die Auswertung der Interviews zeigt, dass für Webanwendungen RestAPI genutzt wird, unabhängig von Branche sowie systembereitstellende und -anwendende Unternehmen. OPC-UA wird von drei Experten mit Verweis auf die Zukunftsfähigkeit und dem hohen Bekanntheitsgrad genannt, welches als Protokoll für die Application Layer eingesetzt wird. Ähnlich äußert sich Experte 2. Allerdings kritisiert Experte 6, dass OPC-UA zu langsam für seine Anwendung ist und somit nicht eingesetzt werden kann. Die Hypothese zu verschiedenen Protokollen der Application Layer lässt sich belegen.

Hypothese 11: Es werden Daten in ein Planungssystem und/oder Anwendungssystem eingebettet.

Die Experten beschreiben zahlreiche Sensordaten, die auf Application Layer in Dashboards von Business Intelligence Software oder in ERP- und MES-Systeme integriert werden. Typische Verwendungszwecke der Daten sind zum Beispiel Optimierbarkeit, Erkenntnisse über den Zustand der Komponente sowie Analyse von Maschinenproblemen und Fehlersuche. Die Hypothese ist dementsprechend zu bestätigen.

3.2.2 Interpretation der Ergebnisse

Hypothesenbezogene Interpretation

Ein Grund für die teilweise Verifizierung von *Hypothese 1*, den fehlenden Einsatz bzw. die fehlende Verfügbarkeit von IoT-basierten Geräten, ist, dass die Digitalisierung mit einem Kostenaufwand verbunden ist, sodass nach Meinung von Experte 4 Digitalisierungsaktivitäten für klein- und mittelständische Unternehmen häufig unrentabel sind. (Ott und Dobhan, 2020, S. 225) Gleichzeitig bietet sich die Chance zur Optimierung der Geschäftsprozesse. Durch den Einsatz von IoT-Geräten können z. B. nutzungsabhängige Wartungsverträge abgeschlossen, Geschäftsanalysen und Produktoptimierungen durchgeführt werden, wodurch Einnahmen generiert werden können. Historische Daten können für Reklamationsbewertungen herangezogen werden. Wird diese Situation dem Gartner Hype Cycle gegenübergestellt, so hat das Institut bereits 2015 die IoT-Plattform als Innovation Trigger bezeichnet. (Gartner, Inc., 2015) Im weiteren Verlauf wird deutlich, dass diese im Jahr 2018 den Höhepunkt der Erwartung überwunden hat und sie auf dem Weg zur Desillusionierung ist. (Gartner, Inc., 2018) Der Vergleich zeigt, dass das Thema „IoT-Plattformen“ in der Allgemeinheit höhere Aufmerksamkeiten und Erwartungen erzielen als die Entwicklung bisher erfüllen konnte. Allerdings zeigt die Auflistung der Vor- und Nachteile bezüglich der Verfügbarkeit bzw. des Einsatzes von IoT-Geräten, dass die Experten hier deutlich mehr Vorteile sehen.

Zu *Hypothese 2* nennen die Experten verschiedene Entscheidungsparameter, die für ihren Anwendungsfall relevant sind. Die Interviews zeigen, dass die Entscheidungsparameter für die Protokollauswahl der Application Layer abhängig von der anzuwendenden Applikation ist, da auf Grund von verschiedenen Anforderungen verschiedene Parameter wichtig für den Einsatz des jeweiligen Protokolls sind. Daher lassen sich keine klar definierten allgemein gültigen Entscheidungsparameter für alle Anwendungen definieren. Yassein *et al.* (2016), Salman und Jain (2017) stellen dazu fest, dass die Protokollauswahl der Application Layer anwendungsgetrieben stattfinden muss. Diese Aussagen können durch die durchgeführten Experteninterviews bestätigt werden. Auffallend ist, dass drei Experten (2, 3, 7) die Anforderungen für das Protokoll der Application Layer extern vorgegeben bekommen. Hier wird ein fehlender Standard deutlich, den auch Elhadi *et al.* (2018) und Salazar Ch. *et al.* (2018) nennen. Diese Erkenntnis bestätigt sich auch in den Experteninterviews. Der Ansicht von Experte 2 zufolge existiert keine einheitliche Architektur. Fehlende herstellerübergreifende Kommunikationsstandards werden von Experte 4 kritisiert. Ebenfalls auffällig ist, dass die Experten wenige Entscheidungsparameter nennen und nur drei davon (Integrierbarkeit in bestehende Systeme, Marktdurchdringung und Kosten)

mehrfach, sodass hier davon auszugehen ist, dass die Experten die Protokolle der Application Layer eher situativ und spontan auswählen.

Die fehlende Klarheit hinsichtlich der Entscheidungsparameter wirkt sich auch auf die Entscheidungsregeln (*Hypothese 3*) aus. Hier lassen sich gleichermaßen keine allgemein gültigen Entscheidungsregeln identifizieren. Allerdings zeigen sich auch Ansätze von individuellen Entscheidungsregeln. Die Entscheidung wird individuell durch die betroffenen Fachbereiche in Zusammenarbeit mit dem Kunden formuliert und so der größtmögliche Nutzen für beide Parteien zu erzielen versucht. Experte 2 nennt Entscheidungsregeln und führt auf, dass Kosten betrachtet werden sollten. Bei den Experten 2 und 7 stehen die technische Umsetzbarkeit und Funktionalität ihres Produktes im Vordergrund. Basierend auf den Ergebnissen kann festgestellt werden, dass ein Protokoll kostengünstig integriert werden kann, dies aber zwecklos ist, wenn eventuell die technischen Anforderungen nicht erfüllt sind.

Hypothese 4 ist bestätigt, da die Experten angeben, dass die Protokollauswahl der Application Layer oftmals kundenorientiert stattfindet. Jeder Kunde erhält das für ihn bestmögliche Protokoll für seinen Anwendungsfall, sodass als Folge hieraus mehrere Protokolle für verschiedene Projekte zum Einsatz kommen können. Besonders betont Experte 4, dass der Kunde durch die modularen Produkte selbständig eine Entscheidung über das für seine Anwendung passende Protokoll treffen kann. Die Experteninterviews zeigen, dass verschiedene Anwendungen mit verschiedenen Protokollen bedient werden können. Durch diese vielfältige Aufstellung der Produkte können diese bei unterschiedlichen Anwendungskontexten zum Einsatz kommen und einfacher in bestehende Systeme integriert werden. Der Einsatz von verschiedenen Protokollen zeigt, dass sich die Unternehmen mit dem Thema „Protokoll“ in der Praxis eine Rolle spielt.

Tabelle 7 zeigt eine Aufstellung der von den Experten genannten Anforderungen bei der Protokollauswahl (*Hypothese 5*). Die Anforderungen sind anwendungsabhängig, sodass diese zu einer Sammlung zusammengefasst werden können. Sicherheit und Datenschutz ist unabhängig von der Anwendung relevant, da diese von mehreren Experten genannt werden, die Erfahrungen mit verschiedenen Applikationen besitzen.

Wichtig für den Kunden ist die einfache Integrierbarkeit neuer Maschinen/Produkte in die bestehende Systemlandschaft, um hohe Folgekosten zu vermeiden (*Hypothese 6*). Ein nicht integrierbares Protokoll hat zur Folge, dass das Unternehmen Produktionsausfälle zu verzeichnen hat und mehr Mitarbeiter benötigt bzw. geschult werden müssen, um sich mit den geänderten Gegebenheiten auszukennen. Eine Schulung für Mitarbeiter ist ebenfalls relevant für anschließende Support- und Wartungsarbeiten. Für die Anbindung werden weitere Techniken und Schnittstellen benötigt, sodass nicht nur hinsichtlich der Mitarbeiter die Folgekosten steigen. Daher ist es richtig,

dass Kundenanforderungen bei der Protokollauswahl der Application Layer berücksichtigt werden. Bei einem Entscheidungsmodell zur Protokollauswahl der Application Layer können diese Anforderungen der Entscheidungsfindung dienen.

Die Berücksichtigung von technischen Aspekten bei der Protokollauswahl der Application Layer (*Hypothese 7*) ist notwendig, um die Funktionsfähigkeit der Produkte zu garantieren. Technische Anforderungen (z.B. Störfestigkeit und Störsicherheit, Zykluszeit, Beschränkungen in der Teilnehmerzahl) werden spezifiziert, um das Produkt bestmöglich zu entwickeln. Die technischen Aspekte können bei einem Entscheidungsmodell zur Protokollauswahl der Application Layer helfen.

Auffällig bei *Hypothese 8* sind die verschiedenen Angaben zu ökonomischen Anforderungen, die bei der Protokollauswahl der Application Layer berücksichtigt werden. Die Experten 1, 2 und 5 nutzen ein kostenloses Protokoll (RestAPI), Experte 7 arbeitet mit einem kostenpflichtigen Protokoll (RFC), da das genutzte ERP-System lizenziert und der gleiche Lizenzgeber ebenfalls für RFC verantwortlich ist. Die ökonomischen Anforderungen sind somit ebenfalls anwendungsabhängig zu betrachten. Zu den ökonomischen Anforderungen zählen auch Programmieraufwände, zusätzliche Schnittstellen, Technologien und Schulungen bestehender Mitarbeiter. Wie schon die internen Anforderungen, Kundenanforderungen und technische Anforderungen sollten auch die ökonomischen Anforderungen an ein Protokoll der Application Layer bei einem Entscheidungsmodell berücksichtigt werden.

Die *Hypothese 9* wurde verworfen, da die Übertragungsart auf der Netzwerkebene entschieden wird und somit irrelevant für die Protokollauswahl der Application Layer ist. Dies stimmt mit der Literatur (Elhadi *et al.*, 2018; Sethi und Sarangi, 2017) überein. Für eine kabellose Übertragung kann z. B. Bluetooth oder WLAN genutzt werden. Auf der Netzwerkschicht entscheidet sich u. a. auch die Reichweite. (Elhadi *et al.*, 2018)

Die Experten nennen in den Interviews verschiedene Protokolle für unterschiedliche Anwendungsfälle, die auf der Application Layer zum Einsatz kommen (*Hypothese 10*). Diese verschiedenen Anwendungsfälle sind bei der Beantwortung der Forschungshypothesen einzubeziehen. Das Ergebnis aus den Experteninterviews lässt sich mit verschiedener Literatur belegen u. a. Elhadi *et al.* (2018) und Sethi und Sarangi (2017). OPC-UA wird für verschiedene Anwendungen eingesetzt. Allerdings findet es sich nicht in der Liste der wichtigsten Protokolle von Elhadi *et al.* (2018) und Al-Fuqaha *et al.* (2015) wieder. Hier ist eine Differenz zwischen Theorie und Praxis sowie einen fehlenden Standard zu erkennen. Nach der Meinung verschiedener Experten (2, 4) wird sich OPC-UA als Standard in der Maschinenkommunikation durchsetzen. Die Differenz zwischen Theorie und Praxis lässt sich dadurch erklären, dass verschiedene Anwendungen untersucht sind. In der Literatur wie auch bei den

Experten wird bspw. OPC-UA und RestAPI sowohl als Architektur bzw. Datenmodellierung und auch als Protokoll angesehen.

Hypothese 11 ist bestätigt, da verschiedene Planungssysteme und/oder Anwendungssysteme von den Experten genannt werden. Durch den Einsatz von verschiedenen Systemen lassen sich die Unternehmensgeschäfte vielfältiger aufstellen, der Umsatz steigern und ein größerer Benefit für Kunden erreichen. Dieses Forschungsergebnis steht im Einklang mit Tavana *et al.* (2020). Die Experten nutzen die verschiedenen gesammelten Daten, um unterschiedliche Verwendungszwecke abzudecken, daher ist es wichtig, dass die Daten in Planungs- und/oder Anwendungssysteme eingebettet werden.

Übergreifende Interpretation

Insgesamt zeigen die Experteninterviews, dass (IoT)-Protokolle in verschiedene Interessensgruppen und Branchen relevant sind. Die Verfügbarkeit und der Einsatz von IoT-Geräten sind in den befragten Unternehmen gegeben, auch wenn sich diese zum Teil noch am Anfang der Entwicklung befinden. Hierfür müssen zudem Protokolle für die Application Layer ausgesucht werden. Hinsichtlich des Vorgehens und der Entscheidungsparameter bei der Protokollauswahl ergibt sich kein klares Bild. Die Liste der genannten Entscheidungsparameter ist relativ kurz. Entsprechend können auch keine direkten klar formulierten Entscheidungsregeln abgeleitet werden.

Ein Entscheidungsmodell mit Regeln und Parametern kann die Entscheidungssituation strukturieren. Die Entscheidungsparameter können z. B. verschieden gewichtet werden, sodass anhand der Entscheidungsregeln und mit Hilfe eines Entscheidungsmodells eine Auswahl für das Protokoll der Application Layer getroffen werden kann. Auf der einen Seite können die Experten keine strukturierten Entscheidungsregeln nennen, nach denen sie das Protokoll für die Application Layer aussuchen. Auf der anderen Seite existieren verschiedene Protokolle, die auf der Application Layer Anwendung finden. Diese beiden sich widersprechenden Ergebnisse deuten auf eher intuitive, situative Entscheidungen hin. Abhängig vom Anwendungsfall scheinen interne und externe sowie technische Anforderungen bei der Protokollauswahl der Application Layer von Bedeutung.

Die Ergebnisse bestätigen den Konferenzbeitrag von Yassein *et al.* (2016), dass die jeweiligen Anwendungen verschiedene Anforderungen bedingen. Als Schlussfolgerung hieraus haben Yassein *et al.* (2016) festgestellt, dass verschiedene Anwendungen mit verschiedenen Protokollen zu bedienen sind. Diese Aussage stimmt mit dem Ergebnis der Hypothese 4 überein. Durch den Einsatz von mehreren Protokollen steigen die Kosten. Wie Experte 3 feststellt, sind hier Programmieraufwandskosten, Anpassungskosten und benötigte Schnittstellenmodule aufzuführen. Unterschiedliche Kosten sind bei Cloud- oder On-Premise-Lösungen zu erwarten. Kosten können hier

z. B. für das Speichern der Daten in der Cloud anfallen. Bei einer On-Premise-Lösung ist das Unternehmen für eine lokale Speicherung verantwortlich, sodass hier Kosten für eine Serverlandschaft/Infrastruktur und Unterhaltskosten entstehen. Das Unternehmen muss währenddessen u. a. auf Sicherheit und Datenschutz eingehen.

Limitationen

Abbildung 4 zeigt eine Zusammenfassung der einzelnen Kodierungen (Codes) zu den jeweiligen Interviews. Die Größe der Quadrate beschreibt, wie häufig der einzelne Code in dem Interview verwendet wird. Zum Beispiel ist das Quadrat des Codes „Entscheidungsparameter“ bei Experte 1 verhältnismäßig klein im Vergleich zu Experte 6. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass Experte 6 mehr zum Entscheidungsprozess der Protokollauswahl auf der Application Layer und den dazugehörigen Entscheidungsparametern beitragen kann.

Ein möglicher Rückschluss ist, dass die Unternehmen verschiedene Anwendungen anbieten. Zudem kann fehlendes Wissen über Themengebiete und die Vorgabe von Protokollen der Application Layer durch den (internen oder externen) Kunden eine mögliche Ursache sein.

Bei den Interviews sind Experten aus verschiedenen Bereichen und Branchen ausgewählt worden, was eine Ursache für die Heterogenität der Ergebnisse sein kann. Zum Beispiel wird für eine Webapplikation ein anderes Protokoll mit anderen Eigenschaften ausgewählt als für die Datenintegration in ein MES-System. Auf der anderen Seite war es nur so möglich, dem ursprünglichen Ziel einen breiten Einblick in das Gebiet der Protokollauswahl zu erlangen.

Die COVID-19-Pandemie führte zudem zu einer Einschränkung bei der Durchführung der Experteninterviews. Vorgesehen waren persönlich durchgeführte Interviews in den Unternehmen der Experten, die grundsätzlich eine bessere Wahrnehmung des Sichtweisen Experten ermöglicht. Als Alternative sind die Interviews online mit Hilfe der Softwares „Zoom“, „Microsoft Teams“ und „GoToMeeting“ durchgeführt worden.

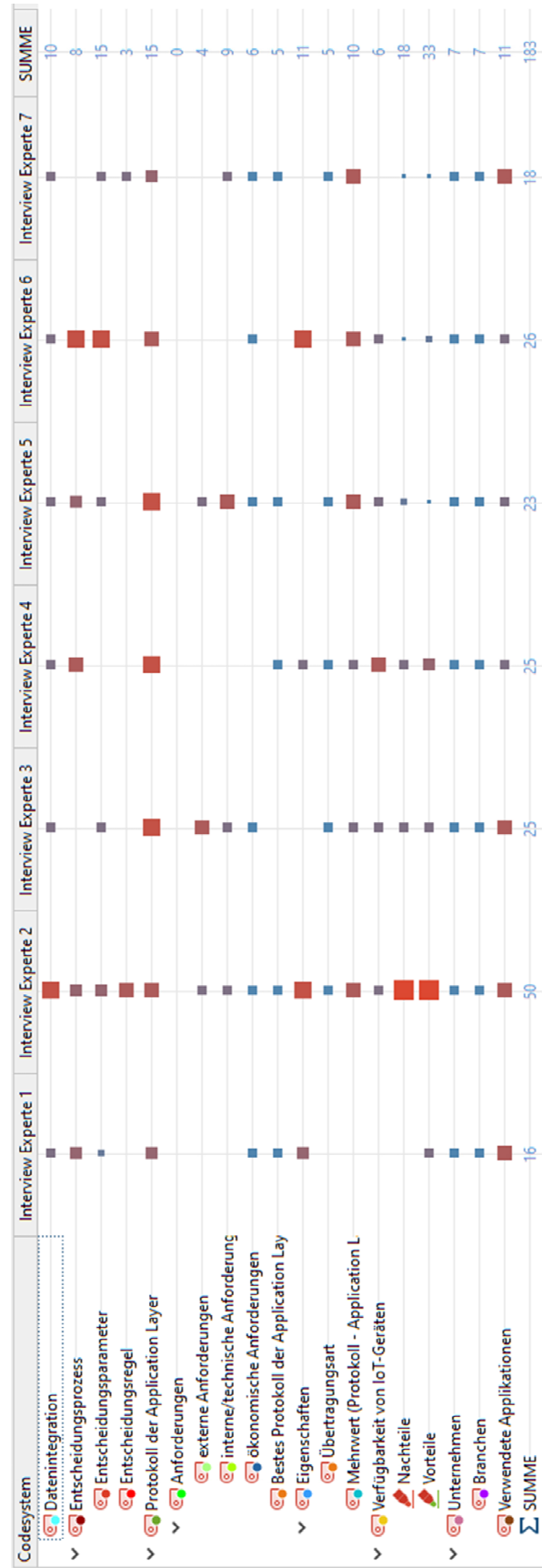


Abbildung 4: Zusammenfassung der Codes (eigene Darstellung)

4 Zusammenfassung und Fazit

In dieser Arbeit wurde der Entscheidungsprozess zur Protokollauswahl auf der Application Layer mit den dazugehörigen Entscheidungsparametern untersucht. Hierfür ist die Methode der Experteninterviews und eine qualitative Inhaltsanalyse verwendet worden. Ziel der Untersuchung war es, mit Hilfe eines halbstrukturierten Leitfadens Experteninterviews durchzuführen, um Erkenntnisse und ein Verständnis über den Entscheidungsprozess zur Protokollauswahl der Application Layer und die Entscheidungsparameter zu erlangen. Diese Zielsetzung ist zum Teil erreicht, da grundsätzlich Entscheidungsparameter identifiziert werden können. Allerdings besteht bei den befragten Experten kein klar definierter Entscheidungsprozess zur Protokollauswahl der Application Layer. Somit kann die Forschungsfrage nicht vollständig beantwortet werden.

In den Unternehmen der befragten Experten werden verschiedene Protokolle der Application Layer für unterschiedliche Projekte genutzt, sodass Protokolle im Rahmen von Projekten von Bedeutung sind. Durch die Untersuchung lassen sich neue Erkenntnisse zu Entscheidungsparametern der Protokollauswahl der Application Layer gewinnen. Hier ist eine Liste möglicher Entscheidungsparametern zu nennen, wenn gleich systematische Entscheidungsregeln nur bedingt identifiziert werden konnten. Darüber hinaus bestätigen die Ergebnisse dieser Untersuchung die Erkenntnisse der Literatur (Elhadi *et al.*, 2018; Salazar Ch. *et al.*, 2018) weitgehend, dass bei der Protokollauswahl der Application Layer weiterhin ein Standard fehlt und deshalb ein Protokollauswahlprozess grundsätzlich notwendig ist.

Weiterführende Forschungsarbeiten können aufbauend auf diesen Ergebnissen ein Entscheidungsmodell entwickeln, indem die identifizierten Entscheidungsparameter einer anwendungsspezifischen Gewichtung unterzogen werden. Im Anschluss können die zur Verfügung stehenden Protokolle eingeordnet werden. Anhand von Entscheidungsregeln wird festgelegt, in welcher Reihenfolge welche Aspekte geprüft werden sollen. Außerdem sollte die in dieser Arbeit vorgenommene Beschränkung auf die Application Layer ausgeweitet werden. Vor allem im Hinblick auf den Protokolleinsatz in der Middleware besteht hier noch Forschungsbedarf.

Dieser Forschungsarbeiten fanden im Rahmen des Projektes OberA aus dem FuE-Programm "Informations- und Kommunikationstechnik" des bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft, Energie und Technologie (IUK-1709-0011//IUK530/010), eingereicht durch die Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt (FHWS), statt.

5 Literaturverzeichnis

- Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M. und Ayyash, M. (2015): „Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications“, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Bd. 17, Nr. 4, S. 2347–2376.
- Atzori, L., Iera, A. und Morabito, G. (2010): „The Internet of Things: A survey“, Computer Networks, Bd. 54, Nr. 15, S. 2787–2805.
- Bandyopadhyay, S., Sengupta, M., Maiti, S. und Dutta, S. (2011), „Role Of Middleware For Internet Of Things: A Study“, International Journal of Computer Science & Engineering Survey, Bd. 2 Nr. 3, S. 94–105.
- Becker, J., Knackstedt, R., Pfeiffer, D. und Janiesch, C. (2007): „Configurative method engineering-on the applicability of reference modeling mechanisms in method engineering“. In Hoxmeier, J. A. und Hayne, S. (Hg.), Reaching new heights: 13th Americas Conference on Information Systems, AMCIS 2007, Keystone, CO, USA, 09.-12.08.2007, Association for Information Systems, Atlanta, GA, USA, S. 3399–3410.
- Bogner, A., Littig, B. und Menz, W. (2014): „Interviews mit Experten: Eine praxisorientierte Einführung“, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- Cereda, P. R. M. und Neto, J. J. (2017), „A middleware architecture for adaptive devices“, Vortrag während International workshop on Adaptive Technology (WAT 2017), Madeira, Portugal, 16.-19.05.2017. Procedia Computer Science, Bd. 109, S. 1158–1163.
- Chaqfeh, M. A. und Mohamed, N. (2012), „Challenges in middleware solutions for the internet of things“, in Sloot, P. (Hg.), “2012 International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS)”, Denver, 21.-25.05.2012, IEEE, Piscataway, NJ, USA, S. 21–26.
- Cruz, M. A. A. da, Rodrigues, J. J. P. C., Al-Muhtadi, J., Korotaev, V. V. und Albuquerque, V. H. C. de (2018), „A Reference Model for Internet of Things Middleware“, IEEE Internet of Things Journal, Bd. 5 Nr. 2, S. 871–883.
- Diaz, M., Rubio, B. und Troya, J. M. (2005), „A Coordination Middleware for Wireless Sensor Networks“, in Dini, P., Lorenz, P., Cherkaoui, S., Mynbaev, D., Rodrigues, J. J., Hafid, A., Zepernick, H.-J. und Zheng, J. (Hg.), 2005 Systems Communications (ICW'05, ICHSN'05, ICMCS'05, SENET'05), Montreal, Canada, 14.-17.08.2005, IEEE Computer Society, Los Alamitos, CA, USA, S. 377–382.
- Dresing, T. und Pehl, T. (2010): „Transkription“. In Mey, G. und Mruck, K. (Hg.), Handbuch Qualitative Forschung in der Psychologie, 1. Aufl., VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, S. 723–733.

- Elhadi, S., Marzak, A. und Sael, N. (2019): „Operating models of application protocols“. In Mohamed, B. A., Karaşo, İ. R., Saadane, R., Mtalaa, W. und Abdelhakim, B. A. (Hg.), Proceedings of the 4th International Conference on Smart City Applications - SCA '19, Casablanca, Marokko, 02.-04.10.2019, ACM Press, New York, USA, S. 1–7.
- Elhadi, S., Marzak, A., Sael, N. und Merzouk, S. (2018): „Comparative Study of IoT Protocols“. In Hamlich, M. (Hg.), The 2nd international conference on Smart Application and Data Analysis for Smart Cities (SADASC'18), Casablanca, Marokko, 27.-28.02.2018, Elsevier, Amsterdam, Niederlande.
- Eugster, P. T., Felber, P. A., Guerraoui, R. und Kermarrec, A.-M. (2003): „The many faces of publish/subscribe“, ACM Computing Surveys, Bd. 35, Nr. 2, S. 114–131.
- Farahzadi, A., Shams, P., Rezazadeh, J. und Farahbakhsh, R. (2018), „Middleware technologies for cloud of things: a survey“, Digital Communications and Networks, Bd. 4 Nr. 3, S. 176–188.
- Fersi, G. (2015), „Middleware for Internet of Things: A Study“, in O'Conner, L. (Hg.), 2015 International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS), Fortaleza, Brasilien, 10.-12.06.2015, IEEE, Los Alamitos, CA, USA, S. 230–235.
- Fettke, P. (2009), „How Conceptual Modeling Is Used“, Communications of the Association for Information Systems, Bd. 25 Nr. 43, S. 571–592.
- Fettke, P. und Loos, P. (2003): „Classification of reference models: a methodology and its application“, Information Systems and e-Business Management, Bd. 1, Nr. 1, S. 35–53.
- Fettke, P. und Loos, P. (2004), „Referenzmodellierungsforschung“, Wirtschaftsinformatik, Bd. 46 Nr. 5, S. 331–340.
- Gartner, Inc. (2015): „Gartner's 2015 Hype Cycle for Emerging Technologies Identifies the Computing Innovations That Organizations Should Monitor“, verfügbar unter <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2015-08-18-gartners-2015-hype-cycle-for-emerging-technologies-identifies-the-computing-innovations-that-organizations-should-monitor> (abgerufen am 6. Oktober 2020).
- Gartner, Inc. (2018): „Gartner Identifies Five Emerging Technology Trends That Will Blur the Lines Between Human and Machine“, verfügbar unter <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2018-08-20-gartner-identifies-five-emerging-technology-trends-that-will-blur-the-lines-between-human-and-machine> (abgerufen am 6. Oktober 2020).

- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S. und Palaniswami, M. (2013), „Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions“, *Future Generation Computer Systems*, Bd. 29 Nr. 7, S. 1645-1660.
- Guth, J., Breitenbücher, U., Falkenthal, M., Fremantle, P., Kopp, O., Leymann, F. und Reinfurt, L. (2018), „A Detailed Analysis of IoT Platform Architectures: Concepts, Similarities, and Differences“, in Di Martino, B., Li, K.-C., Yang, L. T. und Esposito, A. (Hg.), *Internet of Everything: Algorithms, Methodologies, Technologies and Perspectives*, Internet of Things, Technology, Communications and Computing, Bd. 54, Springer Nature Singapore Pte Ltd., Singapur, S. 81–101.
- Guth, J., Breitenbucher, U., Falkenthal, M., Leymann, F. und Reinfurt, L. (2016): „Comparison of IoT platform architectures: A field study based on a reference architecture“, *2016 Cloudification of the Internet of Things (CIoT)*, Paris, Frankreich, 23.-25.11.2016, IEEE Communications Society, Piscataway, NJ, USA, S. 1–6.
- Heinzelman, W. B., Murphy, A. L., Carvalho, H. S. und Perillo, M. A. (2004), „Middleware to support sensor network applications“, *IEEE Network*, Bd. 18 Nr. 1, S. 6–14.
- Hill, J., Szewczyk, R., Woo, A., Hollar, S., Culler, D. und Pister, K. (2000), „System architecture directions for networked sensors“, in Rudolph, L. und Gupta, A. (Hg.), *Proceedings of the ninth international conference on Architectural support for programming languages and operating systems*, Cambridge, MA, USA, 12.-15.11.2000, ACM, New York, NY, USA, S. 93–104.
- Ismail, A. und Kastner, W. (2016), „A middleware architecture for vertical integration“, *Vortrag während 2016 1st International Workshop on Cyber-Physical Production Systems (CPPS)*, Wien, Österreich, 4.12.2016, IEEE, Piscataway, NJ, USA S. 1–4.
- Kaiser, R. (2014): „Qualitative Experteninterviews: Konzeptionelle Grundlagen und praktische Durchführung“, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- Khalid, Z., Khalid, U., Sarijari, M. A., Safdar, H., Ullah, R., Qureshi, M. und Rehman, S. U. (2019), „Sensor virtualization Middleware design for Ambient Assisted Living based on the Priority packet processing“, in Shakshuki, E. (Hg.), *The 10th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT)*, Löwen, Belgien, 29.04.-02.05.2019, Elsevier, Amsterdam, S. 345–352.
- Khan, I., Belqasmi, F., Glitho, R., Crespi, N., Morrow, M. und Polakos, P. (2016), „Wireless sensor network virtualization: A survey“, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Bd. 18 Nr. 1, S. 553–576.

- Khan, R., Khan, S. U., Zaheer, R. und Khan, S. (2012): „Future Internet: The Internet of Things Architecture, Possible Applications and Key Challenges“. In Guerrero, J. E. (Hg.), 2012 10th International Conference on Frontiers of Information Technology, Islamabad, Pakistan, 17.-19.12.2012, IEEE, Piscataway, NJ, USA, S. 257–260.
- Klötzer, C. und Pflaum, A. (2017), „Toward the Development of a Maturity Model for Digitalization within the Manufacturing Industry’s Supply Chain“, in Bui, T. und Sprague, R. (Hg.), Proceedings of the 50th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), Big Island, Hawaii, 04.-07.01.2017, Universität von Hawaii, Manoa, USA, S. 4210–4219.
- Kokkonis, G., Chatzimparmpas, A. und Kontogiannis, S. (2018), „Middleware IoT protocols performance evaluation for carrying out clustered data“, Vortrag während 2018 South-Eastern European Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Society Media Conference (SEEDA_CECNSM), Kastoria, Griechenland, 22.-24.09.2018, IEEE, Piscataway, NJ, USA, S. 1–5.
- Kondratenko, Y., Kondratenko, G. und Sidenko, I. (2018), „Multi-criteria decision making for selecting a rational IoT platform“, Vortrag während Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT’2018), Kiew, Ukraine, 24.-27.05.2018, IEEE, Piscataway, NJ, S. 147–152.
- Kuckartz, U. (2010): „Einführung in die computergestützte Analyse qualitativer Daten“, Lehrbuch, 3. Aufl., VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden.
- Kuckartz, U. und Rädiker, S. (2010): „Computergestützte Analyse (CAQDAS)“. In Mey, G. und Mruck, K. (Hg.), Handbuch Qualitative Forschung in der Psychologie, 1. Aufl., VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, S. 734–750.
- Li, S., Xu, L. D. und Zhao, S. (2015): „The internet of things: a survey“, Information Systems Frontiers, Bd. 17, Nr. 2, S. 243–259.
- Madakam, S., Ramaswamy, R. und Tripathi, S. (2015), „Internet of Things (IoT): A Literature Review“, Journal of Computer and Communications, Bd. 3 Nr. 5, S. 164–173.
- Melik-Merkumians, M., Baier, T., Steinegger, M., Lepuschitz, W., Hegny, I. und Zörtl, A. (2012), „Towards OPC UA as portable SOA middleware between control software and external added value applications“, Vortrag während 17th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA), Krakau, Polen, 17.-21.09.2012, IEEE, Piscataway, NJ, USA, S. 1–8.
- Meuser, M. und Nagel, U. (2009): „Das Experteninterview - konzeptionelle Grundlagen und methodische Anlage“. In Pickel, S., Jahn, D., Lauth, H.-J. und Pickel, G. (Hg.), Methoden der vergleichenden Politik- und Sozialwissenschaft: Neue

- Entwicklungen und Anwendungen, 1. Aufl., VS Verlag für Sozialwissenschaften/GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, S. 465–479.
- Ngu, A. H. H., Gutierrez, M., Metsis, V., Nepal, S. und Sheng, M. Z. (2017), „IoT Middleware: A Survey on Issues and Enabling technologies“, IEEE Internet of Things Journal, Bd. 4 Nr. 1, S. 1–20.
- Ott, A. Dobhan, A (2020): „Die Akzeptanz webbasierter EDI-Anwendungen durch kleine Unternehmen.“ In: Mobility in a Globalised World, Bd. 23, S. 225.
- Ouedraogo, C. A., Medjiah, S., Chassot, C. und Drira, K. (2018), „Enhancing Middleware-based IoT Applications through Run-Time Pluggable QoS Management Mechanisms. Application to a oneM2M compliant IoT Middleware“, The 9th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies, Porto, Portugal, 08.-11.05.2018, Procedia Computer Science Bd. 130, S. 619–627.
- Perera, C., Zaslavsky, A., Christen, P. und Georgakopoulos, D. (2014a), „Context Aware Computing for The Internet of Things: A Survey“, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Bd. 16 Nr. 1, S. 414–454.
- Perera, C., Zaslavsky, A., Christen, P. und Georgakopoulos, D. (2014b), „Sensing as a service model for smart cities supported by Internet of Things“, Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, Bd. 25 Nr. 1, S. 81–93.
- Radanliev, P., Roure, D. C. de, Nicolescu, R., Huth, M., Montalvo, R. M., Cannady, S. und Burnap, P. (2018), „Future developments in cyber risk assessment for the internet of things“, Computers in Industry, Bd. 102, S. 14–22.
- Rausch, T., Nastic, S. und Dustdar, S. (2018), „EMMA: Distributed QoS-Aware MQTT Middleware for Edge Computing Applications“, in Chandra, A., Li, J., Cai, Y. und Guo, T. (Hg.), 2018 IEEE International Conference on Cloud Engineering (IC2E), Orlando, Florida, USA, 17.-20.04.2018, IEEE Computer Society, Piscataway, NJ, USA, S. 191–197.
- Rayes, A. und Salam, S. (2017): „Internet of Things From Hype to Reality“, Springer International Publishing AG, Cham, Schweiz.
- Razzaque, M. A., Milojevic-Jevric, M., Palade, A. und Clarke, S. (2016): „Middleware for Internet of Things: A Survey“, IEEE Internet of Things Journal, Bd. 3, Nr. 1, S. 70–95.
- Sahingoz, O. K. und Sonmez, A. C. (2007): „Agent-Based Fault Tolerant Distributed Event System“, Computing and Informatics, Bd. 26, Nr. 5, S. 489–506.
- Salazar Ch., G. D., Venegas, C., Baca, M., Rodriguez, I. und Marrone, L. (2018): „Open Middleware proposal for IoT focused on Industry 4.0“. In Carrillo, H. (Hg.), 2018 IEEE 2nd Colombian Conference on Robotics and Automation (CCRA), Barranquilla, Kolumbien, 01.-03.11.2018, IEEE, Red Hook, NY, USA, S. 1–6.

- Salman, T. und Jain, R. (2017): „A Survey of Protocols and Standards for Internet of Things“, *Advanced Computing and Communications*, Bd. 1, Nr. 1.
- Sethi, P. und Sarangi, S. R. (2017): „Internet of Things: Architectures, Protocols, and Applications“, *Journal of Electrical and Computer Engineering*, Bd. 2017, S. 1–25.
- Sheng, Z., Yang, S., Yu, Y., Vasilakos, A., Mccann, J. und Leung, K. (2013), „A survey on the ietf protocol suite for the internet of things: standards, challenges, and opportunities“, *IEEE Wireless Communications*, Bd. 20 Nr. 6, S. 91–98.
- Spiess, P., Karnouskos, S., Guinard, D., Savio, D., Baecker, O., Souza, L. M. S. de und Trifa, V. (2009), „SOA-Based Integration of the Internet of Things in Enterprise Services“, in Damiani, E. (Hg.), *IEEE International Conference on Web Services*, Los Angeles, CA, USA, 06.-10.07.2009, IEEE, Piscataway, NJ, USA, S. 968–975.
- Stojkoska, B. L. R. und Trivodaliev, K. v. (2017), „A review of Internet of Things for smart home: Challenges and solutions“, *Journal of Cleaner Production*, Bd. 140 Nr. 3, S. 1454–1464.
- Tan, L. und Wang, N. (2010), „Future internet: The Internet of Things“, in Wen, D., Wang, R. und Xie, Y. (Hg.), *3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE)*, Chengdu, China, 20.-22.08.2010, IEEE, Piscataway, NJ, USA, S. 376–380.
- Tandale, U., Momin, B. und Seetharam, D. P. (2017): „An empirical study of application layer protocols for IoT“. In IEEE (Hg.), *International Conference on Energy, Communication, Data Analytics & Soft Computing (ICECDS)*, Chennai, Indien, 01.-02.08.2017, IEEE, Piscataway, NJ, S. 2447–2451.
- Tavana, M., Hajipour, V. und Oveisi, S. (2020): „IoT-based enterprise resource planning: Challenges, open issues, applications, architecture, and future research directions“, *Internet of Things*, Bd. 11.
- Tesch, J. F., Brillinger, A.-S. und Bilgeri, D. (2017): „Internet of Things Business Model Innovation and the stage-gate Process: An exploratory Analysis“, *International Journal of Innovation Management*, Bd. 21, Nr. 5, S. 1–19.
- Thangavel, D., Ma, X., Valera, A., Tan, H.-X. und Tan, C. K.-Y. (2014), „Performance evaluation of MQTT and CoAP via a common middleware“, *2014 IEEE Ninth International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP)*, Singapore, 21.-24.04.2014, IEEE, Piscataway, NJ, S. 1–6.
- Wang, M.-M., Cao, J.-N., Li, J. und Dasi, S. K. (2008), „Middleware for Wireless Sensor Networks: A Survey“, *Journal of Computer Science and Technology*, Bd. 23 Nr. 3, S. 305–326.

- Weichbold, M. (2019): „Pretest“. In Baur, N. und Blasius, J. (Hg.), *Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung*, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, S. 349–356.
- Wendzel, S. (2018): „IT-Sicherheit für TCP/IP- und IoT-Netzwerke: Grundlagen, Konzepte, Protokolle, Härtung“, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden.
- Weyrich, M. und Ebert, C. (2016), „Reference Architectures for the Internet of Things“, *IEEE Software*, Bd. 33 Nr. 1, S. 112–116.
- Whitmore, A., Agarwal, A. und Da Xu, L. (2015), „The Internet of Things-A survey of topics and trends“, *Information Systems Frontiers*, Bd. 17 Nr. 2, S. 261–274.
- Wu, M., Lu, T.-J., Ling, F.-Y., Sun, J. und Du Hui-Ying (2010), „Research on the architecture of Internet of Things“, in Wen, D., Wang, R. und Xie, Y. (Hg.), *3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE)*, Chengdu, China, 20.-22.08.2010, IEEE, Piscataway, NJ, USA, S. 484–487.
- Xu, L. D., He, W. und Li, S. (2014), „Internet of Things in Industries: A Survey“, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Bd. 10 Nr. 4, S. 2233–2243.
- Yang, D.-L., Liu, F. und Liang, Y.-D. (2010), „A Survey of the Internet of Things“, in Lou, X. (Hg.), *Proceedings of the 2010 International Conference on E-Business Intelligence*, Guangzhou, China, 07.-09.05.2010, Atlantis Press, Paris, Frankreich, S. 358–366.
- Yang, Z., Yue, Y., Yang, Y., Peng, Y., Wang, X. und Liu, W. (2011), „Study and application on the architecture and key technologies for IOT“, Vortrag während *2011 International Conference on Multimedia Technology*, Hangzhou, China, 26.-28.07.2011, IEEE, Piscataway, NJ, USA, S. 747–751.
- Yassein, M. B., Shatnawi, M. Q. und Al-zoubi, D. (2016): „Application layer protocols for the Internet of Things: A survey“. In IEEE und IARES (Hg.), *2016 International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS'2016)*, Agadir, Marokko, 22.-24.09.2016, IEEE, Piscataway, NJ, S. 1–4.