

N. König, C. Philipp, B. Hanisch, K. Ebert, T. Gier,  
G. vom Bögel, A. Hennig, M. Lörcks

**RFID, eine Schlüsseltechnologie für  
transparente Bauwerkserstellung und  
nachhaltigen Gebäudebetrieb (RFID-  
Sensor: Energie-Hygiene-Sicherheit)**

**F 2908**

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2015

ISBN 978-3-8167-9409-7

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

[www.irb.fraunhofer.de/tauforschung](http://www.irb.fraunhofer.de/tauforschung)

IBP-IMS-Bericht RFID-01-2012

# **RFID, eine Schlüsseltechnologie für transparente Bauwerkserstellung und nachhaltigen Gebäudebetrieb**

## **(RFID-Sensor: Energie-Hygiene-Sicherheit)**

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.  
(Aktenzeichen: SF- 10.08.18.7- 09.27 / II 3 - F20-09-030)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

Stuttgart/Duisburg, im März 2013

N. König (IBP, Projektleitung)

C. Philipp

B. Hanisch

K. Ebert

T. Gier

G. vom Bögel (IMS)

A. Hennig

M. Lörcks

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Vorwort, Danksagung</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Zielsetzung und Zusammenfassung</b>	<b>7</b>
2.1	Ausgangslage	7
2.2	Forschungsansatz	8
2.3	Untersuchungsmethodik	9
2.4	Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse	10
<b>3</b>	<b>Grundlagen RFID-Technik Allgemein</b>	<b>13</b>
3.1	Aufbau und grundlegende Funktionsweise eines RFID- Systems	14
3.2	Klassifizierung der Transpondertechnik und Begriffsbestimmung	15
3.3	Reichweite und Frequenzbereiche	15
3.4	Passive Transponder	16
3.5	Aktive Transponder und RFID-Netzwerke	17
3.5.1	Auswahl der Übertragungstechnik	23
3.5.2	Auswahl der Übertragungsfrequenz	24
3.5.3	Elektrosmog durch den Einsatz von Transpondertechnik	25
3.6	RFID-Emblem und RFID-Etikett	25
<b>4</b>	<b>Grundlagen RFID-Sensor-Technik</b>	<b>26</b>
4.1	Verfügbare Sensoren für Transpondersysteme	27
4.1.1	Sensortechnik Temperaturmessung	28
4.1.2	Sensortechnik Druckmessung	28
4.1.3	Sensortechnik Feuchtemessung	29
4.1.4	Sensortechnik Lichtmessung	30
4.1.5	Sensortechnik DMS-Messung	30
4.2	Lesegeräte für passive RFID-Transponder	31
4.2.1	Produktbeispiele für LF Lesegeräte	31
4.2.2	Produktbeispiele für UHF-Lesegeräte	32
4.3	Produktbeispiele für Sensornetz-Technik und aktive UHF-RFID-Systeme	32
4.4	Middleware, ID-Datenübertragung	34
<b>5</b>	<b>Anwendungen der RFID-Technik im Hochbau</b>	<b>37</b>
5.1	Allgemeine Übersicht, Stand	37
5.2	ARGE „RFIDimBau“	38
5.3	Andere Forschergruppen (FORBau, u.a.)	39

<b>6</b>	<b>Untersuchte Anwendungen der RFID-Sensor- Technik im Hochbau</b>	<b>40</b>
6.1	Anwendung Energie, Nachhaltigkeit am Beispiel von VIP	40
6.1.1	Bestimmung der wärmetechnischen Eigenschaften bei VIPs	41
6.1.2	Beschreibung der RFID-Drucksensor-Technik	43
6.1.3	Kalibrierung, Kalibrierprozess im Labor	45
6.1.4	Vorteile der RFID-Sensor-Technik bei VIP	48
6.1.4.1	Vorteile in Produktion und Herstellung	48
6.1.4.2	Vorteile bei Einbau und Abnahme	49
6.1.4.3	Vorteile in der Nutzungsphase	49
6.1.5	Messunsicherheit und Abnahmeprozess bei RFID-Sensortranspondern	50
6.1.6	Prüfung der RFID-Drucksensor-Technik an Fassaden mit VIPs	50
6.1.6.1	Testkörper	51
6.1.6.2	Versuche in der Klimakammer	52
6.1.6.3	Langzeit-Messungen an der Testfassade	52
6.1.6.4	Tests zum Temperatureinfluss	54
6.1.6.5	Tests zur Auslesbarkeit	57
6.1.6.6	Einfluss von Lesegerät und Antenne	58
6.1.6.7	Einfluss der Antennenhalterung	58
6.1.6.8	Einfluss von Zwischenschichten	59
6.1.6.9	Einfluss des Haltewinkels	59
6.1.7	Tests zur Messunsicherheit an VIP-Drucksensor- Technik	60
6.2	Feuchte- und Temperatur-Transponder zur Bauteil-Überwachung	62
6.3	Anwendungsbeispiel Energie: Energetischer Soll-Ist-Vergleich	63
6.3.1	Relevante Bauteildaten	65
6.3.2	Datenspeicherort	66
6.3.3	Integration in die Gebäudeautomation	67
6.3.4	Dynamischer Energieausweis	68
6.4	Anwendungsbeispiel Energie: Solaranlagensteuerung	72
6.5	Anwendung Hygiene, Lüftungsleitungen	73
6.5.1	Anforderungen an Luftleitungen	74
6.5.2	Bauliche Problembereiche und Grenzwerte in Lüftungsleitungen	75
6.5.3	Verwendete RFID- Technik	75
6.5.3.1	RFID- Sensornetz als UHF- System mit externem Sensor	75
6.5.3.2	RFID- LF- System zur Feuchtemessung	78
6.5.3.3	Versuchsanlagen	78
6.5.4	Demonstrator Hygiene, Lüftungsleitungen	79
6.5.5	Fazit und Ausblick für Lüftungsleitungen	80
6.6	Anwendung Sicherheit, Holzbauteile	81
6.6.1	Untersuchungen an Testaufbauten zu Feuchtesensoren	82

6.6.2	Test zur Funkreichweite in Deckensystemen	83
6.6.3	Test zur Sensorpositionierung in Holzbauteilen	86
6.7	Integration der RFID- und Sensor-Daten in den Gebäudebetrieb	87
6.7.1	Visualisierung und Schnittstellen Beispiel Lüftung	90
6.7.2	Visualisierung und Datenbank Beispiel Dächer	92
<b>7</b>	<b>Erfahrungen im Umgang mit RFID-Sensor-Technik und zur Bautaughlichkeit</b>	<b>97</b>
7.1	Erfahrungen im Umgang mit der Hardware	97
7.2	Erfahrungen im Umgang mit RFID-Software und Auswerteprogrammen	103
7.3	Erfahrungen zur Datensicherheit und Entsorgung	105
<b>8</b>	<b>Qualitätsmanagement, Kosten-Nutzen-Relation</b>	<b>106</b>
8.1	Qualitätssteigerung durch Bauwerksmonitoring	106
8.2	Qualitätsbewertung der RFID-Technik durch QFD	109
8.3	Kosten der RFID-Sensor-Transponder	115
<b>9</b>	<b>Umsetzung und Integration in künftige Projekte</b>	<b>118</b>
9.1	Integration in weiterführende Fraunhofer-Projekte	118
9.1.1	Betonsensor	118
9.1.2	Wärmespeicher mit Dämmung mittels VIP	119
9.1.3	Feuchtekontrolle bei Sanierungen mit Innendämmung	119
9.2	Umsetzung in der ARGE RFIDimBau	120
9.3	Umsetzung mit Hardware- und Software-Herstellern	120
9.4	Umsetzung zur Marktkontrolle in der Bauprodukt-Kennzeichnung	121
9.5	Umsetzung mit der Bauwirtschaft	122
9.6	Publikationen, Internet, Seminare, Messen	122
<b>10</b>	<b>Weiterführende Hinweise und Dokumente</b>	<b>123</b>
10.1	Übersicht zu den verwendeten RFID-Systemen	123
10.2	Messungen mit unterschiedlichen Abdeckmaterialien	124
10.3	Messwerte aus RFID-Drucksensoren im Saugheber-Versuch	125
10.4	Beispiele für RFID-Etiketten	126
10.5	Datenblätter verwendeter Geräte und Sensoren	128
10.5.1	Datenblatt AEG-Lesegerät ARE H5	128

10.5.2	Datenblatt Betaungssensor Hygrosens SHS-A3	129
10.5.3	Datenblatt Feuchte-Temperatursensor Sensirion SHT-7	130
10.5.4	Datenblatt Sensortransponder Digi - XBee®	132
10.6	Publikationen aus Fraunhofer IMS und IBP zu RFID-Sensor-Technik	134
<b>11</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>136</b>

# 1 Vorwort, Danksagung

Die Förderung des Projekts erfolgte mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung.

Aktenzeichen: SF- 10.08.18.7- 09.27 / II 3 - F20-09-030

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

Dank gilt auch den Kollegen in der ARGE RFIDimBau an den Hochschulen

- BU Wuppertal, Prof. Dr.-Ing. M. Helmus und Team,
  - TU Dresden, Prof. Dr.-Ing. P. Jehle und Team,
  - TU Darmstadt, Prof. Dr. U. Rüppel und Team,
- sowie den Mitgliedern der Arbeitsgruppe:
- Dr. N. Ephan, Kathrein-Werke KG, Rosenheim
  - Dipl.-Ing. G. Hagel, BBR Bonn
  - Min.-Rat Dipl.-Ing. Hans-Dieter Hegner, BMVBS Berlin
  - Dipl.-Kfm. D. Hergott, Neuwied
  - BD Dipl.-Ing. P. Junne, BBR Berlin
  - Dipl.-Ing. U. Klett, Klett-Ingenieur GmbH, Fellbach
  - Prof. Dr.-Ing. M. Nußbaumer, HDB Berlin
  - Dr. H.-W. Praas, Texsys GmbH, Radebeul
  - Prof. Dr.-Ing. K. Robl, ZDB Berlin
  - Prof. G. Sahner, HS Augsburg
  - Dipl.-Wirt.-Ing. R. Scharmann, Fa. Augel GmbH, Weibern

Besonderer Dank gilt auch den Industriepartnern:

- Dr.-Ing. R. Caps, Fa. va-Q-tec AG, Würzburg
- Dipl.-Ing. D. Stempfhuber, Fa. Roto Bauelemente GmbH, Bad Mergentheim
- Dr.-Ing. R. Mathes, Dipl.-Inform. T. Mathes, TMND GmbH, Abstatt
- Dipl.-Ing. S. Eberle, FEtronic, Elztal-Auerbach
- Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) S. Arch, AEG Identifikationssysteme GmbH, Ulm
- Interessengemeinschaft IG VIP-Sens: Microtherm, Sint-Niklaas; Porextherm, Kempten; va-Q-tec AG, Würzburg; Variotec, Neumarkt; Vakutherm, Rossau.

Auch den wissenschaftlichen Mitarbeitern, Diplomanden und studentischen Hilfskräften sei für ihre engagierte Mitwirkung gedankt:

- IBP: B. Hanisch, K. Ebert, T. Gier, L. Reininger, J. Postupka, M. Krishnappa,
- IMS: M. Lörcks, R. Jacobi, J. Breer, M. Mehlich.



## 2 Zielsetzung und Zusammenfassung

### 2.1 Ausgangslage

Im Rahmen der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ fördert das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) über das Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) Projekte der Arbeitsgemeinschaft (ARGE) zur Anwendung der elektronischen Identifikation von Bauprodukten und Bausystemen mit Hilfe der RFID-Technik [1]. In dieser Arbeitsgemeinschaft „RFID im Bau“ sind die Fraunhofer-Institute für Bauphysik (IBP) und Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme (IMS) Projektpartner zusammen mit dem Lehr- und Forschungsgebiet Baubetrieb und Bauwirtschaft der Bergischen Universität Wuppertal [2], der Fakultät Bauingenieurwesen, Professur Bauverfahrenstechnik, der Technischen Universität Dresden [3], dem Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen der Technischen Universität Darmstadt [4] sowie diversen Industriefirmen, siehe gemeinsame Internetseiten unter [www.rfidimbau.de](http://www.rfidimbau.de) (Bild 1).



Bild 1: Logo der Projektgemeinschaft „ARGE RFIDimBau“

Das übergeordnete Ziel ist es, mit Hilfe der RFID-Technik eine Kostenoptimierung und Qualitätsverbesserung von Bauwerken zu erreichen. Jeder der Projektpartner untersucht dabei in Einzelprojekten die Potentiale der RFID-Technologien in seinem Kompetenzbereich und in gemeinsamer Abstimmung mit den heutigen Bauprozessen.

In einem ersten Projekt des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) „RFID- Kennzahlen und Bauqualität“ stand vor allem die Bau- und Erstellungsphase im Vordergrund [5]. Dort waren die Grundlagen der RFID-Anwendung in der Bauphysik darzustellen und zu zeigen, wie durch eine elektronische Kennzeichnung mittels unterschiedlicher RFID-Transponder eine erhöhte Transparenz zu wesentlichen Parametern von Bauteilen und des Bauwerkes zu schaffen ist. Untersucht wurde die passive RFID-Transpondertechnik mit lokalen Datenstrukturen zur exemplarischen Kennwertermittlung aus einzelnen Komponenten am Beispiel der Fassade. Die Möglichkeiten einer automatisierten Baudokumentation mit der Beschreibung von bauphysikalischen Soll-Ist-Zuständen wurden dargestellt. So sollen Informationsdefizite zwischen den Baubeteiligten vermieden, Bauqualität erhöht und Kosten gesenkt werden.

Das zweite Fraunhofer-Projekt mit dem Kurztitel „RFID- Sensor: Energie – Hygiene - Sicherheit“ hat den Schwerpunkt in der Bau-Nutzungsphase. Anders als im ersten Fraunhofer-Projekt stehen hier die Aspekte der bauphysikalischen Nutzung von Bauteilen und deren Lebenszyklus im Vordergrund. So sollen mit Hilfe der RFID-Sensortechnik dynamische Informationen über den aktuellen Zustand einzelner Bauteile und Bausysteme erfasst und bewertet werden, um auch nach der Bauerstellung in der langjährigen Nutzungsphase eine Sicherung der Qualität durch ein „Hineinsehen“ in die Bauteile mit Hilfe der RFID-Funk- und Sensor-Technik erreichen zu können. Hierbei bearbeitete das Fraunhofer IBP die Teilthemen Kennwerte und Qualitätsmerkmale von Bauteilen zu exemplarischen Anwendungen im Bereich Energie, Behaglichkeit, Hygiene und Sicherheit von Konstruktionen. Die

Teilthemen des Fraunhofer IMS waren RFID-Technik und Sensortransponder, IT-Anbindung mit Standardisierung, hierarchische Verknüpfungen und IT-Zusatzfunktionen. Die Umsetzungsmöglichkeiten zu dynamischen Bauteil-/ Baukonstruktions-Daten für ein sog. „Gebäude-Monitoring“ wurde gemeinsam und zusammen mit der ARGE RFIDimBau untersucht.

## 2.2 Forschungsansatz

In den letzten Jahren hat sich die Mikroelektronik rasant entwickelt, vor allem die Möglichkeit Daten dezentral auf Mikrochips zu speichern und mobil mit kleinen Handgeräten auszulesen. Übertragungsraten von einigen MB pro Sekunde sind heute Standard [6] und stellen die Basis für die möglichen Anwendungen im Bauwesen dar. Im Bereich der Waren- und Personallogistik hat Helmus in [7] die Grundlagen durch die Erarbeitung eines Bau-Logistikleitstandes dargestellt. Die Anwendung der RFID-Technik bei der Rohbauerstellung zum sog. „Intelligenten Bauteil“ mit dezentraler Datenhaltung untersuchte Jehle [8]. Hierbei waren jedoch noch keine Sensoren in die RFID-Transponder zur Zustandserfassung integriert. Da aber die Informationskette von der Bauproduktplanung über die Herstellung und Logistik bis zur Verwendung im Gebäude i.a. auf denselben Datensätzen beruht, war naheliegend, eine mögliche Zustandsänderung der Bauteile durch Sensoren in den Transpondern zu erfassen. Solche Sensortransponder-Systeme sind seit kurzem z.B. für das Reifendruck- oder Temperatur-Monitoring in der KFZ-Branche kommerziell im Einsatz [9].

Deshalb bestand auch die Aufgabe des Fraunhofer IMS in der Anpassung und Realisierung von RFID- Sensorsysteme für die in Kapitel 5 und 6 beschriebenen Anwendungen. Dabei sind Sensorlösungen für die folgenden Beispiele entstanden:

- Passiver Sensortransponder zur Messung von Temperatur und Innendruck in einem Vakuum Isolier Paneel (VIP) und somit zur Überwachung der Gebrauchstauglichkeit in eingebautem Zustand ohne drahtgebundenes Monitoring.
- Passiver Sensortransponder zur Messung von Feuchte und Temperatur z.B. in Decken und Wänden zur Kennzeichnung und Überprüfung von Bauteilen mit feuchtekritischen Bereichen und Zuständen.
- Aktiver Sensortransponder (Sensornetz) für die kontinuierliche Erfassung von verschiedenen physikalischen Messgrößen in Gebäuden. Beispiele hierzu sind die Temperatur- und Druckmessung in Steuerungen von Solaranlagen, die Bestimmung von Temperaturen und Tauwasser in Bauteilen der Gebäudehülle oder von Ablagerung in Lüftungsleitungen.

In diesem Bericht werden die durchgeführten Arbeiten und erreichten Ergebnisse exemplarisch beschrieben. Im Kapitel 3 sind die Basis-Grundlagen zur RFID-Technik allgemein aufgeführt. Kapitel 4 erläutert die Grundlagen und Vorteile der Sensortransponder-Technologie. Allgemeine Anwendungen der RFID-Technik im Hochbau beschreibt Kapitel 5, während Kapitel 6 und 7 die von Fraunhofer IBP und IMS untersuchten Anwendungen der RFID-Technik mit Sensorik im Hochbau erläutert. Dabei werden jeweils die notwendige Technik, die Anforderungen für die Anwendung und die exemplarische Realisierung als modellhafte Demonstratoren beschrieben. Erste Ergebnisse aus der Praxis mit Hinweisen auf die Bautaughlichkeit und zur Datensicherheit werden in Kapitel 7 präsentiert. Eine Abschätzung zum Qualitätsmanagement beim Umgang mit der RFID-Technik, den Kosten und die Integration in künftige Projekte sind in Kapitel 8 und 9 dargestellt.

## 2.3 Untersuchungsmethodik

Innerhalb der ARGE RFIDimBau war vereinbart, dass jede Institution ihre Teilprojekte eigenständig bearbeitet und man sich gegenseitig über die wesentlichen Ergebnisse regelmäßig informiert. Dies erfolgte in den ARGE-Treffen, siehe in [1], Rubrik „Intern“, mit Koordination durch den Sprecher der ARGE und mit Information zum projektbegleitenden Lenkungsreis. Aus diesen Abstimmungen wurden die gemeinsamen Aktivitäten wie Präsentation der Projektergebnisse bei Messen und Tagungen und die Verknüpfung der Teilergebnisse zu einem gemeinsamen sog. „Schnittstellen-Projekt“ erarbeitet (siehe Kap. 9.2 und 9.6).

Die Ergebnisse aus dem ersten Fraunhofer-Projekt zeigten, dass die damals und zum Projektstart des zweiten Fraunhofer-Projekts verfügbaren RFID-Transponder mit Sensorik und die dazu gehörigen Lesegeräte nicht bautauglich waren. Deshalb waren eine aktuelle Recherche nach besser geeigneten Hardware-Bauteilen und die Adaption der IMS-Sensortransponder-Systeme für die angedachten Anwendungen notwendig. Die ersten Erprobungen konnten in den Test- und Klimakammern des Fraunhofer IMS und später bei den bauüblichen Temperaturbereichen von  $-25\text{ °C}$  bis  $+40\text{ °C}$  in den Klimakammern und an Testfassaden des Fraunhofer IBP durchgeführt werden. Nach weiteren Recherchen zur Integration von Benutzerschnittstellen zwischen den RFID-Systemen und üblicher Bausoftware mit den Anforderungen an die Datenhaltung ließen sich mögliche Wege der Integration in Facility-Managementsysteme (FM) beschreiben. Daraufhin wurden am Markt vorhandene bautaugliche Lese- und Speichergeräte für die notwendigen Sensortags auf die Readerprotokolle abgestimmt.

Diese Hardware war exemplarisch für die Anwendungen in den Bereichen Energie/MIP, Hygiene/Lüftungsleitung und Sicherheit/Holzbausystem zu erproben u.a. durch:

- Konzeption und Aufbau von adaptierten Hardware-Modulen (Transpondern, Lesegeräten, Mess- und Kalibriereinrichtungen) und Funktionsmodellen,
- Konzeption und Aufbau von Kleindemonstratoren,
- Erprobung der Hardware am und im Gebäude,
- Aufbau von Probekörpern in der Testfassade,
- Mehrfachtests mit unterschiedlich geschulten Anwendern zur Erfassung von Verbesserungspotenzialen.

Zum Erreichen der Ziele nach mehr Transparenz und Nachvollziehbarkeit von bauphysikalischen Kenndaten konnten Ergebnisse aus dem Projekt „Sicherheitsbeiwerte im Wärmeschutz nach EnEV/BRL und EN-Standards (SiWaS)“ [10] gespiegelt werden. Dort werden mit mathematischen Methoden [11] Prognosewerte für Kennwerte wie den Wärmedurchgang durch Außenbauteile von Gebäuden untersucht. Diese Kennwerte sollten dafür aber mit deren Herkunfts- und Ident-Daten belegt sein, um qualitätsbezogene Aussagen machen zu können. Wie dies mit der RFID-Technik zu verknüpfen ist, wird im Kap. 6.3 theoretisch gezeigt; eine mögliche Umsetzung in der Praxis ist in Kap. 9.4 erläutert.

Aus Untersuchungen zur Softwareintegration auch in Gebäudeleittechnik- (GLT) oder Gebäudeautomations- (GA) Systemen konnten Erkenntnisse zur Weiterentwicklung in künftigen Projekten zusammen mit Umsetzern (Kap. 7) gewonnen werden.

## 2.4 Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse

Die Wunschvorstellung von Bauherrn und Investoren ist es, Gebäude technisch hochwertig und fehlerfrei zu erstellen, diese langfristig schadensfrei und kostengünstig zu betreiben und darin behaglich zu Wohnen oder zu Arbeiten. Somit ist das Ziel des Projektes darauf ausgerichtet, nachhaltiges Bauen in technischer und ökologischer Qualität durch elektronische Kennzeichnungs- und Monitoringsysteme zu unterstützen. Hierzu sind zwei Gruppen von Einflussgrößen zu beachten. Zum einen gebäudebezogene Aspekte der Dauerhaftigkeit, der bestehenden Qualitätssicherungssystemen, der Baubetriebsqualität und der Gebäude-Effizienz (energieeffizientes Bauen/ effiziente technische Gebäudeausrüstung). Damit lässt sich eine Verbesserung der Transparenz der Bauabläufe und der Gebäude selbst erreichen. Zum anderen waren die Verfügbarkeit der Geräte und Sensoren für eine Bauteilerfassung und Bauteilüberprüfung, deren Kosten und die Handhabung und Akzeptanz in der Bauwirtschaft im Rahmen des Projekts zu untersuchen.

Die eingeführten Instrumente der öffentlichen Vergabe wie Präqualifizierung, Erkennen der wirtschaftlichen Qualität (d.h. eine Prozessoptimierung als Bauen und Betreiben im Zeit- und Kostenrahmen) sind heute noch wenig technisch ausgerichtet und kaum nachvollziehbar. Vor allem Daten zur Ausführungsqualität unterschiedlicher Bauweisen mit verschiedenen Bauprodukten sind über den Betriebs- und Lebenszyklus von Räumen und Gebäuden wenig vorhanden und den meisten Planern und Ausführenden unbekannt. Damit kann kein Bewusstsein für bessere Bauqualität entstehen und der Mehrnutzen von höherwertigen Bauprodukten und Bauweisen den meist kleinen und mittleren Unternehmen am Bau sowie den Bauträgern (auch öffentliche Hand!) aufgezeigt werden.

Doch gerade die statischen Informationen (wie der Aufbau eines Bauteils mit seinen Grundkomponenten) zusammen mit den dynamischen Informationen (wie die zum Trocknungs- oder Feuchteverhalten) sind die Daten, die sich im Laufe der Nutzung einer Baukonstruktion stark unterscheiden. Je nach Materialart und Qualität ändern sich durch Verschleiß, Alterung, Verwitterung, Feuchtebelastung oder Verschmutzung die ursprünglichen Eigenschaften gegenüber dem Neuzustand wesentlich.

Nur mit eindeutig zuordenbaren Informationen zu den wesentlichen tatsächlich eingebauten Produkten und dem daraus ermittelten Soll-Ist-Vergleich der geplanten Daten mit den realisierten Ergebnissen lassen sich über Datenbanksysteme solche Nachweise wie z.B. zum Energiebedarf/-verbrauch führen. Die Technik der RFID-Ident-Kennzeichnung bietet hierzu nutzbringende und praxistaugliche Lösungen an. Auch liegen bereits technische Systeme zur Erfassung von Bauteil- oder Baukonstruktions-Zustände für die Messung von Temperatur, Druck, Feuchte durch Funk-Sensortechnik mit RFID-Identifizierung vor. Prototypen sind in Labormodellen verifiziert und in realen Gebäuden an Testfassaden untersucht oder in der Validierung (IBP Stuttgart, IMS Duisburg/ inHaus1). Testanwendungen für Sensor-RFID-Transponder für die Bauteileigenschaften wie Kraft, Dehnung lassen sich realisieren, erste Messsysteme sind aufgebaut und befinden sich im Labortest. An konkreten bauphysikalischen Anwendungen für den Gebäudebetrieb konnten die Vorteile und Chancen der RFID-Technik im Zusammenwirken mit der Nachrüstung von Gebäuden z.B. bei Sanierungen aufgezeigt werden.

Die Untersuchungsmethodik war, in den 3 Beispielbereichen Energie, Hygiene, Sicherheit bauphysikalisch-technische Anwendungen zu zeigen.

Im **Bereich Energie** wird dies am Beispiel einer Fassade mit einem Glaspaneel mit VIP-Dämmung als Musterszenario dargestellt. Die VIP-Innendruck-Messmethode wird statt wie

bisher mit einer Hilfsmethode nun mit einem Direkt-Messverfahren integriert in die LF-Funktechnik drahtlos als Monitoring-Verfahren dargestellt. Dies stellt somit ein Qualitäts-Sicherungsverfahren dar und lässt eine in-situ Bauteilüberprüfung über lange Zeiträume zu. Dabei werden Zeiträume deutlich größer als 10 Jahre angestrebt, im Rahmen des Projekts wurden bereits Langzeittests über 2 Jahre durchgeführt. Der Einsatz eines solchen Systems sorgt somit für eine höhere Produktsicherheit. Hieraus ergeben sich Vorteile für Hersteller der VIPs, Nutzer/Investor und Bauaufsicht durch nachprüfbare Ergebnisse zum Zustand der VIP-Dämmung. Daraus lassen sich mittelfristig durch ein geringeres Vorhaltemaß in der Bemessung der Sicherheit zum Wärme- und Feuchteschutz solcher Baukonstruktionen mit VIP-Dämmung wirtschaftliche Vorteile gewinnen.

Der LF-Drucksensor-Prototyp ist im IMS weiter durch Tests in Druckkammern optimiert worden. Der Kalibrierprozess bei der Herstellung von VIP-Drucksensor-Transpondern und der VIP-Bauteile selbst mit integrierten Sensortags konnte marktreif gemacht werden, Ergebnisse hierzu werden vorgestellt.

Zur Erzielung von höheren Reichweiten für das Monitoring von Gebäudezuständen z.B. in Dächern und Fassaden stehen drahtlose Sensornetz-Systeme zur Verfügung. Im Frequenzbereich der Mobilfunktechnik bei 2,4 GHz erreichen diese Reichweiten von über 5 Metern. Diese sog. aktiven Sensor-Transponder in der Netzwerk-Knotentechnik benötigen eine eigene Batterie und wurden als Prototypen getestet. Sie stehen seit einigen Monaten auch als kommerzielle Systemkomponenten zur Verfügung. Damit lassen sich die Bauprodukt-eigenschaften Temperatur, Licht, Feuchte, Rauch, Anwesenheit und Luftdruck erfassen und überprüfen.

Erste Beispiele für die Anwendung zum **Themenbereich Hygiene** sind aufgezeigt: Turnusmäßige Überwachung des Zustandes von Lüftungsleitungen oder Anlagen zur kontrollierten Wohnungslüftung wie Außenwandlüfter oder Wärmetauscher hinsichtlich ihres Hygienezustandes sind erfassbar mit der RFID-Sensortechnik, z.B. Tauwasseranfall, Verschmutzung etc. Daraus können die Einhaltung von Wartungs- und Reinigungsintervalle oder die Überwachung der Tauwasserbildung an Wärmbrücken automatisiert ablaufen.

Im **Themenbereich Sicherheit** wurden Systeme untersucht zur Überprüfbarkeit des Ursprungs und der Qualität von Bauprodukten, zur Zustandskontrolle von automatisierten Fassadenkomponenten insbesondere RWA-Elemente und Brandschutzelementen und zum präventives indirektes Erkennen von Verschleißgrenzen aufgrund übermäßiger Erwärmung oder zu hoher Bauteilfeuchte, insbesondere bei Holzkonstruktionen an unzugänglichen Stellen. Damit wäre eine automatisierbare Zustandskontrolle bei Holzbausystemen, wie Dächern möglich (Monitoringsystem). Beispiele dazu werden aufgezeigt. Dazu kann die passende RFID-Sensortechnik mit dem LF-Feuchte-Sensor-Tag (als IMS-Prototyp verfügbar) genutzt werden. Die Tests des VIP-Drucksensor- und Feuchtesensor-Transponders am Demonstrator „InHaus-1“ in Duisburg zeigen die Funktionsweise über ein Jahr.

Die innerhalb einer bauphysikalischen Anwendung notwendigen Datenfluss- und Verknüpfungsmodelle mit den vielschichtigen Daten, können in dem Projekt nur angedeutet werden und sind zusammen mit Software-Firmen zu entwickeln. Insellösungen für Bauteil- und Bausystem-Überwachungen mit Funksensorik werden vorgestellt und bereits seit über einem Jahr kommerziell angeboten.

Welche Potenziale in der Integration von schlanken Überwachungssystemen von Gebäudekomponenten mit RFID-Tags mit nachgeschalteten Software-Modulen stecken ist im

ersten Fraunhofer-RFID-Projekt „Kennzahlen und Bauqualität“ aufgezeigt. Vor allem der modulare Aufbau durch standardisierte Protokolle und Schnittstellen auf dem Informationsweg vom RFID-Tag bis zum Anwender ermöglicht eine Vielzahl von Nutzungen dieser Daten durch neue Dienstleistungen. In den Bereichen Facility Management (FM), Gebäudeleittechnik (GLT) oder Gebäudeautomation (GA) werden dazu Ideen vorgestellt. Die automatisierte Erstellung des Gebäude-Energieausweises ist ein gutes Beispiel wie mit der drahtlosen RFID-Sensor-Technik integriert in Baukonstruktionen wie Fassaden oder Dächer künftig für innovative Entwickler neue Mehrwert-Dienste anbieten können. Dies vor allem im Umfeld, in denen keine MSR-Technik vorhanden ist und einfache Erfassungssysteme für eine Hausautomation nachgefragt wäre (z.B. für Sensoren an Heizungskomponenten, Umwälzpumpen, Brandschutzeinrichtungen, Fenstern). Diese lassen sich dann in Sensornetze zu FM-Systemen integrieren; Vorschläge dazu werden beschrieben. Zur Umsetzung der Anwendungsideen wurden leicht verständliche, einfach aufzubauende Demonstratoren entwickelt, die bei Seminaren und Messen vorgeführt werden können.

Damit sind einige Möglichkeiten der derzeit verfügbaren RFID-Sensor-Hardware in der Bauanwendung und mit deren Verbesserungspotentiale aufgezeigt. Die Impulse für Bedarfseinschätzungen zur weiteren bauspezifische Hardwareentwicklung lassen sich daraus abschätzen. Weitere Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit und Verwendbarkeit der daraus zu entwickelnden Serienmodelle für Sensor-RFID-Transponder sollten im geplanten Schnittstellenprojekt in der ARGE RFIDimBau stattfinden. Darin kann dann der Nachweis erbracht werden, dass unter bauüblichen Randbedingungen (Handhabung, Baumilieu wie Staub, Wasser, Feuchte, Temperatur, Stöße etc.) die Qualität der Sensordaten (Genauigkeit, Drift, Reproduzierbarkeit) den gestellten Anforderungen auch über die lange Zeit der Bauteil-Betriebsdauer ausreichend ist. Qualitative Hinweise werden durch die Gegenüberstellung bisheriger Erfassungssysteme in einer QFD-Analyse mit Bewertung aufgezeigt zusammen mit Abschätzungen zur Kostenreduktion über Serieneffekte und zu batterielosen Systemen.

Leider standen erst 2011 kurz vor Projektende die ersten kommerziellen RFID-Sensor-Bauteile für die Datenerfassung über größere Entfernung von einigen Metern (aktive Transponder mit Speicher und Controller sowie Lesegeräte) zur Verfügung. Diese sollen 2013 in Zusammenarbeit mit der VIP-Herstellern und weiteren Industriepartnern erprobt und die RFID-Sensor-Daten in das Softwarepaket „RFID-Kiosk“ komplett integriert werden. Damit lässt sich dann diese RFID-Technik im Gebäudebetrieb umsetzen und die „intelligente“ Sensorik mit der Bauproduktebene vernetzen. So kann das langfristige Forschungsziel erreicht werden, die gewonnenen Informationen über den Bauteilzustand und somit den Qualitätsstandard dem Entscheidungsträger, Investor und Nutzer der Räume drahtlos zur Verfügung zu stellen. Der Ausblick zu den derzeit laufenden Projektfortsetzungen und zu Projektideen zeigt das weitere Umsetzungspotential aus dem Projekt „RFID-Sensor: Energie-Hygiene-Sicherheit“.

### 3 Grundlagen RFID-Technik Allgemein

Die Abkürzung RFID steht für Radiofrequenzidentifikation (engl. Radio Frequency Identification) und beschreibt ein System zur eindeutigen Identifikation von Objekten und Gegenständen. Mittels dieser Technologie werden Daten berührungslos und ohne Sichtkontakt über Funkwellen übertragen. Die RFID- Technik ist damit eine bestimmte Form der Auto-ID- Systeme. Die Darstellung (Bild 2) zeigt die wichtigsten Auto- ID- Systeme, jedoch wird im weiteren Verlauf nur auf die Funktionsweise der RFID-Systeme eingegangen, da die anderen Systeme im Fraunhofer-Projekt „RFID- Kennzahlen und Bauqualität“ [5] dargestellt sind. Die RFID- Technik besitzt gegenüber anderen Auto-ID-Systemen verschiedene Vorteile. Ein wesentlicher Vorteil besteht in der Auslesbarkeit ohne Sichtkontakt. Während z. B. beim herkömmlichen Barcode das Auslesen nur über einen Laserscanner funktioniert und daher eine direkte Sichtverbindung notwendig ist, wird dieser Nachteil durch die Verwendung von Funkwellen umgangen.

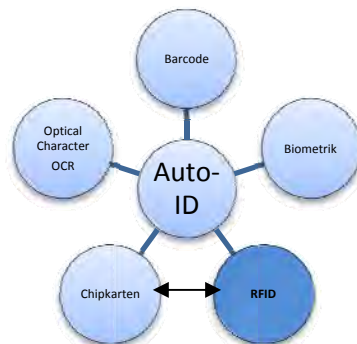


Bild 2: Die wichtigsten Auto- ID- Systeme, nach [6].

Des Weiteren ist dadurch gleichzeitig eine höhere Lesereichweite möglich. Ein weiterer Vorteil gegenüber dem Barcode ist, dass nicht nur Informationen abgerufen oder ausgelesen, sondern auch verändert und ergänzt werden können. Ferner werden bei dieser Technik Informationen auf Abruf (on-call) bereitgestellt, es besteht somit die Möglichkeit der Pulkerfassung (gleichzeitige Erfassung von mehreren Transpondern). Ein weiterer wesentlicher Punkt ist das Integrieren von Sensoren und deren Datenerfassung. Die Anwendungsbereiche von RFID sind vielfältig und mittlerweile in fast allen Branchen zu finden. So wird sie bereits in der Logistik zur Echtzeitverfolgung von Gütern oder zur Kennzeichnung von Objekten verwendet, im Sicherheitsbereich bei Einlasskontrollen und in der Automobilindustrie begleitet sie sogar den gesamten Entstehungsprozess des Autos. Die ersten mikroelektronischen Lösungen wurden bereits in den 1980-er Jahren in der Nutztierhaltung eingesetzt. Der große Durchbruch erfolgte mit dem LF-Transponder als „Wegfahrsperr“ in den 1990-er Jahren, die ab 1998, weil für jeden PKW verpflichtend vorgeschrieben, in eigenen Chip-Fabriken gebaut wurden. Ein weiterer Anwendungsbereich mit großen Stückzahlen liegt bei den Zugangskontrollsystemen, die vorwiegend die HF-Technik nutzen. Derzeitiger Technologietreiber sind die Anwendungen im Transportbereich/Logistik mit 23 % und die Industrie/KMU mit 26 % (Bild 3, [12]). Hier werden von den Marktforschern Umsatz-Potentiale im Milliardenbereich prognostiziert. Vor allem im Bereich der Vernetzung von Warenverkehr und Datenkommunikation wird im sog. Internet der Dinge eine Revolution der Arbeitsabläufe und Einsparung von Ressourcen erwartet. Daher ist es kaum erklärbar, dass im Bauwesen, in dem über lange Zeitperioden eine solche Vernetzung von „Waren und Daten“ genutzt werden kann, der Einsatz der RFID-Technik bisher kaum verbreitet ist.

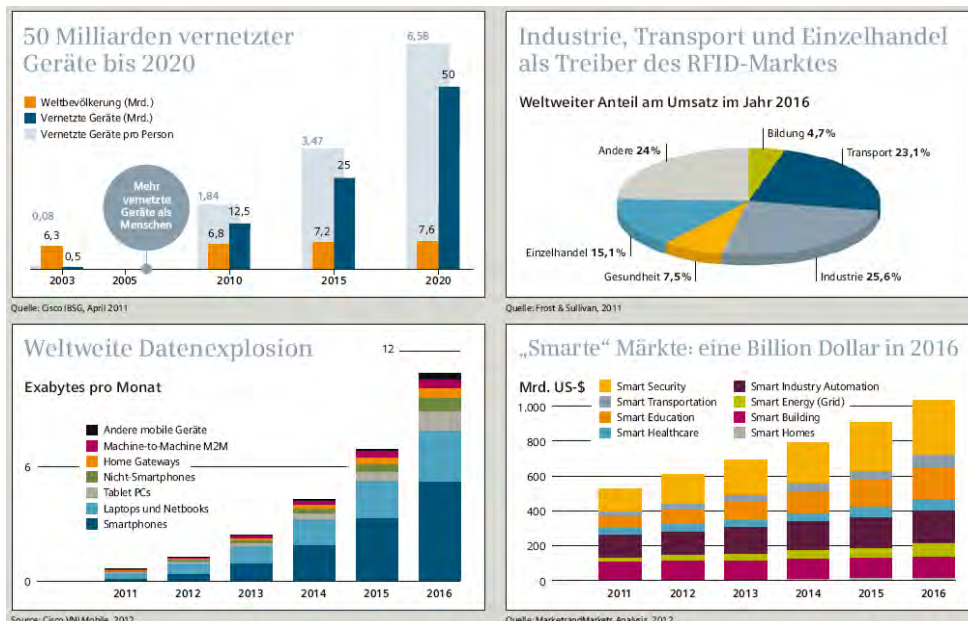


Bild 3: Marktpotenzial und Entwicklung der Datenvernetzung bis 2016, nach [12].

### 3.1 Aufbau und grundlegende Funktionsweise eines RFID- Systems

Grundsätzlich besteht ein RFID- Infrastruktursystem aus zwei Komponenten: einem oder mehreren Transpondern (auch „TAG“ genannt) und einem Lesegerät, einem sog. „Reader“. Gekoppelt an das Lesegerät ist ein entsprechendes Informationssystem, in dem die Daten ausgelesen, weiterverarbeitet und verwaltet werden können. Die nachstehende Grafik stellt die Bestandteile und Verknüpfungen eines solchen Systems dar.

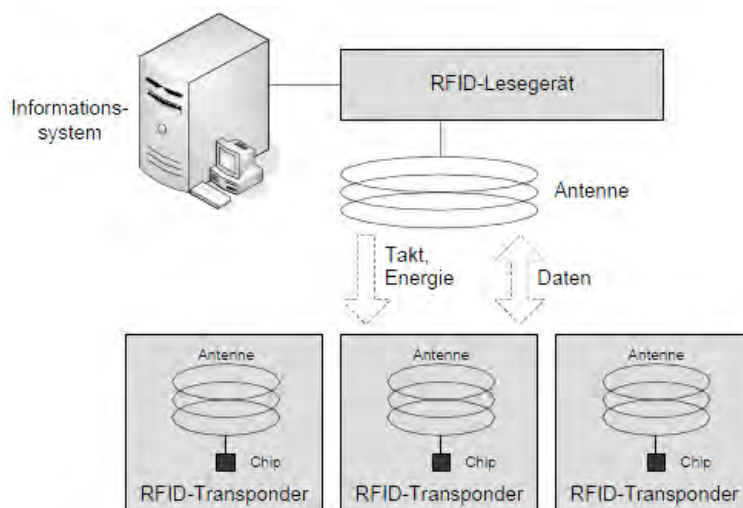


Bild 4: Grundsätzlichen Bestandteile eines RFID- Systems, nach [6].

Der RFID- Transponder ist der eigentliche Datenträger. Das Lesegerät erzeugt ein elektromagnetisches Feld, welches von der Antenne des Transponders empfangen wird und ihn damit aktiviert. Wie in Bild 4 zu erkennen, sendet das Lesegerät Energie, Daten und den Takt an den Transponder, welcher wiederum seinerseits die entsprechenden Daten mittels Funkwellen an das Lesegerät übermittelt. Vom Lesegerät aus werden die Daten an ein Informationssystem weitergeleitet, welches diese dem Benutzer als Information über die Identnummer etc. bereitstellt. Im Rahmen des Projekts „RFID-Kennzahlen“ [5] ist ein In-



formations- und Nachschlagewerk zur RFID-Hardware „RFID-Guide“ entstanden. An dieser Stelle wird daher nur eine kurze Einführung gegeben und auf Neuerungen hingewiesen, die sich durch technische Weiterentwicklungen und durch weitere Standardisierungen ergeben haben.

### 3.2 Klassifizierung der Transpondertechnik und Begriffsbestimmung

In Bild 5 wird eine Klassifizierung der Transpondersysteme nach Funktionen vorgenommen. Die dort bezeichneten „klassischen RFID-Systeme“ mit den Grundfunktionen Identifikation anhand einer eindeutigen Nummer und Lesen-/Schreiben von Nutzdaten deckt nur einen Teil des möglichen Funktionsumfangs der Transpondertechnik ab. Hinzu kommen in der Transpondertechnik die drahtlosen Sensoren für telemetrische Anwendungen die sowohl mit passiven Transpondern wie auch mit semi-passiven Transpondern (Datenlogger) und aktiven Transpondern kommunizieren können.

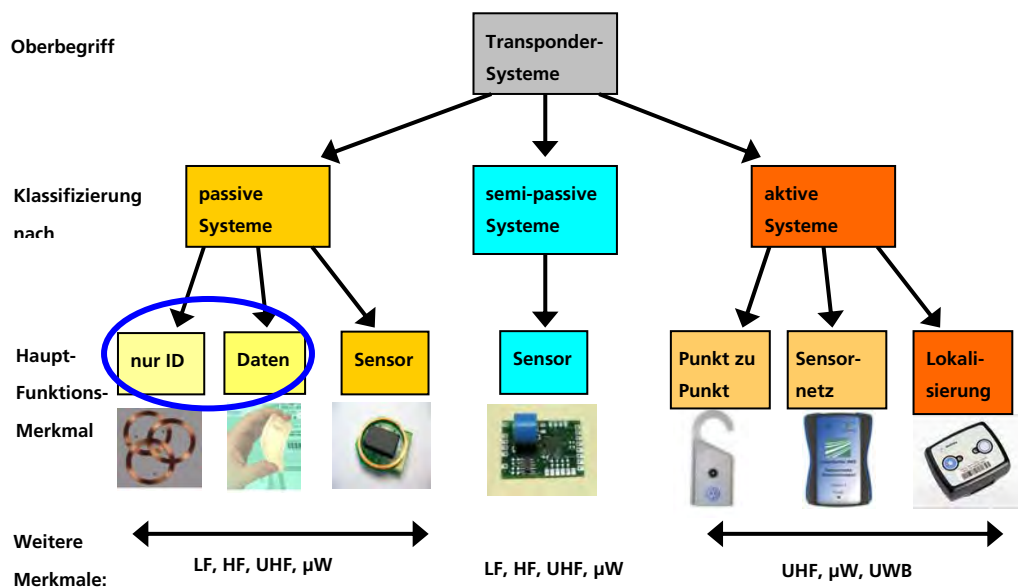


Bild 5: Klassifizierung von Transpondersysteme nach Funktionen, Kreis = klassische RFID-Systeme

Man unterscheidet deshalb in aktive, semi-passive und passive Transponder-Systeme. Aktive Transponder verfügen über eine eigene Energieversorgung, wie z.B. eine Batterie. Die semi-passiven Transponder verfügen über eine Energiequelle, diese versorgt den Transponder jedoch nur zur Erfassung von Messwerten, die Kommunikation erfolgt in gleicher Weise wie bei passiven Transpondern. Passive Transponder hingegen beziehen ihre Energie ausschließlich aus dem Feld eines Lesegerätes.

### 3.3 Reichweite und Frequenzbereiche

Neben der beschriebenen Energieversorgung aktiver, semi-aktiver und passiver Transponder stellt die Reichweite ein weiteres wichtiges Unterscheidungskriterium von RFID-Systemen dar. Es haben viele Faktoren einen Einfluss auf die Reichweite, wie zum Beispiel die örtlichen Umgebungsbedingungen und mögliche Störquellen (Feuchte, Magnetfeld, Metallschichten etc.). Aber auch die Größe und Form der Sende- und Empfangsantenne sowie deren Ausrichtung bestimmen die Sende- und Empfangsreichweite eines RFID-Systems. Die wesentlichen Faktoren, die sich direkt auf die Reichweite auswirken, sind die Sendefrequenz und die Sendeleistung. Es gilt die Faustformel, dass mit steigender Fre-

quenz sowohl die Schreib- und Lesereichweite als auch die Schreib- und Lesegeschwindigkeit zunehmen [6]. Die typischen Sendefrequenzen eines RFID- Systems unterteilen sich in

- LF – Niederfrequenz (125 – 134 kHz),
- HF – Hochfrequenz (13,56 MHz),
- UHF – Ultrahochfrequenz (868 oder 915 MHz),
- $\mu$ W – Mikrowelle (2,45 oder 5,8 GHz).

Die Sendefrequenzen mit genauen Bandbreiten und Toleranzen sowie die zulässigen Sendeleistungen sind in Normen (u.a. in der ISO/IEC-1840x-Reihe) oder freiwilligen Standards (wie EPCglobal oder VDI-Richtlinien) geregelt. Eine gute und kompakte Übersicht zu aktuellen Normen und Standards von RFID-Systemen findet sich in „RFID-Standards 2012“ im Ident-Jahrbuch 2012 [13], das jährlich erscheint und regelmäßig aktualisiert wird.

Auf die verschiedenen Verfahren und Kopplungssysteme wird im weiteren Verlauf nicht eingegangen. Erwähnenswert im Zusammenhang mit den verschiedenen Frequenzbereichen ist jedoch die Tatsache, dass niedrigere Frequenzen (LF und HF) gegenüber Wasser und Metall eine geringere Empfindlichkeit aufweisen als höhere Frequenzen (UHF und  $\mu$ W). Auch sind sie gegenüber extremen Temperaturen und Feuchtezuständen unempfindlicher. Lesegeräte werden zur einfacheren Klassifizierung der Lesereichweite für jeden Frequenzbereich in die drei Klassen Short-Range, Mid-Range und Long-Range eingeteilt (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Einteilung der Lesegeräte anhand ihrer Lesereichweiten

Frequenzbereich	Short-Range	Mid-Range	Long-Range
LF	< 3 cm	2 cm bis 30 cm	> 30 cm
HF	< 3 cm	2 cm bis 50 cm	> 50 cm
UHF	< 20 cm	10 cm bis 100 cm	> 80 cm

### 3.4 Passive Transponder

Das Wort „Transponder“ setzt sich zusammen aus den Begriffen „Transmitter“ (dt.: Sender) und „Responder“ (dt.: der Antwortende). Vereinfacht dargestellt, besteht ein Transponder typischerweise aus einem Mikrochip und einer Antenne. Es existiert eine Vielfalt an Größen und Bauformen von Transpondern, die je nach Einsatzgebiet stark voneinander abweichen können (Bild 6). So sind für Sicherheits- und Zugangssysteme Transponder z.B. in Schlüssel oder Anhänger integriert. Ferner existieren sie als selbstklebende Etiketten, in eingebetteten Schutzhüllen oder als Chipkarte.



Bild 6: Übersicht passiver RFID-Transponder: oben links in Kartenform (PVC weiß), oben rechts gekapselt in Glasröhrchen, mit Loch zum Anschrauben, als Schlüsselanhänger oder in Nagelform (schwarz). Die 4 aufgedruckten Antennen-Inlays (unten) sind Teile von passiven UHF-Transpondern in Kartenform.

Allerdings werden Transponder nicht nach Bauform klassifiziert, sondern nach deren Eigenschaften, der Energieversorgung und Beschreibbarkeit. Nach dem EPC-Standard [13, 14] werden RFID- Transponder grundsätzlich in fünf Klassen unterteilt. Die Klassen 0 - 3 gehören zum Typ der passiven Transponder. Passiv bedeutet, dass sie über keine eigene Energieversorgung verfügen, sondern die Energie zum Betrieb des Transponders über das magnetische Feld des Lesegerätes erhalten. Aus diesem Grund ist ihre Reichweite auch relativ gering. Diese ersten drei Klassen werden abermals unterteilt in Transponder, die nur gelesen (Klasse 0), einmalig beschrieben (Klasse 1) und wiederholt beschrieben (Klassen 2) werden können. Transponder der Klasse 3 zeichnen sich durch eine andere Art der Energieversorgung aus. Der Mikrochip wird mit einer internen Batterie versorgt, während für die Datenübermittlung weiterhin die Energie des Lesegerätes benutzt wird. Sie sind somit semi-aktiv. Aktive Transponder hingegen verfügen über eine eigene Energieversorgung, mit der sowohl der Chip versorgt, als auch die Datenübermittlung sichergestellt wird. Sie werden lediglich noch dahingehend klassifiziert, ob sie auch mit passiven Transpondern kommunizieren können. Die Klassen 4 und 5 beziehen sich auf aktive Transponder (siehe Kap. 3.5). Sie teilt lediglich die Kommunikationsfähigkeit ein. Klasse 5 kann auch noch mit passiven Transpondern kommunizieren, Klasse 4 nicht [15]. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Speicherkapazität sog. read-write-Transponder. Diese kann von wenigen Bit bis hin zu derzeit 32 KBytes variieren („Data-on-Tag“, Kap. 6.3.2). Allerdings ist davon auszugehen, dass die Speicherkapazität in Zukunft deutlich steigen wird [6].

### 3.5 Aktive Transponder und RFID-Netzwerke

Aktive Transponder verfügen immer über eine eigene Energieversorgung. Dies kann beispielsweise eine Batterie, eine Solarzelle oder ein Thermogenerator sein. Aufgrund dessen sind diese Transponder nicht auf einen geringen Abstand zu einem Lesegerät angewiesen. Daher können solche Transponder auch in verschiedenen Netzwerktopologien eingesetzt werden. In so genannten Sensornetzwerken kann der Abstand zwischen dem Sensortransponder und dem Lesegerät (im Folgenden Basisstation genannt) erhöht werden, indem Daten über Netzwerkrouter oder über die Sensortransponder selbst weitergereicht werden können. Die Netztopologien können unterschieden werden in Stern-, Baum- und Maschentopologien. Bild 7 zeigt eine Visualisierung der verschiedenen Topologien.

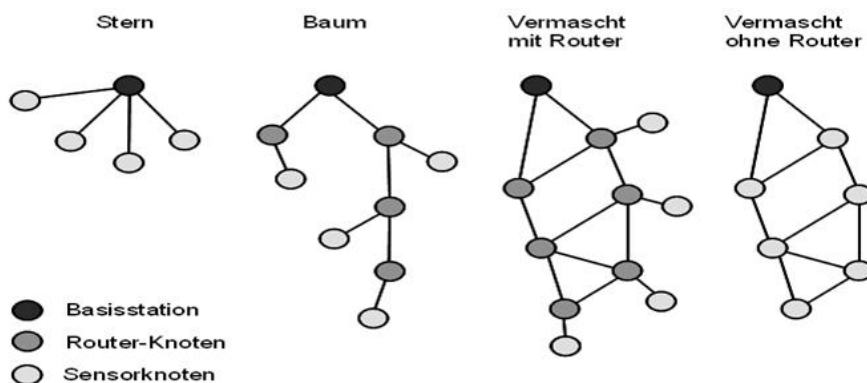


Bild 7: Übersicht zu Netztopologien

Bei der Sterntopologie sendet jeder Sensorknoten seine Information direkt an die Basisstation. Bei der Baumtopologie wird die Reichweite des Netzes durch so genannte Router-Knoten erhöht. Diese Router-Knoten müssen jedoch dauerhaft aktiv sein und benötigen

daher mehr Energie. Mit Hilfe einer Vermaschung kann die Zuverlässigkeit eines Sensor-netzes deutlich gesteigert werden, da jede Information mehrere Pfade zur Basisstation nehmen kann. Agieren die Sensorknoten auch selbst als Router, so kann ein Maschennetz auch ohne Router-Knoten aufgebaut werden. Neben der Netztopologie können verschiedene Übertragungsverfahren mit ihren Standards und Datenübertragungsraten unterschieden werden (Tabelle 2).

Tabelle 2: Vergleich der Übertragungsstandards in der drahtlosen Kommunikation

Standard	Physikalische Schicht (Norm )	Frequenz	Datenrate
ZigBee	IEEE 802.15.4	2,4 GHz	250 kBit/s
IMS-Stack	IEEE 802.15.4	2,4 GHz	250 kBit/s
Bluetooth LE	IEEE 802.15.1	2,4 GHz	1 Mbit/s
Konnex-RF	EN13757-4 (S-Mode)	868 MHz	16 kBit/s
Wireless MBus	EN13757-4 (T-Mode)	868 MHz	67 kBit/s
Dect/CAT-iq	EN 175-1/2	1,89 GHz	1 MBit/s
EnOcean	ISO/IEC 14543-3-10	868 MHz	125 kBit/s
Z-Wave	Proprietär/ G.9959	868 MHz	9 kBit/s

Es wurden gängige Verfahren herangezogen, die entweder standardisiert sind oder von einer Allianz vorangetrieben werden. Individuallösungen von einzelnen Herstellern wurden nicht berücksichtigt. Diese basieren auf proprietären und zum Teil unveröffentlichten Protokollen. Es wurden weiter nur Systeme betrachtet, die für den professionellen Einsatz im Gebäudemanagement konzipiert wurden. Beispiele für Systeme, die hier nicht betrachtet werden sind, funkgesteuerte Heizungsthermostate von Honeywell, Funklichtschalter von Gira oder funkgesteuerte Zwischenstecker von diversen Herstellern wie ELV.

### ZigBee

Der ZigBee-Standard ist speziell für Heim- und Gebäudeautomatisierung entwickelt worden. Dabei stand Energieeffizienz im Vordergrund, um Batteriebetriebene Anwendungen zu ermöglichen. Ein ZigBee-zertifiziertes Gerät muss eine Batterielebensdauer von 2 Jahren aufweisen [16]. Als Frequenz ist das lizenzfreie 2,4 GHz-Band festgelegt, welches ebenfalls durch WLAN und Bluetooth [17] genutzt wird. Der ZigBee-Standard sieht unterschiedliche Vernetzungsmöglichkeiten vor: Stern-, Baum- oder Maschentopologien. Es kommen so genannte Router-Knoten zum Einsatz, die ständig mit Energie versorgt sein müssen [18].

### IMS-Stack

Der IMS-Stack ist eine Eigenentwicklung vom Fraunhofer IMS. Er verwendet ebenfalls die physikalische Schicht 802.15.4 [19]. Er definiert die untersten beiden Schichten des OSI-Modells, den Bitübertragungs- und den MAC-Layer und findet Anwendung speziell in Sensornetzen. Das Protokoll wurde dabei hinsichtlich des Energiebedarfs optimiert. Werden keine Sensordaten übermittelt, fallen die Sensorknoten in einen Tiefschlaf und verbrauchen so kaum Energie. Da jeder Sensorknoten auch Informationen der anderen Sensorknoten weiterleitet, sind beim IMS-Stack keine Router-Knoten erforderlich. Werden Sensornetze in Gebäuden eingesetzt, müssen oft mehrere Stahlbetondecken und -Wände überwunden werden, siehe Testversuche in Kap. 6.6.2.3. Damit ist eine Nutzung in vorhandene Gebäude-Stromnetze durch die sog. PLC-Technik (Powerline Communication) möglich.

### **Bluetooth LE**

Der Bluetooth-LE-Standard ist eine Erweiterung des Bluetooth-Standards [17]. Er wurde speziell für Steuerungsaufgaben eingeführt. Als Besonderheit nutzt der Standard ein FHSS-Verfahren (Frequency Hopping Spread Spectrum). Dabei wird die Frequenz während der Übertragung bis zu 1600-mal pro Sekunde gewechselt, um so Störeinflüsse durch andere Sender zu minimieren. Als Frequenz wird das 2,4 GHz Band verwendet. Es werden nur Sterntopologien unterstützt.

### **Konnex-RF/ Wireless MBus**

Der Konnex-Standard wurde speziell für die Gebäudetechnik entwickelt. Der Standard Konnex-RF ist dabei eine Funkerweiterung der drahtgebundenen Version [20]. Dieser Standard wird häufig bei der Übertragung von Zählerdaten verwendet. Der Standard sieht einen Fehlerkorrekturmechanismus vor, bei dem 2 Bitfehler in einem Block von 16 Bits korrigiert werden können. Die Unterschiede zwischen Konnex-RF und Wireless MBus bestehen im Wesentlichen in der Datenrate und der Kanalkodierung. Es wird das 868 MHz-Band verwendet. Dieses Band wird zurzeit von weniger Services genutzt als das 2,4 GHz-Band. Es sind Stern- und Baumtopologien unter Einsatz von Router-Knoten möglich.

### **Dect/CAT-iq**

Der Dect-Standard wurde für die digitale Telefonie in Gebäuden entwickelt. Der Standard verfügt jedoch über eine Erweiterung (CAT-iq), mit der Sensorwerte und Schaltbefehle übertragen werden können [21]. Als Besonderheit verwendet der CAT-iq-Standard ein eigenes exklusives Frequenzband. Der CAT-iq-Standard arbeitet mit Sterntopologien. Durch die Nutzung des Dect-Standards, der mit vergleichsweise hohen Sendeleistungen von etwa 250 Milliwatt arbeitet, ist der Stromverbrauch relativ hoch. Dies führt zu guten Übertragungseigenschaften, wirkt sich jedoch nachteilig auch auf die Batterielebensdauer aus (vgl. Tabelle 3), weshalb diese Technik bevorzugt bei Telefon-Mobilteilen mit Ladestationen am Netz eingesetzt wird.

### **Enocean**

Enocean ist ein seit 2011/2012 standardisiertes Verfahren nach ISO/IEC 14543-3-10 [22]. Es wurde speziell für die Nachrüstung in bestehenden Gebäuden entwickelt. Dabei wird zu Grunde gelegt, dass eine Übertragung von Signalen nur selten stattfindet. Dies ist z.B. bei Schaltbefehlen von Lichtschaltern und Fensterkontakten der Fall. Dadurch werden Kollisionen im 868 MHz-Band vermieden. Eine Besonderheit der Enocean-Sensoren ist die Verwendung batterieloser Techniken, wie das sog. Energy-Harvesting. Dabei wird beispielsweise die Energie zum Senden eines Schaltbefehls aus dem Tastendruck des Benutzers mit Hilfe von Piezowandlern genutzt. Das Enocean-Verfahren arbeitet in einer Sterntopologie. Mit Hilfe von so genannten Gateways ist eine Anbindung an drahtgebundene Vernetzung möglich.

### **Z-Wave**

Z-Wave ist ein in den USA verbreitetes Verfahren. Es arbeitet im 868 MHz-Band (Europäische Version) und unterstützt vermaschte Netze. Das Protokoll ist im Vergleich zur ZigBee-Methode deutlich einfacher. Die Batterielebensdauer von Z-Wave Geräten wird mit bis zu 10 Jahren angegeben [23].

## **Vergleich der Reichweite**

Ein wichtiges Kriterium bei der Wahl eines Verfahrens ist die Reichweite. Insbesondere in Gebäuden müssen oft mehrere Betondecken und -Wände überwunden werden. Erreicht ein Sensorsignal die Basisstation nicht, so ist der entsprechende Sensor nutzlos. Zur Beurteilung der Übertragungseigenschaften wird die so genannte BER (Bit-Error-Rate) herangezogen. Diese beschreibt das Verhältnis aus fehlerhaft empfangenen und gesendeten Bits. Die BER hängt neben der Sendeleistung auch von der Bandbreite, Datenrate und der ver-

wendeten Frequenz ab. Bild 8 zeigt einen Vergleich der BER unterschiedlicher Verfahren bei verschiedenen Abständen zwischen Sender und Empfänger [24].

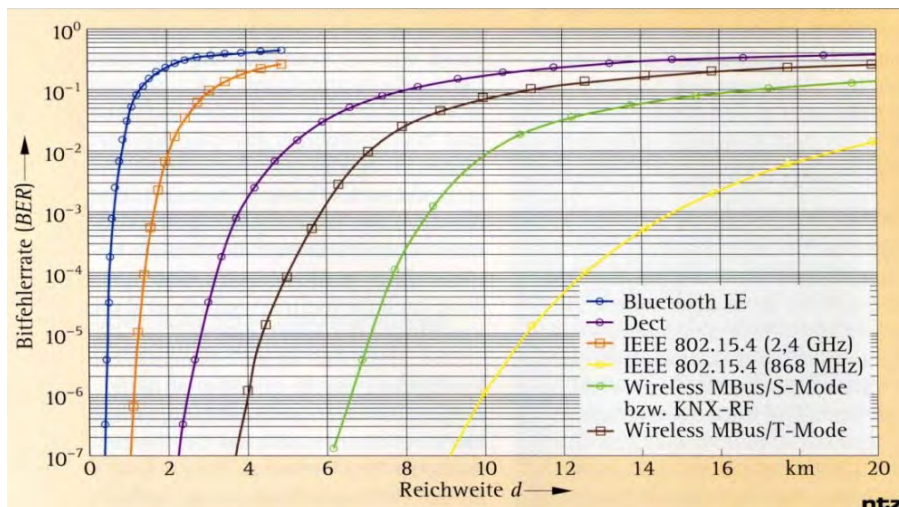


Bild 8: Bitfehlerrate für verschiedene Verfahren (entnommen aus [24])

Erhöht man den Abstand zwischen einem Sender (z.B. Sensorknoten) und einem Empfänger (z.B. Basisstation), so verschlechtert sich der so genannte Signal-zu-Rausch Abstand. Übertragene Bits werden dann im Empfänger fehlerhaft erkannt - die BER steigt an. Für eine akzeptable BER von  $10^{-4}$  ergibt sich nach Bild 8 beispielsweise für EN13757-4 (Konnex-RF/Wireless MBus) eine um den Faktor fünf höhere Reichweite als bei IEEE 802.15.4 (ZigBee/IMS-Stack). Es handelt sich dabei um die theoretisch erreichbaren Reichweiten im Freiraum, also ohne Reflexionen, mit der jeweils maximal zulässigen Sendeleistung und unter Verwendung eines idealen Rundstrahlers (Gewinn 0 dB).

Durch die Möglichkeit der Bildung einer Baum- oder Maschentopologie, wie z.B. bei ZigBee und IMS-Stack, wird die Reichweite dadurch erhöht, dass jeder Sensorknoten in einem Netzwerk auch Informationen anderer Sensorknoten weiterreicht. Sensorsignale können die Basisstation auch erreichen, wenn sich diese außerhalb der direkten Reichweite befindet.

### Vergleich des Energiebedarfs

Für den Einsatz der beschriebenen Übertragungsverfahren ist insbesondere im Bereich der Gebäudeautomatisierung und Überwachung der Energiebedarf von Interesse. Kurze Batterielebensdauer von Sensorknoten erhöht den Wartungsbedarf und mindert somit die Wirtschaftlichkeit eines solchen Systems. Es ist daher von Interesse, welche Energie zum Übertragen einer Information notwendig ist. Um die Verfahren vergleichen zu können, ist es wichtig nicht nur den Energiebedarf zur Übertragung eines Bits zu betrachten, sondern auch den so genannten Protokoll-Overhead. Dabei handelt es sich um zusätzliche Bits, die übertragen werden, ohne Nutzdaten zu enthalten. Diese sind zur Synchronisierung und Fehlerschutzkodierung notwendig. Bild 9 zeigt einen Vergleich der Verfahren.

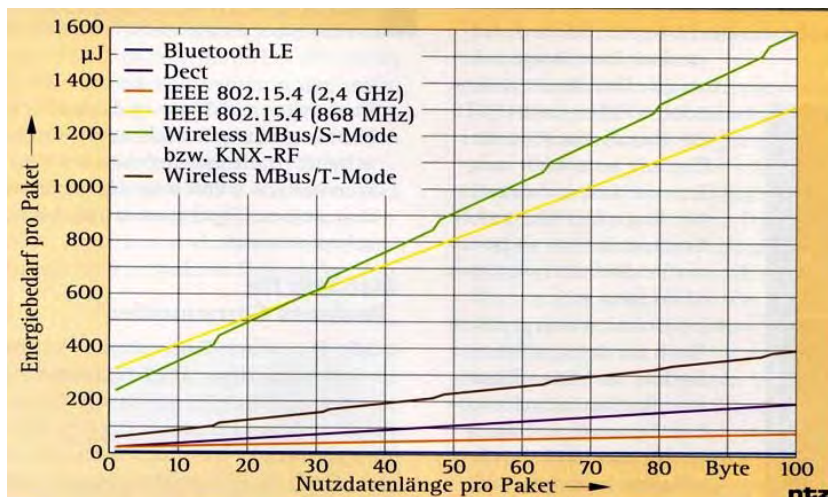


Bild 9: Energiebedarf pro Paket (entnommen aus [24])

Zu sehen ist der Energiebedarf pro Paket für unterschiedliche Nutzdatenlängen. Wie zu erkennen, haben die Verfahren mit höheren Datenraten, wie z.B. Bluetooth LE und ZigBee (IMS-Stack), einen geringeren Energiebedarf verglichen mit Verfahren mit niedrigeren Datenrate. Das lässt sich dadurch erklären, dass die Sendedauer durch die höhere Datenrate geringer ist, jedoch durch eine geringere Reichweite erkaufte wird. Beispielsweise hat der Standard 802.15.4 (ZigBee) eine um den Faktor zwei höhere Reichweite als 802.15.1 (Bluetooth), jedoch ist der Energiebedarf weit mehr als doppelt so hoch. Der IMS-Stack versucht diesen Nachteil auszugleichen, indem jeder Sensorknoten auch Informationen weiterleiten kann, so dass keine ständig aktiven Router-Knoten notwendig sind. Dies verbessert die Gesamtbilanz eines Sensornetzes. Das EnOcean-Verfahren ermöglicht durch den Einsatz von Energy-harvesting für bestimmte Sensoren (z.B. Schalter) die Vermeidung von Batterien. Jedoch können beispielsweise innerhalb von Gebäuden solarbetriebene Sensoren ausfallen, wenn die Beleuchtungsstärke nicht ausreichend ist. Es hängt also von der konkreten Anwendung ab, welches Verfahren am besten geeignet ist. Die Zahl der EnOcean-Komponenten im Markt ist 2012 stark gestiegen, was auf eine mittelfristig dominierende Stellung dieser Technik hindeutet.

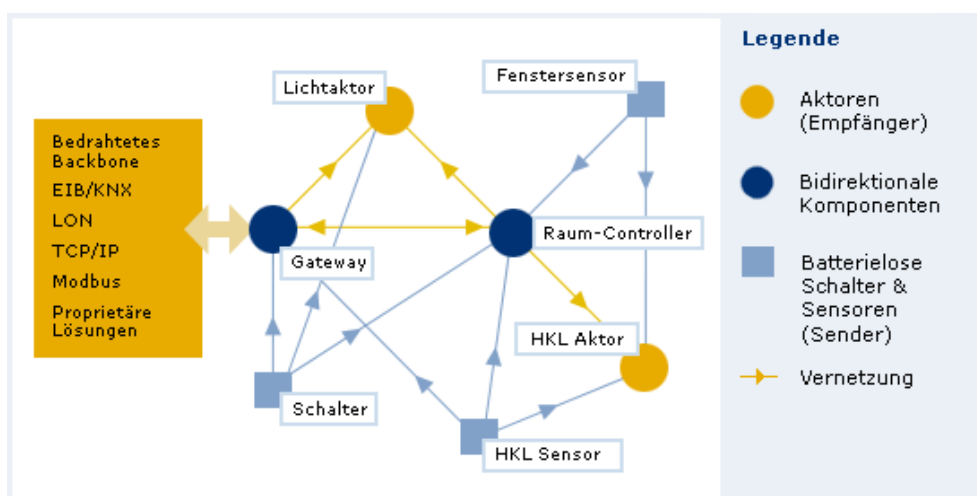


Bild 10: Systemüberblick eines Funk-Netzwerks nach EnOcean [22].



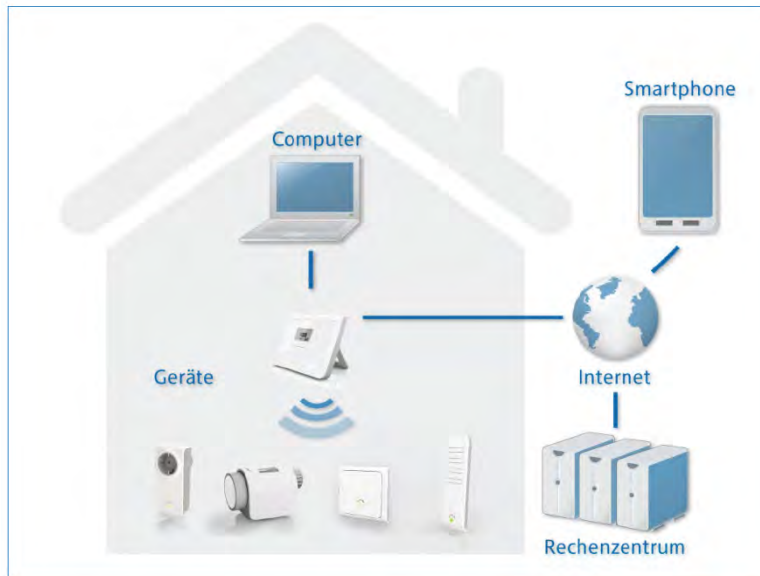


Bild 11: Systemüberblick des Funk-Netzwerks nach RWE-SmartHome [25].

Aus den dargestellten Schemabildern ist ersichtlich, dass solche Funkssysteme proprietär d.h. nur innerhalb eines Gebäudes aufbaubar sind, jedoch auch die Möglichkeit bieten, über IP-Schnittstellen Daten und Befehle in das Internet zu geben oder von dort zu empfangen. Wie diese Funktionalitäten zusammen mit den Sensoren in den Funknetzknotten bauphysikalisch oder anlagentechnisch sinnvoll zu nutzen sind, wird in späteren Kapiteln dargestellt.

Die folgende Tabelle 3 zeigt einen zusammenfassenden Überblick der Eigenschaften von Funk-Übertragungs-Systemen.



Tabelle 3: Vergleich der Eigenschaften von Kommunikations-Standards.

Standard	ZigBee	IMS-Stack	Bluetooth LE	Konnex-RF	Wireless MBus	Cat-iq	EnOcean	Z-Wave
<b>Mögliche Topologie</b>	Stern, Baum, Masche (mit Router-Knoten)	Stern, Baum, Masche	Stern	Stern, Baum	Stern, Baum	Stern	Stern	Stern, Masche
<b>Reichweite (bei Sichtverbindung / in typischen Gebäuden)</b>	100 m / 30 m Knoten zu Knoten	100 m / 30 m Knoten zu Knoten	10 m / 5 m Punkt zu Punkt	100 m / 20 m Punkt zu Punkt	100 m / 20 m Knoten zu Knoten	300 m / 70 m Punkt zu Punkt	30 m / 10 m Punkt zu Punkt	100 m / 20 m Knoten zu Knoten
<b>Art der Energieversorgung</b>	Batterie, Kabel	Batterie, Solar	Batterie	Batterie, Kabel	Batterie, Kabel	Batterie, Kabel	Solar, Bewegung, Thermisch, Batterie	Batterie, Kabel
<b>Lebensdauer (Batterie)</b>	2 Jahre	3 Jahre	5 Jahre	2 Jahre	2 Jahre	0,2 Jahre	Unbegrenzt	10 Jahre
<b>Ausfallsicherheit</b>	Hoch, da Maschennetz	Hoch, durch selbstorganisierendes Maschennetz	Gering	Gering, da ausgefallene Knoten nicht ersetzt werden	Gering, da ausgefallene Knoten nicht ersetzt werden	Gering	Nein, da evtl. keine kontinuierliche Energieversorgung	Hoch, da Maschennetz
<b>Typische Sensoren</b>	Temperatur, Feuchte, Licht	Temp., Feuchte, Licht, DMS	-	Wärmezähler, Temp.	Wärmezähler, Temp.	?	Schalter, Temp., Licht	Rauschmelder, Schalter
<b>Mögliche Anbindung an andere Netze</b>	Ethernet, WLAN, RS232, RS485, USB	Ethernet, RS232, RS485, PLC, USB, WLAN	USB	EIB, Konnex, Ethernet	EIB, Konnex, Ethernet	Ethernet, USB	EIB, Ethernet, RS232, RS485, openPicus,	Ethernet, RS232, RS485
<b>Produkte verfügbar</b>	ja	ja	nein	ja	ja	nein	ja	ja

### 3.5.1 Auswahl der Übertragungstechnik

Zur Überwachung von Vakuumisolerpaneelen werden Sensortransponder in eine Vakuumisolerpaneel eingebaut. Die Lebensdauer eines solchen Paneels beträgt mehr als zehn Jahre und übersteigt somit die Lebensdauer verwendbarer Batterien. Ein Eingriff in das Paneel und somit ein Batteriewechsel ist derzeit technisch nicht möglich ohne Zerstörung des Vakuums im Paneel. Daher müssen passive Sensortransponder eingesetzt werden. Das gleiche gilt für Feuchte- und Temperatur-Transponder, die in einem unzugänglichen Wandaufbau verbaut werden; auch hier werden im Folgenden die Möglichkeiten der passiven Transpondertechnik untersucht.

Zur Steuerung von Solaranlagen oder Klima-/Lüftungsgeräte ist es erforderlich an verschiedenen Stellen im Bereich der Kollektoren bzw. Rohrleitungen oder Aggregate Messwerte aus Funksensoren aufzunehmen und diese an die Steuereinheit zu übertragen. Der große Abstand zwischen Steuereinheit und Sensortranspondern lässt dabei einen Betrieb von passiven Transpondern nicht zu. Es müssen daher aktive Sensortransponder verwendet werden, die i.a. ein Sensornetz darstellen, siehe Beispiel in Kap. 6.5.

### 3.5.2 Auswahl der Übertragungsfrequenz

Transpondersysteme arbeiten üblicherweise mit ISM-Frequenzen (vgl. Kapitel 2). Diese sind 100 kHz bis 150 kHz (LF), im Hochfrequenzband (HF) 6,78 MHz, 13,56 MHz, 27,125 MHz und 40,68 MHz sowie im ultra high frequency band" (UHF) 433,92 MHz, 869 MHz und 2,4 GHz. Bild 12 zeigt eine Übersicht der Frequenzbänder.

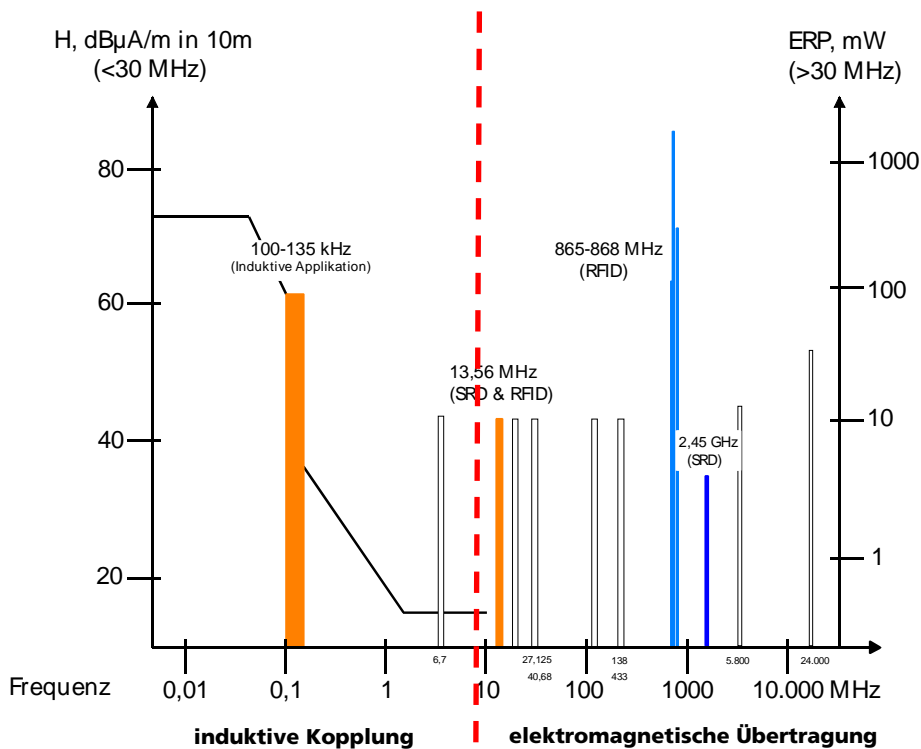


Bild 12: Frequenzbänder und zugelassene Sendeleistungen

Die Eigenschaften eines Übertragungskanal zwischen einem Transponder und einem Lesegerät werden wesentlich von der Wahl der Frequenz beeinflusst. Für die Anwendung im Bauwesen sind daher die Anforderungen an den Übertragungskanal und Rahmenbedingungen der Übertragung zu berücksichtigen. Beispielsweise nimmt die Dämpfung verursacht durch Baumaterialien mit der Frequenz zu, während die erzielbaren Reichweiten zwischen Transponder und Lesegerät prinzipiell bei niedrigeren Frequenzen geringer ausfällt [24]. Da Vakuumisierpaneele außen eine Umhüllung aus einer metallisierten, elektrisch leitfähigen Folie haben, ist die Dämpfung groß. Um einen Transponder zur Messung des Drucks innerhalb eines Vakuumisierpaneels betreiben zu können, ist daher eine geringe Betriebsfrequenz vorteilhaft. Sensortransponder für den Einsatz in Wänden und Decken sind ebenfalls häufig von metallischen oder metallisierten Materialien, wie beispielsweise Aluminiumprofilen oder Dampfsperrfolien umgeben. Daher wird in solchen Fällen eine Frequenz von 133 kHz gewählt (LF-Band). Im Gegensatz dazu müssen bei der Sensordatenübertragung an technischen Anlagen meist mehrere Stockwerke überwunden werden. Dieser Anforderung stehen geringe Antennendimensionen und limitierte Sendeleistung entgegen. Ein guter Kompromiss ist hierbei die Wahl einer Frequenz aus dem UHF-Band.

### 3.5.3 Elektrosmog durch den Einsatz von Transpondertechnik

Die öffentliche und fachliche Diskussion rund um das Thema Elektrosmog ist durch starke Ausbreitung der Mobilfunktechnik in den neunziger Jahren angestoßen worden. Hauptkritikpunkte sind die Mobilfunkgeräte (Handys), die beim Telefonieren einen Teil der abgestrahlten Leistung direkt in den Kopf einstrahlen und die wohnraumnahen Basisstationen, die permanent mit hoher Leistung strahlen. Grenzwerte für die maximale Strahlenbelastung sind in EN 50364 und die zugehörigen Messverfahren für die Überprüfung in EN 50357 genormt. Weitere Hinweise finden sich u.a. in [26].

Die hier im RFID-Sensor-Projekt genutzten Transpondersysteme sind am ehesten mit dem Einsatz eines Mobilfunkgeräts zu vergleichen, da vergleichsweise geringe Sendeleistungen im direkten Umfeld des Nutzers abgestrahlt werden. Passive und semi-aktive Transpondersysteme sowie stationäre Lesegeräte strahlen wie Mobilfunkgeräte mit bis zu zwei Watt Sendeleistung, allerdings sind die Antennen der stationären Lesegeräte anwendungsbedingt meist in größeren Abständen zu Personen angebaut. In zwei Meter Abstand fällt das elektromagnetische Feld bereits auf unter 500 Mikrowatt und ist damit um etwa den Faktor 1000 kleiner, als die Leistung eines Handys an Kopfoberfläche. Mobile Lesegeräte senden mit etwa einem Zehntel der Leistung eines stationären Lesegerätes und sind daher ebenfalls unkritisch, trotz der Nähe zum Anwender. Die Transponder selbst sind unkritisch, selbst wenn sie am Körper getragen werden, da sie nicht aktiv senden, sondern nur das Feld von Lesegerät reflektieren (backscatter-Prinzip). Bei aktiven Transpondersysteme und Sensornetze gilt eine maximal zulässige Sendeleistung für Transponder und Lesegerät von 25 Milliwatt. Dies liegt nochmal ein Achtel unter dem Wert der mobilen Lesegeräte für passive Transponder und ist daher ebenfalls als unkritisch zu bewerten.

### 3.6 RFID-Emblem und RFID-Etikett

Die Aktivitäten zur Schaffung eines weltweit einheitlichen RFID-Emblems, damit Verbraucher erkennen können, wo ein RFID-Funktransponder in einem Etikett oder unsichtbar angebracht ist, führten 2012 zur Norm ISO/IEC 29160 „Information technology – Radio frequency identification for item management“, die als deutsche Fassung 2013 erscheinen wird. Ende 2010 ist das EU-Kommissariat einer Empfehlung gefolgt und hat den Vorschlag für ein weltweit einheitliches RFID-Emblem akzeptiert [13], siehe Beispiel in Bild 91 im Kap. 11.3.

Das RFID-Emblem ermöglicht die visuelle Identifikation von RFID-Transpondern, Lesegeräten und mit Transpondern versehenen Gegenständen. Mit diesem Norm-Entwurf wird somit für den Verbraucher ein wesentliches Element für den Schutz der Privatsphäre erfüllt. Der Buchstabe benennt die Frequenz, die Ziffer den Anwenderstandard dazu. Ein RFID-Emblem mit z.B. Index L2 sagt aus, dass es sich um ein 135 kHz LF-Tag nach ISO/IEC 18000-7 handelt, mit Benennung der Datenstruktur nach ISO/IEC 18000-2 und für die Anwendung an Produkten nach ISO 17367. Diese Indexe sind besonders für Diagnostik vorteilhaft, wenn ein RFID-Gerät einen Transponder nicht erfasst. In diesem Fall kann der Index im Emblem darüber Auskunft geben, ob RFID-Erfassungsgerät und RFID-Transponder technisch zusammenpassen. Auch gibt der Index einen Hinweis auf die spezifische Anwendungsebene, also Produkt, Verpackung, Container etc. [13]. Für das Bauwesen d.h. bautaughliche Transponder gibt es derzeit noch keine Vereinbarungen.

## 4 Grundlagen RFID-Sensor-Technik

Neben den reinen Identifikationssystemen gewinnen Transpondersysteme mit eingebetteter Sensorik für verschiedenste Anwendungsfelder zunehmend an Bedeutung. Neue Entwicklungen auf dem Sektor der Mikrosystemtechnik und -integration erlauben die Einführung innovativer Produkte in diesen Bereichen.

Der Erweiterung zu neuen Anwendungsfeldern besteht in der Anbindung von Sensoren an die Transponder-Elektronik. Prinzipiell sind in einem Transponder-ASIC integrierte und extern anschließbare Sensoren möglich. Neben den Sensoren selbst sind weitere Komponenten, wie Signalanpassung und -wandlung und eine erweiterte Informationsverarbeitung notwendig, die insgesamt zu einer deutlichen Steigerung der Funktionalität aber auch der Komplexität führen. Bild 13 zeigt in einem Blockbild die Funktionskomponenten eines solchen passiven Transponders.

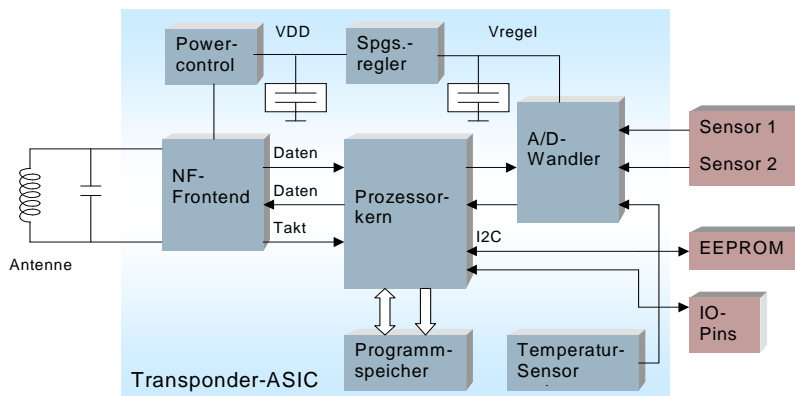


Bild 13: Blockschaltbild eines passiven Transponders für ID- und Sensor-Anwendungen

Um die entstehende größere Funktionalität zu handhaben, eignet sich der Einsatz eines Prozessorkerns als zentraler Bestandteil für die interne Ablaufsteuerung und Datenverarbeitung. Dies ermöglicht in der Entwurfsphase eine schnelle und flexible Anpassung an die beabsichtigte Anwendung. Für eine Single-Chip Lösung als Endprodukt ist der Programmcode aus wirtschaftlichen Gründen als ROM zu realisieren. Das Hochfrequenz-Frontend dient als Kommunikationsschnittstelle mit den Funktionen Modulation/Demodulation der Sende-/Empfangsdaten und der Bereitstellung der Versorgungsspannung.

Diese Art der Erweiterung von einfachen Ident-Transpondern zu Daten-/Telemetrie-Transpondern ermöglicht weiterhin einen kostengünstigen Aufbau, da nur die Komponenten Transponder-Chip, Antenne (z.B. gedruckte Spule) und Gehäuse notwendig sind. Eventuell muss ein externer Sensor in Abhängigkeit von der Anforderung zugefügt werden. Durch die Einbindung der Sensoren steigt gegenüber den einfachen RFID-Systemen die Komplexität des Systems. Neben dem Mehraufwandes der Hardware im Transponderschaltkreis sind die Punkte Kalibrierung und Nachkalibrierung, Medienanbindung und Softwareerweiterung zu berücksichtigen. Z.B. ist für eine Medienanbindung eines Feuchtesensors der Zugang des zu messenden Mediums an den Sensor sicher zu stellen, gleichzeitig aber auch die Kapselung der übrigen Schaltung langzeitstabil zu gestalten.

Je nach Sensor und Anwendungsumgebung können so die Kosten für einen passiven Sensortransponder um den Faktor zwei bis zehn, auch bei hohen Stückzahlen, höher liegen als bei RFID-Transpondern. Erste Lösungen sind bisher in höherpreisigen Anwendungen eingeführt:

- In der Wartung und Instandhaltung dienen passive Temperaturtransponder zur Überwachung von Betriebstemperaturen an Anlagenteilen (z.B. Lager von Pumpen).
- In der Medizintechnik werden passive Drucksensor-Transponder im LF-Frequenzbereich als Implantate zur Messung des Blutdrucks in Herznähe oder des Hirndrucks bei Hydrocephalus-Patienten eingesetzt (Bild 14 links).
- Für diverse Anwendungen bietet z.B. die Firma Microsensys unter dem Markennamen TELID®200 passive LF-/HF-Sensortransponder<sup>1</sup> an, die zur Erfassung von Temperatur oder Temperatur und Druck dienen (Bild 14 rechts).

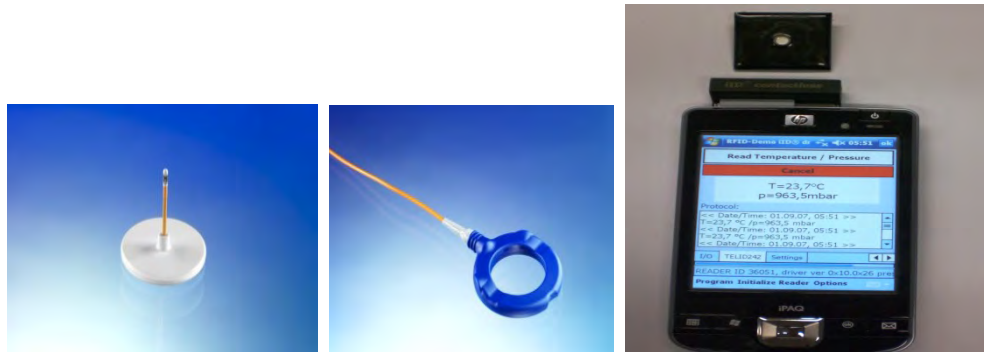


Bild 14: Beispiele für passive LF-Sensor-Transpondersysteme.

#### 4.1 Verfügbare Sensoren für Transpondersysteme

Sensoren sind technische Bauteile, welche physikalische und chemische Eigenschaften wie z.B. Temperatur und Feuchtigkeit erfassen und in eine elektronische Größe umwandeln. Grundsätzlich ist es möglich, einen RFID-TAG mit unterschiedlichen Sensoren zu versehen<sup>2</sup>. Hierzu sind diese Parameter geeignet: Temperatur, Feuchte, Druck, Schock, Beschleunigung, Licht, pH- Wert, Gasdetektor, Leitwert.

Ähnlich wie bei den Transpondern unterscheidet man zwischen aktiven und passiven Sensoren. Aktive Sensoren sind sog. Spannungserzeuger und wandeln die gemessenen Parameter in elektrische Energie um. Für ihre Funktion benötigen sie aber selber Energie. Passive Sensoren dagegen reagieren auf nichtelektrische Größen wie z. B. eine Widerstandsänderung und sind daher beim Messen nicht auf eine Hilfsenergie angewiesen. Lediglich beim Auslesen des Sensors wird Strom benötigt.<sup>3</sup> Alle aufgenommenen Messwerte können auf dem Mikrochip des Transponders gespeichert werden.

Aufgrund der Erweiterung der RFID- Technik durch die entsprechende Sensorik ergeben sich viele neue Möglichkeiten und Anwendungsbereiche, welche mit anderen Auto- ID- Systemen wie dem Barcode nicht realisierbar sind. Die Bild 15 zeigt den recherchierten Entwicklungsstand der RFID-Transponder, RFID-Sensortechnik und Lesegeräte (Reader), gegliedert in Funktion und Frequenzbereich (Stand 2012).

<sup>1</sup> TELID®200 von Microsensys, <http://www.microsensys.de/index.php?id=58>, zuletzt abgerufen am 26.09.2012

<sup>2</sup>Vgl. Hans- Jörg Bullinger/ Michael ten Hompel (Hrsg.), Beitrag von Gerd vom Bögel: Internet der Dinge, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2007, S. 167

<sup>3</sup>Vgl. GS1 Germany: EPC/ RFID und Sensorik – Grundlageninformation, 2009, [http://www.gs1-germany.de/internet/common/downloads/epc\\_rfid/3031\\_sensorik.pdf](http://www.gs1-germany.de/internet/common/downloads/epc_rfid/3031_sensorik.pdf), S. 3 ff., zuletzt abgerufen am 02.03.2012

		LF	HF	UHF	Mikrowelle
ID-Tag	passiv				
	aktiv				
Sensor	Temperatur				
	rel. Feuchte				
	Wasser				
	Druck				
	Dehnung				
	Licht				
Reader	mobil				
	stationär				

• **Legende**

- in Entwicklung
- Vorserie/Pilot
- Produkt

Bild 15: Übersicht zur Verfügbarkeit von Komponenten für RFID-Sensor-Systeme.

#### 4.1.1 Sensortechnik Temperaturmessung

Die Temperaturmessung mittels drahtlos auslesbarer Sensoren ist interessant für zahlreiche Monitoring-Aufgaben an unzugänglichen Orten in der Automatisierungstechnik. Beispiele sind die Überwachung von Lagertemperaturen an Wellen oder von Prozesstemperaturen in Chemieanlagen. Für solche Messungen der Temperatur sind zahlreiche Sensoren am Markt verfügbar. Die klassischen Sensoren der PT-Reihe, z.B. PT100<sup>4</sup> eignen sich für die RFID-Technik weniger gut, da der Energieverbrauch deutlich zu hoch ist. Auch die sonst häufig verwendeten Thermoelemente sind nur bei aktiven Systemen zu finden, auch nur dort, wo es die Randbedingungen (hohe Temperaturen) zwingend erfordern, da die Auswerteschaltung für die Thermoelemente zu aufwändig ist. Halbleitersensoren wie z.B. der TMP112<sup>5</sup> liegen im Stromverbrauch bei wenigen Mikroampere und bieten geringere Stückkosten im Vergleich zu den oben genannten Sensoren. Sie sind somit für das Bauwesen besser geeignet solange die zu messenden Temperaturen nicht über 125 °C liegen. Derzeit finden sich in allen verfügbaren passiven Temperatursensortranspondern solche Halbleitersensoren. Sie sind in den Transponderschaltkreis nicht austauschbar integriert und stellen dadurch eine kostengünstige Lösung dar (siehe Kap. 4.3 Produktbeispiele).

#### 4.1.2 Sensortechnik Druckmessung

Die Druckmessung in Transpondern erfordert auch hier besonders stromsparende Sensoren im Hinblick auf die Messung selbst als auch auf das Interface zu mikroelektronischen Schaltungen, die das Signal weiter verarbeiten. Die häufig verwendeten piezoresistiven Drucksensoren kommen daher in Transpondern nicht zum Einsatz, eher sind die piezoelektrischen und kapazitiven Drucksensoren im Einsatz. Eine Übersicht und das Funktions-

<sup>4</sup> Pt100-Sensoren/ Temperaturfühler in Wikipedia, <http://de.wikipedia.org/wiki/Pt100>, zuletzt abgerufen am 21.08.2012

<sup>5</sup> Datenblatt Temperatursensor von Texas Instruments, TMP112 High-Precision, Low-Power, Digital Temperature Sensor, <http://www.ti.com/product/tmp112>, zuletzt abgerufen am 21.08.2012

prinzip hierzu sind z.B. in <sup>6</sup> zu finden. Die recht komplexe Integration eines Drucksensors in einen Transponderschaltkreis ist ebenfalls verfügbar<sup>7</sup>. Hierfür lassen sich kapazitiv arbeitende Sensoren in mikromechanischer Aufbauweise bevorzugt einsetzen, da hierbei mit sehr geringer Energieaufnahme Messungen ermöglicht werden. Die obere Platte eines Kondensators ist als Membran ausgelegt, die sich durch Druckeinwirkung verformt und eine Änderung der Kapazität bewirkt. Diese Änderung kann z.B. mittels einfacher CCO (capacitiv controlled oscillator) ausgewertet werden. Bild 16 zeigt den Aufbau eines solchen Drucksensorelementes.

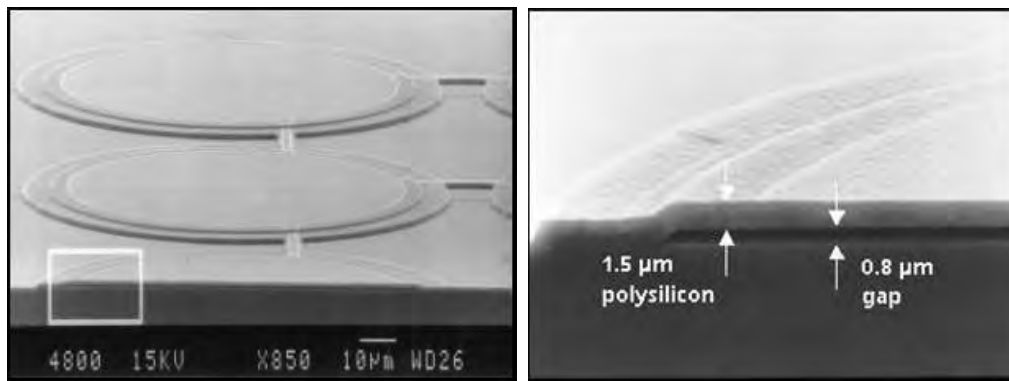


Bild 16: Aufbau eines mikromechanischen Drucksensorelements in Schnittdarstellung.

#### 4.1.3 Sensortechnik Feuchtemessung

Die Feuchtemessung unterteilt sich für die Anwendungen der Bauindustrie in die beiden Bereiche Luftfeuchtemessung und Bauteilfeuchtemessung. Die Technik zur Erfassung der Luftfeuchte schließt die Messung der Materialfeuchte bei Stoffen wie Faserdämmstoffe mit ein. Als geeignetes Messprinzip für den Einsatz in Transpondern dient meist ein kapazitiver Sensor. Durch die Anwesenheit von Wassermolekülen mit der hohen Dielektrizitätskonstante von  $\epsilon_r = 81$  ändert sich die Kapazität des Sensors. Somit ist die Auswertung der relativen Luftfeuchte leicht möglich. Zur Umrechnung in den absoluten Feuchtegehalt ist zusätzlich eine Temperaturmessung notwendig und Anwendung der Umrechnungstabelle aus der Literatur. Kritisch ist eine genaue Messung in den Grenzbereichen unter 5 % und über 95 % relativer Luftfeuchte, da hier starke Nichtlinearitäten der Sensoren auftreten können und hohe Aufwände in Kalibrierung erforderlich werden. Ebenso ist die Betauung zu berücksichtigen. Tritt z.B. durch starke Temperaturwechsel die Bildung von Tauwasser auf der Sensoroberfläche auf, können auch nach dem Abtrocknen Fehlmessungen auftreten. Insbesondere durch Rückstände wie Kalk oder Rückstände aus Dämmstoffen stellen sich Verschiebungen im Ausgangssignal ein. Hochwertige Sensoren, die sich auch für aktive Transponder eignen, sind z.B. von der Firma Sensirion oder Hygrosens (Kap. 10.5) zu beziehen. Diese beinhalten bereits ein Standard-Interface zur Anbindung an Sensormodule. Passive Lösungen, die für unzugängliche Wandaufbauten benötigt werden, sind derzeit erst als Prototyp verfügbar, siehe Kap. 6.2 und 6.6. Die Bauteilfeuchte wird in der Regel durch Impedanz-Messverfahren bestimmt. Zwei Elektroden sind dabei in das Bauteil ein-

<sup>6</sup> Übersicht und Erläuterung zu Drucksensoren, <http://de.wikipedia.org/wiki/Drucksensor>, zuletzt abgerufen am 23.08.2012

<sup>7</sup> H.-K. Trieu: Surface micromachined pressure sensor technologies, in : Proceedings Sensors Expo & Conference Fall 2002, Boston, MA, September 23-26, 2002, pp. 111-122



zubringen oder mit Prüfspitzen aufzusetzen. Gemessen wird dann die Impedanz (komplexer elektrischer Widerstand) zwischen den Elektroden. Hierbei ist für jede Elektrodenanordnung und für jeden Baustoff eine Kalibrierung erforderlich. Somit sind die Sensoren auf einen bestimmten Baustoff z.B. Buchenholz oder Kalksandstein abgestimmt.

#### 4.1.4 Sensortechnik Lichtmessung

Die Lichtmessung kann z.B. im Gebäudebetrieb für eine Reihe von Funktionen verwendet werden. Als klassische Einsatzbereiche sind dabei die Abschattung von Sonneneinstrahlung durch Jalousien und Dämmerungsschalter zu nennen. Zunehmend finden Lichtsensoren auch in der automatischen Regelung der Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz Anwendung. Durch den Einsatz von Farbfiltern oder Photodioden mit selektiver Empfindlichkeit bestimmter Wellenlängen können derzeit Regelungen für gewünschte Farbspektren realisiert werden. Interessant sind diese Funktionen z.B. für Kunstausstellungen, Gewächshäuser oder Therapie- und Reha-Einrichtungen für die Einstellung der individuellen Behaglichkeit. Für batteriebetriebene Sensormodule finden nach wie vor einfache Photodioden<sup>8</sup> und lichtempfindliche Widerstände Anwendung. Trotz des relativ hohen Stromverbrauchs werden Batterielebensdauern von mehreren Jahren erreicht, wenn die Abtastrate klein ist (z.B. 2 Minuten)<sup>9</sup>. Technisch betrachtet sind RFID-basierte Lösungen auch mit hoher Abtastrate möglich, da lichtempfindliche Bauteile als Chip-integrierte Lösung leicht zu realisieren sind. Am Markt befindliche Produkte sind allerdings nicht bekannt.

#### 4.1.5 Sensortechnik DMS-Messung

Dehnungsmessstreifen (DMS) bestehen aus dünnen Folien, auf denen mäanderförmig Leiterbahnstrukturen aufgebracht sind. An diesen kann ein elektrischer Widerstand gemessen werden, der sich bei mechanischer Spannung der Folie verändert (Bild 17). Schon geringe Dehnungen des Streifens im Bereich von wenigen Mikrometern führen zu leicht auswertbaren Widerstandsveränderungen. Somit lassen sich in Konstruktionen unabhängig vom verwendeten Werkstoff Stahl, Beton oder Holz Belastungen als Durchbiegung z.B. messen. Informationen zur Funktionsweise von DMS sind z.B. unter <sup>10</sup> zu finden.



Bild 17: Aktiver RFID-Transponder mit externem DMS-Sensor auf Trägerplatte (links) und DMS-Sensor (Nahaufnahme), nach <sup>11</sup>.

<sup>8</sup> Funktionsbeschreibung von Photodioden <http://de.wikipedia.org/wiki/Photodiode>

<sup>9</sup> IMS Sensornetzwerk [http://www.ims.fraunhofer.de/uploads/media/Wireless\\_Sensor\\_Networks\\_Fraunhofer\\_IMS.pdf](http://www.ims.fraunhofer.de/uploads/media/Wireless_Sensor_Networks_Fraunhofer_IMS.pdf)

<sup>10</sup> <http://de.wikipedia.org/wiki/Dehnungsmessstreifen>

<sup>11</sup> ME-Meßsysteme GmbH, Hennigsdorf, <http://www.me-systeme.de/dehnungsmessstreifen/index.html>, zuletzt abgerufen am 21.09.2012



Eine Schwierigkeit besteht in der Anbringung des Dehnungsmessstreifen. In den meisten Fällen wird der Sensor aufgeklebt, so wird eine sichere Übertragung der Dehnung des Bauteils erreicht. Die Schichtdicke des Klebers und die Elastizität im gehärteten Zustand beeinflussen die Übertragung der Bauteildehnung auf den Sensor und erfordern mindestens eine Referenzmessung, um die Belastungen quantitativ bewerten zu können. Da dieser Schritt sehr aufwändig ist, wird dieses Verfahren nur in wenigen Fällen angewendet wie z.B. im Aufzugbau, wo die Messstellen bereits werksseitig hergestellt und auch kalibriert werden können. Eine DMS-Variante für den Bau wird durch die Verwendung von Trägerplatten ermöglicht. Der Sensor wird auf elastische, längere Streifen als Trägerplatte aufgebracht. Die Enden dieser Streifen lassen sich am zu überwachenden Bauteil durch Befestigungstechnik wie Verschrauben anbringen. Die Auswertung des Sensors erfolgt in ähnlicher Weise wie die bei der Lichtmessung mit Photowiderständen. Somit gelten auch die dort getroffenen Aussagen der Batterielebensdauer für batterieversorgte Funkensoren. Die Auslese mittels eines RFID-Sensors ist nicht sinnvoll realisierbar, da der Stromverbrauch zu hoch ist. Forschungsprojekte arbeiten an neuen stromsparenden Sensorkonzepten für die Dehnungsmessung. Produkte werden aber erst in einigen Jahren erwartet.

## **4.2 Lesegeräte für passive RFID-Transponder**

Wie bei den Transpondern gibt es auch hier eine große Vielfalt an verschiedenen Bauformen. Generell besteht das Lesegerät je nach integrierter Technologie aus einer Lese- und/oder Schreibeinheit und einer Antenne. In Abhängigkeit von ihrer Funktion existieren große stationäre Reader und mobile Einheiten in der Größe eines USB-Sticks oder einer SD-Karte. Trotz der unterschiedlichen Varianten besteht die Funktion des Lesegerätes darin, die auf dem Transponder gespeicherten Daten zu entschlüsseln und an das angeschlossene Informationssystem weiterzuleiten. Je nach Art des Lesegerätes funktioniert das auch auf umgekehrtem Weg. Verfügt der Reader über die Funktion des Schreibens, so können über ihn Daten vom System auf den Transponder kommuniziert werden [27].

Werden anstelle normaler Transponder mit ID- und Datenfunktion Sensortransponder eingesetzt, muss das Lesegerät über eine spezielle Software-Erweiterung verfügen. Das Prinzip der Kommunikation bleibt zwar gleich, jedoch ist dem Lesegerät der Umgang mit Daten nach bestehendem Standard noch unbekannt. Je nach Sensortransponder sind unterschiedliche Routinen notwendig, diese können sein:

- Konfiguration der Sensorauslesung,
- Initiierung einer Messung,
- Lesen von Messdaten und Kalibrierdaten aus definierten Speicherbereichen,
- Berechnung von Messdaten aus Sensorrohdaten und Kalibrierdaten nach definierten Formeln.

In der Regel gibt der Hersteller oder Lieferant eines Sensortransponders an, mit welchen Lesegeräten der Sensortransponder kompatibel ist oder bietet ebenfalls passende Geräte an. Im Beispiel in Kapitel 4.2.1 wurde in Zusammenarbeit mit einem Lesegerät Hersteller ein Standard-Lesegerät für die im Rahmen des Projekts eingesetzten Druck- und Feuchte-Sensortransponder weiterentwickelt.

### **4.2.1 Produktbeispiele für LF Lesegeräte**

Die LF- Lesegeräte arbeiten im Frequenzband 120 bis 135 kHz und nutzen zur Kommunikation die induktive Kopplung (vgl. Kap. 3), wobei die Antennen immer als Spulen ausgelegt sind. Bild 18 zeigt eine Übersicht verschiedener Reader.

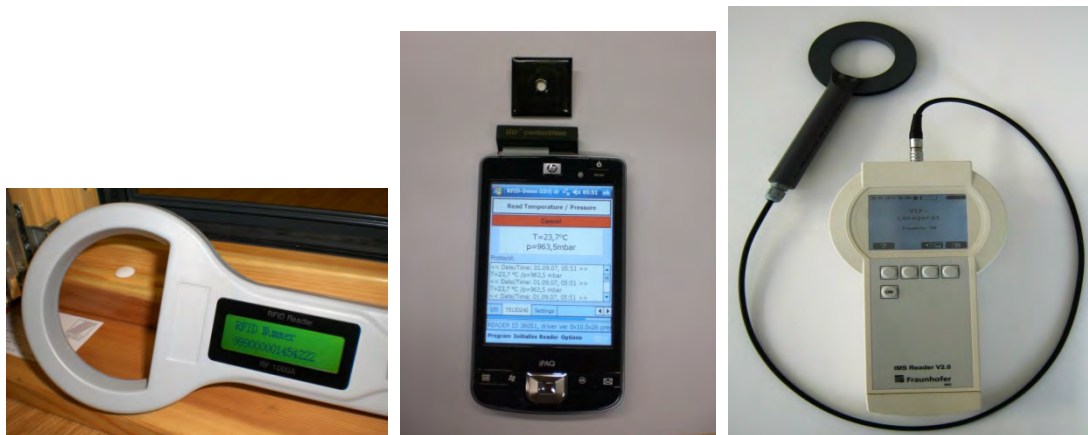


Bild 18: Beispiele für LF-Lesegeräte im MID-Range-Bereich: nur-ID-Reader (FEtronic, links), Druck-Temperatur-Sensor-Tag-Reader (microsensys, Mitte), Druck-Feuchte-Sensor-Tag-Reader (IMS, rechts).

#### 4.2.2 Produktbeispiele für UHF-Lesegeräte

Die UHF- Lesegeräte arbeiten im Frequenzband 865 bis 867 MHz und nutzen zur Kommunikation eine elektromagnetische Kopplung (vgl. Kap. 3). Die in Bild 19 gezeigte Übersicht verschiedener UHF-Produkte wurden im Projekt nicht verwendet, weil noch keine für die untersuchten Anwendungen passenden, marktgängigen UHF-Sensortransponder, auch nicht als Prototypen, zur Verfügung standen.

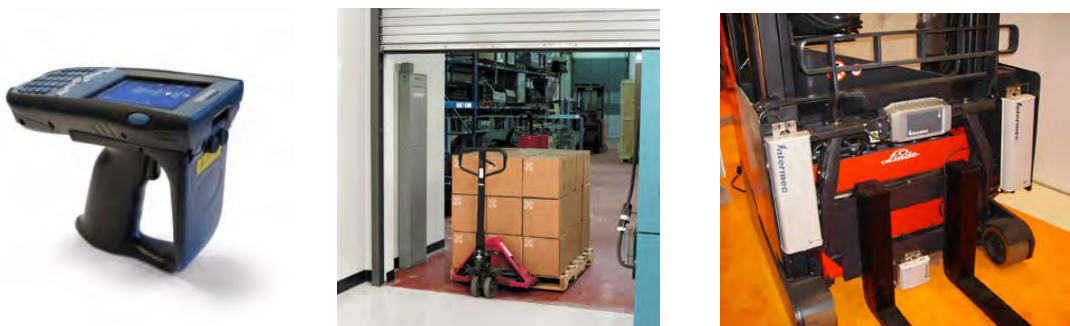











Bild 19: Übersicht einiger UHF-Lesegeräte: links: Handlesegerät, Mitte: stationäres Lesegerät als Portaleser, rechts: am Fahrzeug montiertes Lesegerät.

#### 4.3 Produktbeispiele für Sensornetz-Technik und aktive UHF-RFID-Systeme

In Kapitel 3.5 wurden bereits die Grundlagen und einzelne Details wie Energieverbrauch, Reichweiten und Protokolle ausführlich dargestellt. In der nachfolgenden Tabelle 4 sind Beispiele für marktgängige Produkte und Prototypen in einem Technikvergleich aufgezeigt.

Tabelle 4: Beispiele für marktgängige Sensornetz-Systeme und Prototypen in einem Technikvergleich

Produktname	IMS-Sensornet	XBee Sensors	funky_clima	E+E (EE240 Serie)	Hobo Node	E-senza (SB 110)	Homematic HM-ITH	AGEM-Systems	RWE Smarthome	
Nr.	Eigenschaft									
Hersteller / Vertrieb	Fraunhofer IMS	Digi International	Esys GmbH	E+E Elektronik Ges.m.b.H.	Onset Computer	E-Senza Technologies	eQ-3 AG	AGEM-Systems	RWE Effizienz GmbH	
Homepage	<a href="http://www.ims.fraunhofer.de">www.ims.fraunhofer.de</a>	<a href="http://www.digi.com">www.digi.com</a>	<a href="http://www.esys.de">www.esys.de</a>	<a href="http://www.epluse.com">www.epluse.com</a>	<a href="http://www.onsetcomp.com">www.onsetcomp.com</a>	<a href="http://www.e-senza.de">www.e-senza.de</a>	<a href="http://www.homematic.com">www.homematic.com</a>	<a href="http://www.agem-systems.de">www.agem-systems.de</a>	<a href="http://www.rwe-smarthome.de">www.rwe-smarthome.de</a>	
<b>1 Funk Schnittstelle</b>										
Frequenz	2.4 GHz	2.4 GHz	868 MHz	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	868 MHz	868 MHz	868 MHz	
Protokoll	proprietär, angelehnt an IEEE802.15.4	ZigBee	proprietär	proprietär, angelehnt an IEEE802.15.4	proprietär, angelehnt an IEEE802.15.4	proprietär, angelehnt an IEEE802.15.4	BidCos	proprietär, unidirektional	proprietär, basierend auf IPv6	
Reichweite im Gebäude / Freifeld	40 m / 120 m	40 m / 120 m	30 m / K.A.	100 m / K.A.	100 m / K.A.	70 m / 250 m	K.A. / 250 m	K.A. / 100 m	K.A. / 100 m	
Netzwerktopologie	point-to-point	mesh, star, point-to-point	point-to-point	mesh, star, point-to-point	mesh, star, point-to-point	mesh	point-to-point	point-to-point	point-to-point, point-to-multipoint	
<b>2 Sensoren</b>										
Licht	intern und extern	intern und extern	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	
Feuchtigkeit Sensor: intern / extern	intern und extern: 0 bis 100 % RLF / +/- 0.12 % RLF	intern und extern: 0 bis 100 % RLF / +/- 5 % RLF	nur intern: 2 bis 99% RLF / +/- 2.0% RLF	nur intern: 0 bis 90% RLF / +/- 3% RLF	nur intern: 5 bis 95% RLF / 0.03% RLF. +/- 3.5% RLF	nur intern: 10 bis 90% RLF / +/- 3% RLF	nur intern: 1 bis 99% RLF / +/- 5% RLF	nur intern: K.A.	nur intern: K.A.	
Temperatur Sensor: intern / extern	intern und extern: -40° C bis 120° C / +/- 0.3°C (0°C bis 60°C)	nur intern: -18° C bis +55° C / +/- 2° C	nur intern: -10° C bis +60° C / +/- 1° C (0°C bis 60°C)	nur intern: -5° C bis +55° C / +/- 0.4 C (20°C bis 40°C)	nur intern: -20 °C bis +70 °C / +/- 0.54 C (0°C bis 50°C)	nur intern: -40 °C bis +125 °C / +/- 0.4 °C (0 °C bis 50 °C)	nur intern: 20 °C bis +80 °C / +/- 1.0 °C	nur extern: -55 °C bis +125 °C / +/- 0.5 °C	nur intern: +5 °C bis +35 °C K.A.	
DMS	2 to 4% Max	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	
zusätzliche Sensorschnittstelle	Analogeingang: 0 bis 3 Volt und I2C-digitale Sensorschnittstelle	Analogeingang: 0 bis 2,5 Volt	nein	nein	nein	Analogeingang: K.A.	Analogeingang: K.A.	Analogeingang: K.A.	nein	
<b>4 Messrate</b>										
Konfigurierbar	per Software	per Software	per Software, Bereich: 1s bis 18h	per Software, Bereich: 1s bis 18h	per Software, Bereich: 1s bis 18h	per Software, Bereich: 10s bis 1Tag	per Software, Bereich: 120s - 180s	per Firmware, Bereich: 60s - 300s	K.A.	
<b>5 Interner Speicher</b>										
Anzahl Messwerte	keine	keine	13.000 Temperatur oder Feuchte	etwa 4.000	etwa 4.000	98	keine	keine	keine	
<b>6 Energie</b>										
Batterie Typ	3 x AA alkaline 1.5V Batterien	3 x AA alkaline 1.5V Batterien	Lithium-Knopfzelle-Batterie CR 2450	4 x AA alkaline 1.5V Batterien	3 x AAA alkaline 1.5V Batterien	2 x AA (3000mAh)	2 x AA	2 x AA	2 x AA	
Batterie Lebensdauer in Abhängigkeit von Messrate	keine Angabe	1 x pro 30 sec -> 1,5 Jahre 1 x pro 1 h -> 6 Jahre	< 1 Jahr	1 x pro 5 min -> >1 Jahr	1 x pro 15 min -> 1 Jahr	1 x pro 5 min -> 5 Jahr 1 x pro 15 min -> 7 Jahre	ca. 2 Jahre	>1 Jahr	ca. 2 Jahre	
<b>7 Software</b>										
Betriebs-, Bedien-Software und Schnittstellen	Sensornet-Viewer (PC-Software mit Visualisierung)	Pythonskripte die in den Gateways eingespielt werden können, Software zur Konfiguration	MINIDAN-Steuerungs- und Auslesesoftware	Webtool zur Konfiguration, ADF Loggersoftware zur Datenspeicherung und -visualisierung	HoboWare, Datenloggingssoftware	SenzaWMS, zentrale Verwaltungs- und Steuerungssoftware	HomeMatic Weboberfläche zur Konfiguration HomeMaticScript Sprache zur Entwicklung von eigenen Vorgängen	FBS 21 Software zur Konfiguration und Anzeige der Messwerte	Webtool zur Konfiguration und zur Visualisierung	

#### 4.4 Middleware, ID-Datenübertragung

Die Ident-Datenübertragung von den Transpondern zu den Informationsebenen (Mensch, Datenbank) erfolgt auf digitaler Ebene mit Hilfe der Middleware. Eine Middleware ist eine Ebene in einem speziellen Softwaresystem und setzt sich aus mehreren Teilen zusammen: der Kommunikationsebene, welche die einzelnen Systeme untereinander verbindet, der Verarbeitungsebene der RFID-Daten und der Datenbankebene [28]. Durch die Echtzeitverarbeitung von Daten und Informationen besteht eine wesentliche Aufgabe der Middleware darin, aus der unzähligen Datenmenge die unwichtigen Informationen zu filtern und nur die notwendigen Informationen aufzubereiten und bedarfsgerecht an den Endverbraucher in das Backend weiterzuleiten. Die Middleware kann also als eine Art „Dienstleistung“ angesehen werden. Bild 20 stellt den Zusammenhang und den Aufbau eines solchen RFID-Datenübertragungs-Systems dar.<sup>12</sup>

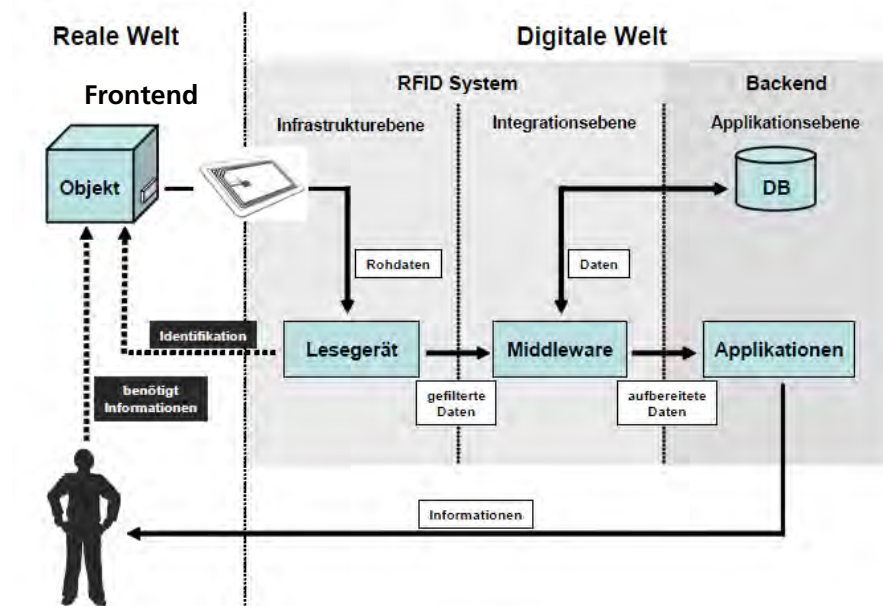


Bild 20: Aufbau der ID-Datenübertragung in einem RFID-System [27]

Eine weitere Aufgabe der Middleware besteht in der Koordination und Steuerung des Datenstroms („Telegramme“) zu den angeschlossenen Lesegeräte und Applikationen<sup>13</sup>. Wie in Bild 20 dargestellt, leitet der mit „Reader“ gekennzeichnete Block die Telegramme, die als serieller Datenstrom vom RFID-Transponder kommen, an die Middleware gefiltert weiter. Die Filterung ist in der Regel nur die Prüfung der Telegramme auf ihre Gültigkeit. Die Telegramme sind in den Normen definiert, z.B. für die passiven Systeme in [13] und setzen sich typischerweise wie folgt zusammen:

Header	Nutzdaten	Sicherungscode	Stop
--------	-----------	----------------	------

Das folgende Telegramm zeigt an einem Beispiel eine weitere Unterteilung der Nutzdaten:

Länge	ID	Zähler	Typ	Messwerte Sensoren	Versorgungsspannung
-------	----	--------	-----	--------------------	---------------------

<sup>12</sup> Vgl. Tamm/ Tribowski [25], S. 19 ff.

<sup>13</sup> Vgl. Melski/ Schumann [27], S. 4



Die Filterung im Reader prüft zunächst mit dem Sicherungscode, ob Fehler in der Übertragung aufgetreten sind. Im Fehlerfall wird ein Telegramm verworfen, bei Fehlerfreiheit werden die Nutzdaten an die Middleware (Beispiele: Programm Sensornet-View, Bild 21 oder Programm X-CTU, Bild 22) zur weiteren Verarbeitung übergeben.

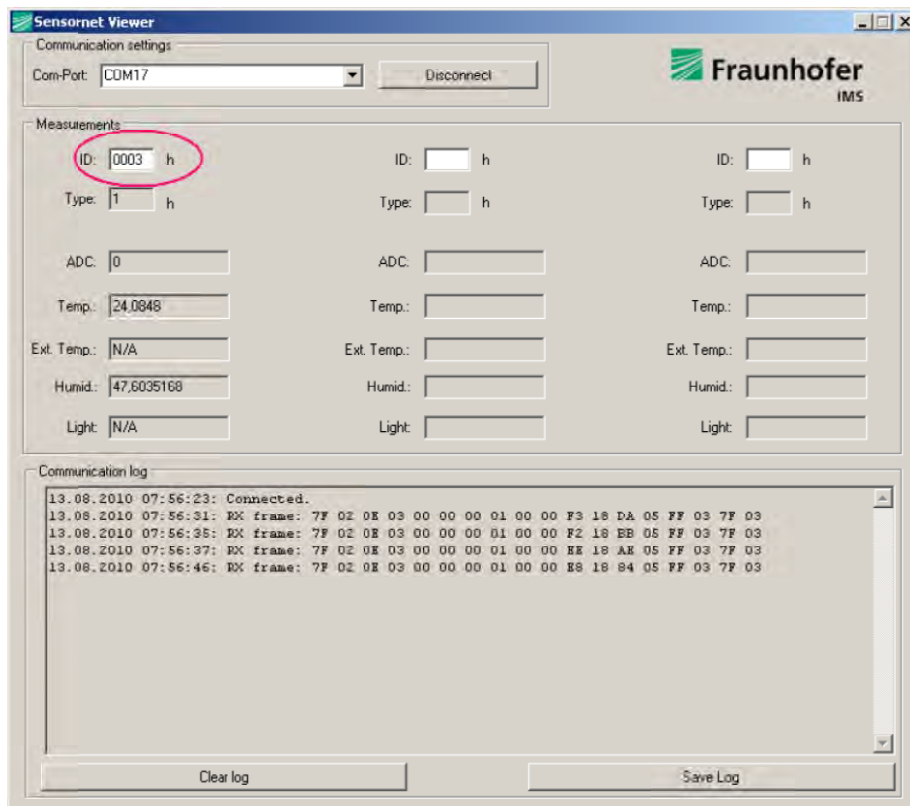


Bild 21 : Ausgabe der Sensorinformationen mit der Software Sensornet Viewer auf dem Bildschirm am Beispiel ID-Tag 0003 mit Feuchtesensor.

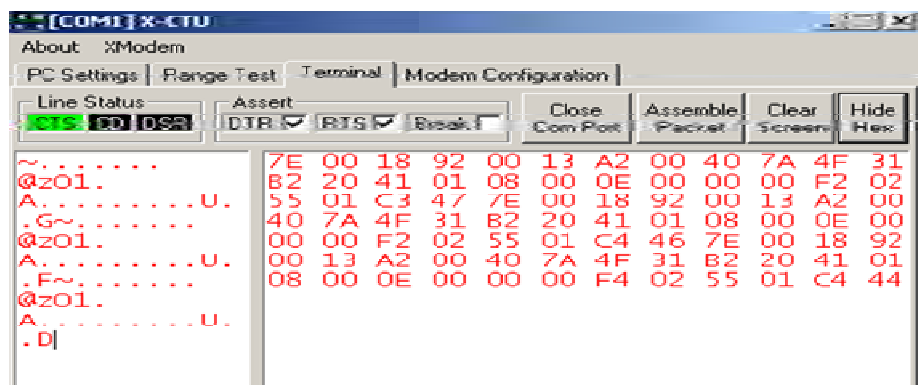


Bild 22: Screenshot als Beispiel für die Erfassung der binären Daten des Feuchtesensors XBee mit dem Sensornetzwerk-Programm X-CTU (Firma Digi<sup>14</sup>).

<sup>14</sup> Siehe <http://www.digi.com/de> , X-CTU-Manual: [http://ftp1.digi.com/support/documentation/90001003\\_A.pdf](http://ftp1.digi.com/support/documentation/90001003_A.pdf) , zuletzt abgerufen am 02.09.2012

Weitere Hinweise auf die Verknüpfungen der Sensordaten zur Nutzung im Gebäudebetrieb und einige Visualisierungen dazu enthält Kap. 6.7. und 7.2.

Im Baubetrieb und im Gebäudebestand sind die Verbreitung und der Einsatz von Datenverarbeitungsprogrammen als „Middleware“ sehr unterschiedlich. Auf der Baustelle ist Middleware nur auf Großbaustellen für die Baulogistik zu finden, während kleine Baustellen meist zentral beim Bauträger oder Planer verwaltet werden, i.a. ohne Unterstützung durch eine Middleware. Im Gebäudebestand findet man Middleware derzeit im Nichtwohnbau und bei großen Wohnbaugesellschaften in der Gebäudeautomatisierung. Dort verwalten diese Software-Programme Daten z.B. aus den Bereichen Klimasteuerung (Heizung, Kühlung, Lüftung, Abschattung), Verbrauchserfassung (Metering) und Lichtsteuerung. Umfassende Lösungen in diesem Segment werden z.B. von der Firma Beckhoff<sup>15</sup> angeboten. Diese enthalten bereits die Schnittstellen zum „Frontend“, also zur Datenerfassung mittels RFID-Transponder und Sensor-RFID-Tags.

In der Praxis ist jedoch für die Anbindung der Ident- und Sensor-Frontends an bestehende Gebäudeautomatisierungssysteme eine Software-Anpassung notwendig, die vom Software-Haus durchzuführen ist und vom Kostenaufwand im Bereich der Hardware-Investition liegt oder diese gar überschreitet. Die bestehenden Software-Tools, die die Hersteller von den Sensorsystemen mit anbieten (vgl. Tabelle in Kap. 4.3) helfen bei der Integration in ein Gesamtsystem nicht weiter. Sie sind in der Regel eigenständig arbeitende Applikationen, die zur Visualisierung und Dokumentation (Speicherung) der Identdaten dienen.

Ein positives Beispiel für eine offene Middleware-Lösung mit einem WiFi-Gateway kommt von der italienischen Firma Openpicus<sup>16</sup>, die der EnOcean-Allianz beigetreten ist. Dies System unterstützt das EnOcean-Protokoll und es lassen sich so EnOcean-Geräte schnell und einfach mit dem Internet verbinden (siehe Bild 10). Als System im Gebäude funktioniert es auch dann, wenn keine aktive Internet-Verbindung besteht. Es wird mit einer quelloffenen Demo-Anwendung zum Senden und Empfangen von EnOcean-Funktelegrammen geliefert und soll so dazu motivieren, Anwendungen für Smartphones und Tablet-PCs zu entwickeln, mit denen das „intelligente Zuhause“ Realität wird [22].

Ein Beispiel für eine solche Erweiterung der Funktionalitäten im „Facility Management“ stellt die Visualisierung der geplanten Energieeinsparung nach einer Sanierung dar. Die bei der Bauerstellung entstandenen Energieausweise und Berechnungen eignen sich als Basis für die digitale Gebäudeakte und für die Verwaltung von Wartungs- und Reparaturarbeiten. Mit der Anbindung der Sensor-RFID-Systeme an die Gebäudeakte ist insbesondere die Früherkennung von anormalen Betriebszuständen möglich. Weitere Hinweise dazu werden in Kap. 6.1.4 Anwendung VIP-Nutzungsphase und in Kap. 6.3.3 Integration in Gebäudeautomation sowie in Kap. 6.7 zum Gebäudebetrieb mit RFID-Technik gegeben. Das in der ARGE RFIDimBau vorgesehene sog. „Schnittstellenprojekt“ soll einen weiteren Baustein auf dem Weg zur Vermeidung von Datenverlusten innerhalb der Bauprozesse liefern. Darin stellt die Middleware von RFID-Transpondersystemen und die Verknüpfung der Datenhaltung aus den dezentralen Speicherchips mit den zentralen Datenbanken ein wesentliches Element dar (siehe Kap. 9.2).

<sup>15</sup> Siehe <http://www.beckhoff.de/> -> Solutions -> Building Automation, zuletzt abgerufen am 02.09.2012

<sup>16</sup> Siehe <http://www.openpicus.com/>, zuletzt abgerufen am 02.09.2012

## 5 Anwendungen der RFID-Technik im Hochbau

„Konstruktionen intelligent machen - Geräte, Materialien kennzeichnen - Kosten senken - Konflikte vermeiden!“ Mit diesen Stichworten charakterisierten die Mitglieder der ARGE RFIDimBau ihre Vision im sog. Manteldokument zu Projektbeginn Ende 2006. Sie wiesen auf Chancen hin, die die ARGE in der Weiterentwicklung und Anwendung der RFID-Technik im Bauwesen, vor allem auch im Hochbau, sieht. Dazu waren in weiteren Präsentationen der ARGE die folgenden Stichworte genannt: „Bauqualität erhöhen - Baukultur stärken - illegale Beschäftigung eindämmen - Interessen integrieren - Image verbessern“. Das Gesamtziel der ARGE RFIDimBau einer langfristigen Verbesserung von Qualitäten, Bauzeiten und Kosten sowie Erhöhung der Sicherheit eines Bauwerks entlang der Wertschöpfungskette in der Bau- und Immobilienwirtschaft kann allerdings nur erreicht werden, wenn die im Folgenden dargestellten Rahmenbedingungen zur Demonstration und Umsetzung der Anwendungen aus den Teilprojekten gegeben sind.

### 5.1 Allgemeine Übersicht, Stand

Baukonstruktionen bestehen i. a. aus Bauteilen wie Tragwerk, Dächer, Fenster oder Fassaden. Diese sind aus unterschiedlichen Baustoffen und Schutzschichten zusammengesetzt. Die Qualität des einzelnen Bauproduktes entscheidet mit über die Dauerhaftigkeit, den Aufwand für den jahrzehntelangen Bauunterhalt und die Wirtschaftlichkeit der Baukonstruktion. Bei der Optimierung von Bausystemen hinsichtlich geringer Wärmeverluste, gutem Schall- und Brandschutz, Tauwasser- und Schimmelfreiheit etc. stehen die wesentlichen Bauproduktbereiche wie Dämmstoffe, Verglasung-Fenster-Fassade und Tragwerk-Mauerwerk im Wettbewerb. Deshalb sollten die bauphysikalischen Kenndaten so vorliegen, dass auch die für eine statistische Bewertung benötigten Angaben über die Datenherkunft (Messung, Berechnung, Proben) bekannt sind. Dann können mit den heute verfügbaren Berechnungsprogrammen wie z. B. für Energieeffizienz, Statik/ Versagenswahrscheinlichkeit und Ökobilanz die Vergleiche zwischen unterschiedlichen Bausystemlösungen gezogen werden. Damit lässt sich der Nutzen aus einer qualitativ höherwertigen Variante der Bauausführung vorab nachvollziehbar aufzeigen und bessere Preise erzielen („nicht der Billigste bekommt den Zuschlag“). Bauprodukte mit CE-Kennzeichnung auf der Basis der EU-weit harmonisierten Normen erfüllen teilweise nicht alle bisherigen nationalen Anforderungen. Für den Planer, Handwerker vor Ort und den Bauherrn sind diese Unterschiede in den relevanten Kennwerten der Bauprodukte derzeit wenig transparent.

Bauprodukte sind heutzutage leider nicht nach einem einheitlichen Klassifizierungssystem gekennzeichnet. Verschiedene Systeme (baustoffkatalog, eCl@ss, freeclass etc.) bieten unterschiedliche Kenndaten und Hilfestellungen an. Ähnliches gilt für die Kennzeichnungssysteme der Produkte selbst. Neben den häufigen Farbcodierungen und Barcodelösungen werden auch vereinzelt elektronische RFID-Transpondersysteme im Bauwesen angeboten. Diese RFID-Etikettierung ist derzeit in der KFZ-, Maschinen- und Textilbranche häufiger im Einsatz. Welcher Funk-Frequenzbereich gewählt wird (LF 125 KHz, HF 13.56 MHz, UHF 868 MHz oder MW 2.45 GHz) bestimmt der gewünschte Einsatzzweck (Produktart, Transportweg, Umgebungsbedingungen, Untergrundmaterial, praktisch nutzbare Leseentfernungen etc.). Das wesentliche Problem neben der Festlegung der RFID-Technik, der Anbringung der Transponder und der Dateninhalte ist heute die Festlegung der Erfassungspunkte bei der Produktherstellung, beim Einbau und im Betrieb sowie die Festlegung der Datennutzung selbst.

Mit der automatischen Verfolgung der Produkte über den Transport hinaus wird aus einem einfachen Vorgang ein komplexes Problem, das nicht nur in die eigene Firma sondern in die vor- und nachgelagerten Bereiche eingreift. Aber nur durch eine solche gekoppelte Datenvernetzung kann der zusätzliche Aufwand der teureren RFID-Transponder als Mehrnutzen über die Bauwerkslebensdauer amortisiert werden. Die Zusatzeffekte und verborgenen Möglichkeiten der besseren Steuerung von Abläufen mittels der automatischen Identifikationstechnik ergeben sich aus einer Analyse des bisherigen Betriebsablaufs mit den gewünschten und möglichen Sollzuständen. Der Mehrwert kommt aus

- der Klärung der Abläufe (organisatorisch),
- der Einbindung in das Netzwerk Lieferanten - Kunden (Supply Chain),
- der Beschleunigung von Tätigkeiten (logistisch),
- der Reduzierung von Suchzeiten sowie von Fehlern (logistisch),
- der gedanklichen Umstellung der Mitarbeiter (psychologisch),
- der teils neu zu strukturierenden EDV (technisch),
- der ganzheitlichen Auswertung der erhaltenen Daten auch zur Nachweisführung (informationstechnisch),
- der Verbindung der erfassten Daten zu ergänzenden Daten der Produktion (informationstechnisch),
- der Nutzung von Sensor-RFIDs zum Monitoring der Bausysteme (bauphysikalisch) und zur Betriebsoptimierung im Gebäudebetrieb (FM/ betriebswirtschaftlich).

Diese Ziele sind mit den heutigen Transpondern, Lesegeräten und Datenbanken nur als In-sellösungen in einigen Branchen außerhalb des Bauwesens umgesetzt. Die kleinteilige und konservative Bauwirtschaft war bisher nicht bereit, eine durchgängige, vernetzte elektronische Kennzeichnung zu erproben [1, 5].

## 5.2 ARGE „RFIDimBau“

Ausgangsbasis für die hier dargestellten Ergebnisse sind die bisherigen Teilprojekte der ARGE RFIDimBau [1]. Dort wurde seit 2006 mehrstufig der Einsatz der RFID-Technologie zur Optimierung von Prozessen im Bauwesen untersucht.

Projekt **InWeMo**, BU Wuppertal: Im Integrierten Wertschöpfungsmodell "InWeMo" wurden Szenarien analysiert, wie ein unternehmensübergreifender, durchgängiger, lückenloser und transparenter Informationsfluss zu gewährleisten ist. Dieser sollte präzise und in Echtzeit Eigenschafts- und Ereignisdaten aus bauleistungsprozessen über die Wertschöpfungsstufen durch den Einsatz der RFID-Technik zur Verfügung stellen. Die Grundlage für das Modell „InWeMo“ bietet das „EPCglobal-Netzwerk“ von GS1/EPCglobal. Als Demonstrator dienen Beispiele aus der Personal- und Materiallogistik bei vorgefertigten Containern für temporäre Bauten [2].

Projekt **RFID-Bauleistungsleitstand**, BU Wuppertal: Entlang der Wertschöpfungskette bei Bauprozessen wurde insbesondere die Schnittstelle „Baustelle zu Außenwelt“ im Modell BAULOG untersucht. Mit Hilfe der RFID-Technik konnten verschiedene Applikationen zur Erfassung, Kontrolle und Steuerung bauleistungsbezogener Daten entwickelt und deren Dokumentation in dem sog. Digitalen Erweiterten Bautagebuch DEBT gezeigt werden (z. B. Anwesenheitszeiten/ Abnahmeberechtigungen von Personen, Ort/Zeitpunkt von Warenein- und -ausgangskontrollen, Ort/Zeitpunkt der Bauproduktionsmittelregistrierung, Ort/Zeitpunkt der Lagerung, etc.) [7].

Projekt **IntelliBau-1**, TU Dresden: Im ersten Teilprojekt der TUD wurde die technische Anwendbarkeit der RFID-Technologie in Stahlbeton-Bauteilen nachgewiesen und die Praxis-tauglichkeit dieser Systeme bei der Rohbauerstellung gezeigt. Es wurden die Daten er-



mittelt, die zur Steuerung und Optimierung des Bauablaufes sowie zur Dokumentation notwendig sind und auf dem Tag vorgehalten werden sollen [3].

Projekt **IntelliBau-2**, TU Dresden: Im Lebenszyklus von Bauobjekten verursachen Medienbrüche bei der Informationsweitergabe regelmäßig Datenverluste. Mit dem Modell des "Intelligenten Bauteils" wurde eine Lösung entwickelt, um einen durchgängigen Datenfluss ohne Medienbrüche mit Hilfe der RFID-Technologie zu gewährleisten. Die Nutzungsvorteile der RFID-Technik in der Fertigteileproduktion werden dargestellt. Der Entwicklungsstand und die Praxistauglichkeit der RFID-Anwendungen im Bauprozess konnten anhand eines realen Pilotprojektes aufgezeigt werden. Durch unterschiedliche Anwendungsszenarien werden die Potentiale der RFID-Technologie in der Betriebs- und Nutzungsphase von Gebäuden vorgestellt [8].

Projekt **RFID-Leitsystem zur Navigation und Ortung**, TU Darmstadt: Zur Durchführung von Instandhaltungs-/Wartungsaufträgen in komplexen Gebäuden am Beispiel von Brandschutzobjekten wurde ein EDV-gestütztes System als Ersatz für die bisher papierbasierte Protokollierung entwickelt. Durch die Bereitstellung von Ortungs- und Navigationsfunktionen werden die Servicemitarbeiter bei ihrer Arbeit begleitet und geleitet sowie während des eigentlichen Wartungsvorgangs unterstützt. Dazu wurden u.a. standardisierte Schadenscodes und eine RFID- und Barcode-basierte Wartungsobjektidentifikation integriert. Es wurde am Beispiel des Frankfurter Flughafens gezeigt, dass mittels der Kombination aus Ortung und Navigation die Bearbeitung von Instandhaltungsaufgaben qualitativ verbessert und zeitlich beschleunigt werden kann [4].

Doch gerade in der Vor-Ort-Fertigung auf der Baustelle und bei Wartung oder Instandhaltung in und an Gebäuden tritt die Schnittstellenproblematik zwischen Gewerken und Bauprozessen besonders zu Tage. Durch die ARGE-interne Zusammenarbeit auch zum Teilprojekt „Kennzahlen/ Bauphysik“ und „Sensor-RFID“ wurde festgestellt und berücksichtigt, dass eine große Schnittmenge gemeinsam zu nutzender Daten in den ARGE-Projekten existiert. Die im Manteldokument postulierte Lösung erfordert den Lückenschluss zwischen allen Teilprojekten und ermöglicht nur damit die durchgängige praktische Anwendung. Deshalb soll das in Kap. 10.2 vorgestellte sog. „Schnittstellen-Projekt“ ab 2013 bearbeitet werden.

### 5.3 Andere Forschergruppen (FORBau, u.a.)

Einen aktuellen Überblick zur Situation der I- und K-Struktur im Bauwesen gibt Klauert 2011 in der Dissertation „Entwicklung eines RFID-basierten Informations- und Kommunikationssystems für die Baulogistik“ [30]. Hierin wird auch die Kooperation der Forschergruppen am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) der Technischen Universität München (Prof. Günthner) im Forschungsverbund „Virtuelle Baustelle ForBAU“ erläutert. Untersucht wurde die ganzheitliche Abbildung eines komplexen Bauvorhabens in einem digitalen Baustelleninformations-Modell (2007 bis 2010, siehe [www.forbau.de](http://www.forbau.de)) und eine Schnittstelle zu einer RFID-basierten Datenerfassungs-Software. Diese ist in das kommerzielle Daten-Managementsystem PRO.FILE von PROCAD integriert<sup>17</sup>.

<sup>17</sup> PROCAT-Programm PRO.FILE, siehe Visualisierung in [http://www.fml.mw.tum.de/forbau/index.php?Set\\_ID=455](http://www.fml.mw.tum.de/forbau/index.php?Set_ID=455)).

## 6 Untersuchte Anwendungen der RFID-Sensor-Technik im Hochbau

Die elektronische Kennzeichnung von Bauprodukten mit Hilfe der RFID-Technik wird sich mit der beginnenden und akzeptierten Anwendung in der Textil- und Maschinenbau-Branche verbreitern. Mit der „einfachen“ Identifizierung von Bauteilen und Bausystemen bleibt aber ein großes Nutzenpotenzial über die lange Betriebszeit von Gebäuden unberücksichtigt. Die zuvor beschriebene Integration von Sensoren in RFID-Systeme ermöglicht es, die dynamischen Vorgänge am Gebäude und den technischen Anlagen „drahtlos“ auch im Rahmen der Altbausanierung zu erfassen. Mit den im Folgenden dargestellten 3 Beispielen von Anwendungen („Energie, Nachhaltigkeit“, „Hygiene“, „Sicherheit“) wird die prinzipielle technische Machbarkeit und die Einbindung in Gebäude-Betriebssysteme gezeigt. Es konnte nicht die komplette Integration in solche Software-Systeme untersucht werden, da dies zusammen mit der Baulogistik und den Bauproduktherstellern in dem weiterführenden, abschließenden ARGE-Projekt zusammen mit der Bauwirtschaft zu leisten sein wird.

### 6.1 Anwendung Energie, Nachhaltigkeit am Beispiel von VIP

Im Zusammenhang mit Gebäuden spielt die Sensortechnik bisher hauptsächlich in Verbindung mit der Regelung und Steuerung von Heizungs-, Lüftungs- sowie Klimaanlage eine wichtige Rolle. Aber auch Sensordaten des Bauwerks selbst können zu Überwachungszwecken sehr interessant sein. Steigende Anforderungen und immer komplexer werdende Bauteile führen in der Bauwerkserstellung zu Ausführungsfehlern, die eine sensorteknische Überwachung sinnvoll erscheinen lassen. Ein Beispiel für ein sensibles Bauteil, das hohen Anforderungen genügen muss, ist die Vakuumdämmung, für die in dieser Arbeit ein neuartiges Kontrollsystem untersucht wurde. Die Überwachung mit kabelgebundenen Sensoren ist in diesem Falle nicht möglich, weswegen auf die RFID-Funktechnik zurückgegriffen wird.

Zu innovativen Dämmstoffen zählen seit einigen Jahren Vakuum-Isolations-Paneele (VIP). VIPs zeichnen sich durch eine extrem kleine Wärmeleitfähigkeit ( $< 0,01 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) aus. Dadurch weisen sie eine bis zu 10-mal geringere Dämmschichtdicke bei gleicher Wärmedämmeigenschaft im Vergleich zu konventionellen Dämmstoffen oder hochporosierten Mauersteinen auf. Die Steigerung des Dämmvermögens bei VIPs hängt entscheidend vom verwendeten Stützmaterial und des in der Hüllfolie erzeugten Vakuums ab. Um im eingebauten Zustand eine Funktions- und Qualitätskontrolle des einzelnen VIP-Elements durchführen zu können (Bild 23), bedarf es einer Kontrolle des Vakuums. Bisher ist dies nur durch aufwändige externe Messungen möglich und nicht im verbauten Zustand. Durch die Verwendung von Drucksensoren im Inneren des Paneels ist mit Hilfe der RFID-Technik ein kontaktloses Auslesen der Druckverhältnisse im VIP auch im verbauten Zustand am Gebäude möglich. Dadurch wird ein Potenzial eröffnet, den Sicherheitszuschlag der nicht genormten Bauprodukte in den bauaufsichtlichen Zulassungen zu reduzieren.



Bild 23: Anbringung von Vakuum-Isolier-Paneelen (VIP) an der Außenwand eines Gebäudes

Bei der Herstellung der VIP im Werk, dem Transport an die Baustelle, dem Einbau und im Gebrauch bis zum Ende der Nutzungszeit sind die VIP-Elemente mit der luftdicht verschweißten Umhüllung sehr empfindlich. Bei kleinsten Beschädigungen verschlechtert sich das Vakuum und somit die Wärmedämmeigenschaft. Um diese zu überprüfen, kann der Wärmedurchlasswiderstand des VIP direkt gemessen werden. Dies Verfahren dauert aber mehrere Stunden pro Messung und kann i.a. nur im Labor durchgeführt werden. Bei der Qualitätssicherung von Wärmedämmsystemen an der Baustelle soll hingegen eine schnelle, wenig aufwendige und möglichst flexible Kontrollmöglichkeit zur Verfügung stehen. Darüber hinaus ist es für den Bauteilhersteller für seine Produkthaftung von Vorteil, wenn er und der Nutzer das Dämmsystem in verschiedenen Zeiten mit einem mobilen Messsystem auch vor Ort (in-situ) kontrollieren kann.

### 6.1.1 Bestimmung der wärmetechnischen Eigenschaften bei VIPs

Zur Einschätzung der Vorteile durch das drahtlose Sensor-Messsystem werden die bisher verfügbaren Messmethoden zur Bestimmung der Wärmedämmung bei VIPs kurz erläutert und in Tabelle 5 mit der RFID-Sensor-Methode verglichen.

Beim **Verfahren mit dem Plattengerät** [31, 32] wird ein stationärer, eindimensionaler Wärmestrom durch eine elektrisch beheizte, kreisförmige oder quadratische Metallplatte erzeugt. Auf beiden Seiten der Heizplatte befindet sich ein identischer Probekörper. Auf der Außenseite der Probekörper wird jeweils eine thermisch kontrollierte Wärmesenke d.h. Kühlplatte angekoppelt. Die elektrische Energie, die über die Heizplatte die Probekörper im thermischen Gleichgewicht z.B. bei 10 °C Mitteltemperatur hält, wird hochgenau gemessen. Der entscheidende Nachteil dieses Verfahrens ist der hohe apparative Aufwand, die durch das Messgerät entstehende örtliche Gebundenheit und die lange Messzeit von mind. 6 Stunden, die für eine solche Messung nötig ist.

Das **Folienabhebe-Verfahren** wurde für die Überprüfung der Qualität von VIP bei der Herstellung<sup>18</sup> entwickelt. Dabei wird der Innendruck im VIP vergleichend „optisch“ gemessen; der Vorteil ist, dass kein integrierter Sensor oder ein Eingreifen in das Paneel nötig ist. Das Paneel liegt in einer Vakuumkammer und der Druck in der Kammer wird nun soweit abgesenkt bis sich die Umhüllungsfolie vom VIP-Kern abhebt. Dies ist dann der Fall, wenn der Druck in der Kammer minimal geringer ist als der Druck im VIP. Das Abheben der Folie

<sup>18</sup> Z.B. von den Firmen Variotec und Porextherm.

wird durch eine Laserdistanzmessung detektiert. Der Nachteil bei dieser Methode ist der relativ hohe apparative und zeitliche Aufwand, der eine vollständige Produktionskontrolle aller hergestellten VIP unwirtschaftlich macht. Dieses Verfahren ist auch für den Baustelleneinsatz und für eine Überprüfung des Paneels im eingebauten Zustand nicht geeignet. Eine von der Firma va-Q-tec entwickelte Methode, den Gasdruck im Paneel zu bestimmen, ist das sogenannte **va-Q-Check-Verfahren**. Dafür ist es nötig, bei der Herstellung ein Metallblättchen mit einem dünn aufliegenden Vlies unter der Umhüllung des VIPs anzubringen. Auf der Außenoberfläche kann nun ein erwärmter Messkopf angelegt werden, der den eingeleiteten Wärmestrom in die Metallscheibe misst. Der Gasdruck im VIP kann vom eingeleiteten Wärmestrom über Kalibrierwerte abgeleitet werden. Der Vorteil dieses Verfahrens ist die relativ kurze Messdauer von ca. 10 s. Außerdem ist auch ein mobiles System erhältlich, mit dem es möglich ist, die Paneele noch kurz vor dem Einbau an der Baustelle zu überprüfen. Eine Kontrolle nach dem Einbau mit Deckschicht über dem VIP ist allerdings nicht möglich.

Die einfachste, preisgünstigste Methode ein VIP zu kontrollieren ist die **Sichtkontrolle**. Dabei wird vor allem die Oberfläche untersucht. Das Paneel ist in Ordnung, wenn die Folienumhüllung hart ist, straff auf dem Paneelkern sitzt und eine faltige Struktur aufweist (Bild 24, links). Bei einem Paneel, das hingegen recht weich ist, dessen Folienumhüllung relativ glatt ist und unter dessen Hüllfolie sich Blasen bilden, besteht der Verdacht, dass das Paneel belüftet und somit defekt ist (Bild 24, rechts).

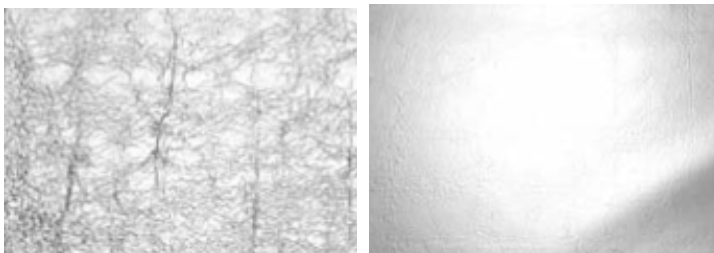


Bild 24 : Intakte Paneeloberfläche (links) und belüftete Paneeloberfläche (rechts) <sup>19</sup>

Aus Mangel an Alternativen wird diese Methode für den Baustelleneinsatz empfohlen. Der Nachteil dabei ist die große Unsicherheit bei der Kontrolle. Es werden nur stark beschädigte (vollständig belüftete) Paneele erkannt. Zudem muss die verarbeitende Person vor dem Einbau auf dieses Thema sensibilisiert und eingewiesen werden. Ein weiterer Nachteil ist, dass eine Kontrolle im verbauten Zustand nicht mehr möglich ist. Für eine Anwendung bei der Herstellung der VIP ist diese Methode ebenfalls nicht geeignet, da mit dieser Methode kein einwandfreier Zustand der Paneele garantiert werden kann.

Bei der **Thermographie** wird die Infrarotstrahlung der zu untersuchenden Oberfläche sichtbar gemacht, um thermische Schwachstellen eines Gebäudes zu erfassen. Die emittierte Wärmestrahlung hängt von der Temperatur und vom Emissionsgrad der untersuchten Oberfläche ab. Deshalb ist es unter bestimmten klimatischen Voraussetzungen möglich, defekte VIP in einer Fassade durch eine thermografische Aufnahme zu erfassen. Das Temperaturgefälle zwischen der Innenseite der Wand und der Außenseite muss mindestens 15 K betragen, direkte Sonneneinstrahlung darf nicht stattfinden. Weitere Störeinflüsse können Metallabdeckungen oder vorgehängte Fassaden sein, die eine eindeutige

<sup>19</sup> Bild entnommen aus den Vacpor® Verarbeitungs- und Produkthinweise:  
<http://www.porextherm.com/web/de/produkte/vac.htm?showprod=12>, letzter Zugriff: 20.06.2011.

Zuordnung der thermischen Schwachstelle in der Fassade erschweren. Durch das Verfahren der Thermographie ist es möglich eine vergleichende Aussage über den Zustand eines VIP im verbauten Zustand zu machen, ob das VIP funktionstüchtig oder defekt ist. Alterungseffekte, die alle Paneele betreffen, können mit diesem Verfahren nicht erkannt werden.

Tabelle 5: Vergleich der Prüfverfahren zur Qualitätskontrolle bei VIP.

Prüfverfahren	Messgröße	Testmöglichkeiten	Nachteile	Vorteile
<b>Zweiplattengerät</b> (nach DIN EN 12667)	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$	Herstellung	apparativer/zeitlicher Aufwand	Genauigkeit $0,1 \cdot 10^{-3}$ W/(m <sup>2</sup> K)
<b>Folienabhebe-Verfahren</b>	Innendruck p	Herstellung	apparativer/zeitlicher Aufwand	Genauigkeit 0,3 mbar
<b>Va-Q-Check</b>	Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{Vlies}}$	Herstellung, vor Einbau	Keine Kontrolle im verbauten Zustand	Baustellen-tauglich (Einbau)
<b>Thermographie</b>	Oberflächentemperatur T	z. T. im verbauten Zustand	nur „gut/schlecht“-Prüfung	Kontrolle im verbauten Zustand
<b>RFID-Sensor</b>	Innendruck p	In jedem Zustand	Kein auslesen durch Metall	Durchgehende Funktionskontrolle

### 6.1.2 Beschreibung der RFID-Drucksensor-Technik

Für die Messung des Drucks existieren verschiedene Typen von Drucksensoren, die nach unterschiedlichen Messprinzipien arbeiten. Für die Anwendung in Dämmpaneelen wurden kapazitive Drucksensoren für die Innendruckmessung im VIP verwendet. Die Kapazitätsänderung eines Kondensators, die bei der Veränderung des Plattenabstands infolge von Druckeinwirkung entsteht, wird als Sensorsignal verwendet. Die feste Elektrode eines Plattenkondensators<sup>20</sup> kann beispielsweise eine Metallplatte sein, die bewegliche Elektrode kann als metallisierte Siliziummembran ausgeführt werden.<sup>21</sup> Der Vorteil von kapazitiven Drucksensoren ist ihr geringer Energieverbrauch und die geringe Temperaturabhängigkeit des Ausgangssignals.<sup>22</sup> In dieser Arbeit wurde ein vom Fraunhofer IMS entwickelter RFID-Drucksensor-Transponder verwendet (Bild 25).

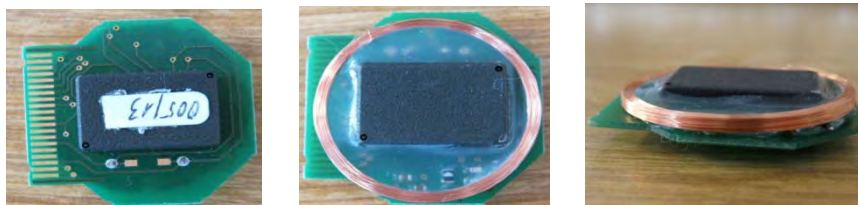


Bild 25 : RFID-Drucksensor-Transponder (von oben, von unten und eine Seitenansicht).

<sup>20</sup> Vgl. Friedmann Völklein/Thomas Zetterer: Praxiswissen Mikrosystemtechnik – Grundlagen, Technologien, Anwendungen, Vieweg-Verlag, Wiesbaden 2006<sup>2</sup>, S. 226.

<sup>21</sup> Vgl. Peter Baumann: Sensorschaltungen – Simulation mit PSPICE, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden 2010<sup>2</sup>, S. 101.

<sup>22</sup> Vgl. H.-R.Tränkler/E.Obermeier (Hrsg.): Sensortechnik – Handbuch für Praxis und Wissenschaft, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg 1998, S. 375 (künftig: Tränkler 1998).

In Bild 25 ist deutlich die Antenne des Sensors in Form einer Kupferdrahtspule zu erkennen. Der schematische Aufbau des Sensors im ASIC (Anwenderspezifischer integrierter Schaltkreis) mit CMOS-Technologie (komplementärer Metall-Oxid-Halbleiter) ist in Bild 26 dargestellt.

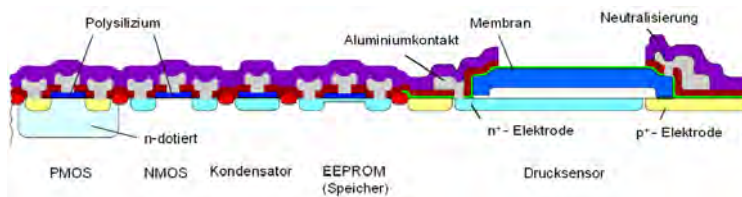


Bild 26 : Querschnitt des Transponder-ASIC mit integriertem VIP-Drucksensor. <sup>23</sup>

Bei diesem Drucksensor-Transponder handelt es sich um einen Read-only-Transponder. Dies bedeutet, dass der Transponder nach dem Programmiervorgang ausschließlich ausgelesen werden kann. Die gespeicherten Daten auf dem Transponder können durch das Lesegerät nicht verändert werden. Durch den verwendeten EEPROM-Speicher können die Daten (vor allem zur Kalibrierung) aber mit einem speziellen EEPROM-Programmierer be- und überschrieben werden. Der Sensor-Transponder ist als ASIC in CMOS-Technologie ausgeführt, die durch die Kombination aus PMOS- und NMOS-Technik einen stromsparenden integrierten Schaltkreis ermöglicht. Im Drucksensorhohlraum besteht nach der Herstellung je nach Prozessführung ein Vakuum oder ein definierter Gasdruck. Bei der Deformation der Polysiliziumschicht wird die dabei entstehende Kapazitätsänderung des Kondensators als Sensoreffekt ausgenutzt. Die Kapazität des Drucksensors ist nur vom Druck, nicht von der angelegten Spannung abhängig. <sup>24</sup>

Der zweite wichtige Bestandteil des RFID-Systems ist das Lesegerät mit der extern angeschlossenen Antenne aus einer Kupferdrahtspule im Handgriff. Bild 27 zeigt das Lesegerät mit Antenne als Prototyp.



Bild 27 : Prototyp-Lesegerät für IMS-Sensor-Transponder mit externer Antenne

<sup>23</sup> In Anlehnung an eine Grafik des IMS-Duisburg.

<sup>24</sup> Vgl. Europäische Patentschrift 0515416B1: Integrierbarer, kapazitiver Drucksensor und Verfahren zur Herstellung desselben, 1994,

<http://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?window=1&space=main&content=einsteiger&action=treffer>, letzter Zugriff: 11.06.2011.

Das in Bild 27 dargestellte Lesegerät eignet sich zum Auslesen von induktiven passiven Sensor-Transpondern. Über die Software des Lesegeräts kann der Auslesevorgang gestartet werden. Im Startmenü ist zum einen eine Informationsfunktion aufrufbar, in der Hersteller- und Systemangaben abgerufen werden können. Zum anderen gibt es eine Schnellmess-Start Funktion mit der direkt zu einer Einzelmessung gewechselt werden kann. Mit der dritten Funktion des Startmenüs wechselt man in ein Untermenü mit den Funktionen „Messen“, „Daten verwalten“<sup>25</sup> und „Einstellungen“<sup>26</sup>. Im Menüpunkt Messen kann zwischen einer Einzelpunktmessung und der Dauermessung unterschieden werden. Die Funktion „Dauermessung“ ermöglicht es viele Messungen in einem bestimmten Messintervall hintereinander automatisch durchzuführen. Die Ergebnisse der Dauermessung werden auf dem Display des Lesegeräts in Form eines Diagramms angezeigt und auf einer SD Speicherkarte gespeichert. Bei der Einzelmessung werden das Messdatum, die Uhrzeit, die ID-Nummer des ausgelesenen Sensor-Transponders sowie die Zahlenwerte der Temperatur- und Druckmessung auf dem Display angezeigt.

Die Umrechnung der Sensor-Messsignale wird von der Software des Lesegeräts durchgeführt. Die Berechnung des Temperatur- und Druckwerts erfolgt mit den folgenden Gleichungen:

$$Z_{Temp} Div = \frac{Z_{Temp}}{1000} \quad (1.1)$$

$$Temperatur \cdot [^{\circ}C] = at0 + at1 \times Z_{Temp} Div + at2 \times Z_{Temp} Div^2 \quad (1.2)$$

$$Z_{Pr ess} Div = \frac{Z_{Pr ess}}{1000} \quad (1.3)$$

$$\begin{aligned} Druck[mbar] = & ap00 + ap10 \times Z_{Pr ess} Div + ap20 \times Z_{Pr ess} Div^2 + ap30 \times Z_{Pr ess} Div^3 \\ & + ap40 \times Z_{Pr ess} Div^4 + \left( ap01 + ap11 \times Z_{Pr ess} Div + ap21 \times Z_{Pr ess} Div^2 \right. \\ & \left. + ap31 \times Z_{Pr ess} Div^3 + ap41 \times Z_{Pr ess} Div^4 \right) \times Z_{Temp} Div \quad (1.4) \\ & + \left( ap02 + ap12 \times Z_{Pr ess} Div + ap22 \times Z_{Pr ess} Div^2 \right. \\ & \left. + ap32 \times Z_{Pr ess} Div^3 + ap42 \times Z_{Pr ess} Div^4 \right) \times Z_{Temp} Div^2 \end{aligned}$$

Die Variablen  $Z_{Temp}$  und  $Z_{Pr ess}$  sind die Sensorsignale des Temperatur- oder Drucksensors. Die Berechnungskoeffizienten at0 bis at2 sowie ap00 bis ap42 sind in einer Kalibrierdatei auf der SD Speicherkarte hinterlegt. Bei der Kalibrierung der Sensoren erfolgt die Anpassung der Messkurve über diese Berechnungskoeffizienten. Erst bei der Berechnung des Druckwerts wird der Einfluss der Temperatur berücksichtigt. Das Drucksensorsignal ist sonst weitestgehend unabhängig von Temperatureinflüssen, die nicht auf eine Druckerhöhung im Umgebungsmedium aufgrund von Temperaturerhöhung zurückzuführen sind.

### 6.1.3 Kalibrierung, Kalibrierprozess im Labor

Die Kalibrierung der Sensoren erfolgt nach dem in Bild 28 dargestellten Ablauf. Derzeit werden bis zu 18 Sensortransponder gleichzeitig kalibriert, die Sensoren befinden sich dabei aufgebaut auf Platinen. Für eine spätere Kalibrierung mit hohen Stückzahlen ist eine Kapselung und Vereinzeln vor dem Kalibrieren geplant.

<sup>25</sup> In diesem Menüpunkt werden die bereits durchgeführten und gespeicherten Messungen aufgelistet.

<sup>26</sup> In diesem Menüpunkt können Datum und Uhrzeit, Messintervall, Lautstärke und Helligkeit eingestellt werden.



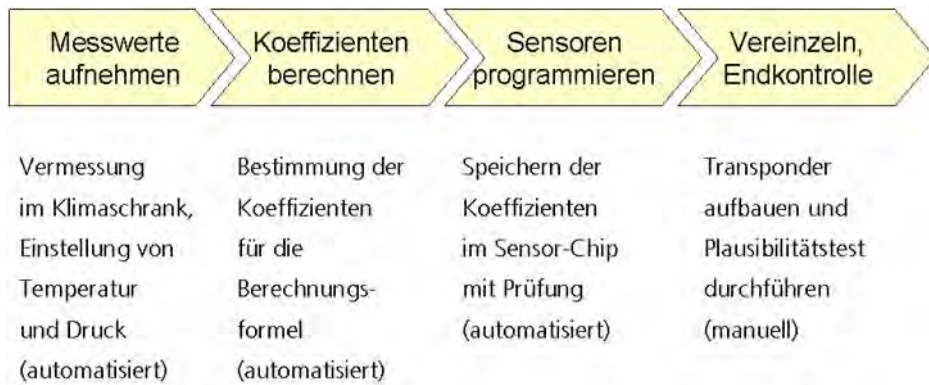


Bild 28: Ablauf der Kalibrierung von Drucksensor-Transpondern.

Die möglichen Umweltbelastungen auf die Sensortransponderen konnten im IMS-Klimaschrank untersucht werden. Dazu wurden Messgeräte aufgebaut und damit mehrere Sensoren auf Trägerplatinen quasi zeitgleich erfasst (Bild 29). Die Geräte leiten die Messdaten der Sensoren über eine serielle Schnittstelle an einen angeschlossenen PC weiter, in dem die Daten zunächst gespeichert und später z.B. mit einem Labview-Programm ausgewertet werden. Im IMS-Klimaschrank (Bild 30) lassen sich Drücke zwischen 1 mbar und 1 bar sowie Temperaturen zwischen + 10 °C und + 45 °C einstellen. Aus den gemessenen Sensor-Rohwerten werden die Kalibrierkoeffizienten  $a_{xy}$  nach einem „Best-Fit“ Algorithmus mit Hilfe des Programmes „Labview“ berechnet. Diese sensorspezifischen Kalibrierkoeffizienten  $a_{xy}$  sind die in den oben angegebenen Formeln erforderlichen Koeffizienten und werden in den Speicher des Sensor-Chips programmiert. Über die o.g. Formeln und die Kalibrierdaten, errechnet im späteren Betrieb das Lesegerät aus den erfassten Sensordaten die aktuellen Druck- und Temperaturwerte.



Bild 29: Stationäres Gerät für Tests im Klimaschrank.

Mit Hilfe des stationären Lesegerätes und der Druckkammer (Bild 30) lassen sich die typischen Druckkurven der VIP-Transponder in unterschiedlichen Temperaturstufen z.B. 0 °C, 25 °C und 50 °C ermitteln (Bild 31). Die Temperaturabhängigkeit ist bei der aktuellen Sensortypserie relativ gering: 10 Zählwerte pro Millibar und 10 Zählwerte pro Kelvin.



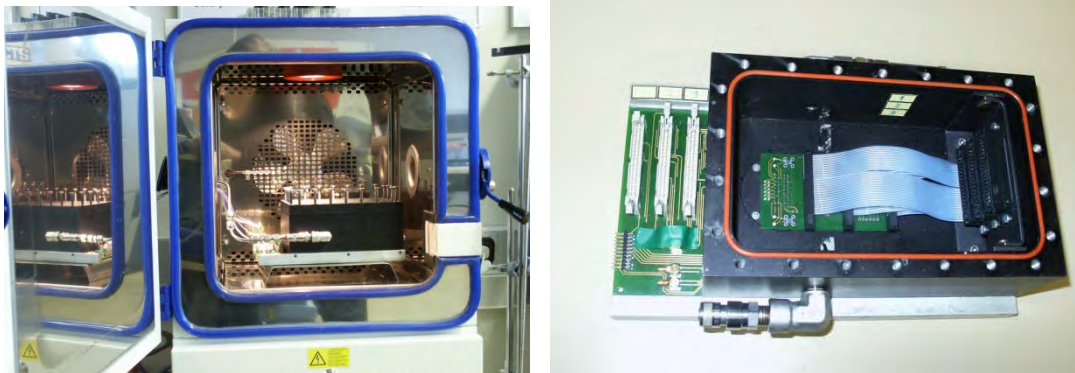


Bild 30: Kalibrierungsaufbau aus Klimaschrank mit Druckkammer (links), geöffnete Druckkammer (rechts).



Bild 31: Druckkurven der aktuellen Druck-Sensoren bei drei Temperaturstufen.

Nach erfolgter Kalibrierung wurden die Sensoren vereinzelt und mit Antennenspulen versehen sowie mit dem fertigen Transpondern ein Funktionstest durchgeführt. Im Anschluss daran erfolgte die Einbettung der Sensoren in die Vakuumisolierpaneele (Bild 32, links und Mitte, noch im Experimentierstadium) und ein Langzeittest über 664 Stunden (etwa 28 Tage, Bild 33).

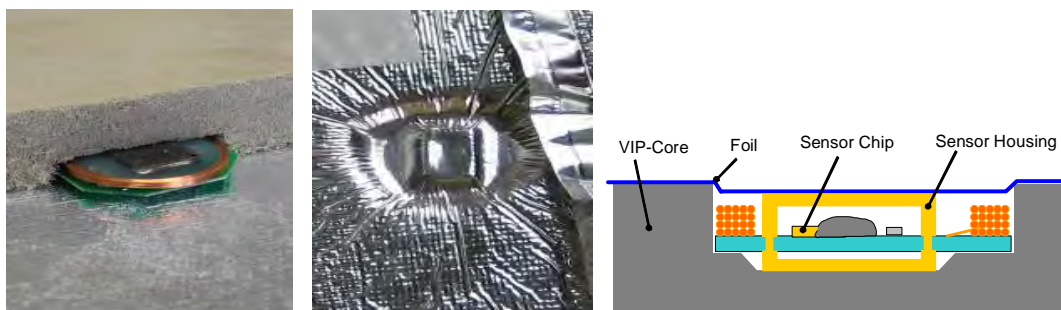


Bild 32: Transponder im VIP eingebaut (links, Mitte) und Drucksensor im Querschnitt (rechts).

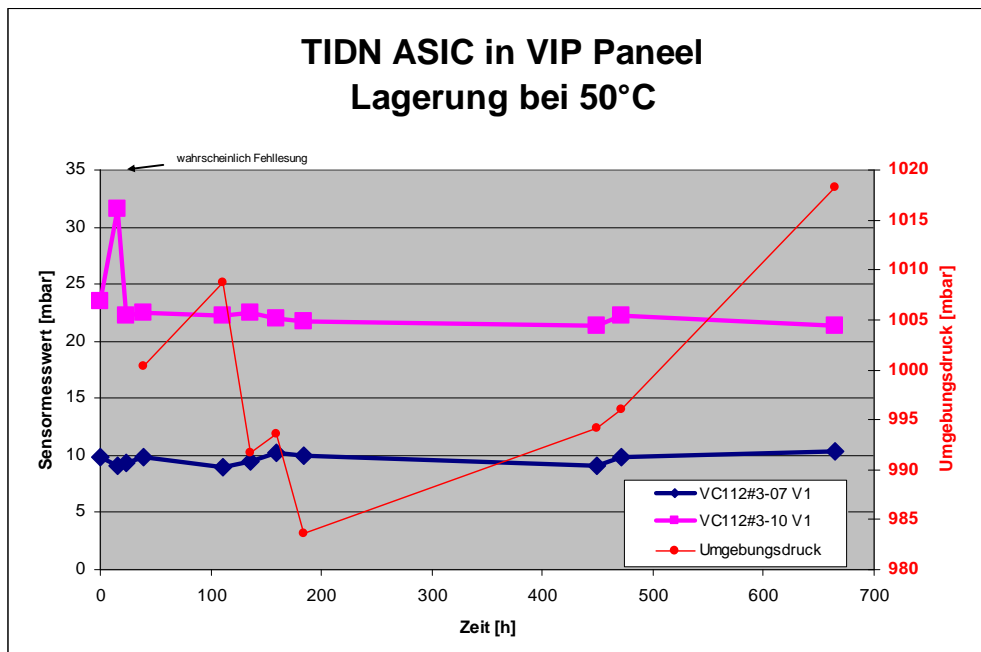


Bild 33: Langzeitmessung in unterschiedlich hergestellten Paneelen

Eine weitere Langzeitmessung erfolgt derzeit in den Wänden und dem Dach des Demonstrationsgebäudes „inHaus1“ in Duisburg; Zwischenergebnisse sind in Kap. 7.1 dargestellt.

#### 6.1.4 Vorteile der RFID-Sensor-Technik bei VIP

In Kapitel 6.1.1 wurde aufgezeigt, dass zwar bereits Möglichkeiten zur Qualitätskontrolle von Vakuumisulationspaneelen bestehen, diese Verfahren aber einige entscheidende Nachteile haben. Die Gründe hierfür sind der hohe apparative und zeitliche Aufwand, die unzureichende Ergebnissenauigkeit oder die fehlende Baustellentauglichkeit. Von der Herstellung bis zur Nutzung der VIP im eingebauten Zustand durchlaufen die VIP verschiedene Prozessstufen: Produktion, Einbau und Abnahme sowie die jahrzehntelange Nutzungsphase. Nachfolgend werden für diese verschiedenen Zustände die Vorteile der Anwendung von RFID-Sensor-Transpondern bei Vakuumisulationspaneelen erläutert.

##### 6.1.4.1 Vorteile in Produktion und Herstellung

Ein großer Vorteil des im VIP integrierten RFID-Transponders ist die Möglichkeit eine Identifikationsnummer auf dem internen Speicher zu hinterlegen und diesen als Teil eines Auto-ID-Systems zu verwenden. Die Identifikationsnummer kann somit zur eindeutigen Identifikation des Dämm-Paneels benutzt werden. Auto-ID-Systeme wie das Barcode-System, können dadurch leicht ersetzt werden. Der Vorteil des RFID-Systems gegenüber dem Barcode-System ist, dass für eine Datenübermittlung keine Sichtverbindung bestehen muss. Somit sind Verschmutzungen, beschädigte Etiketten oder Schutzverpackungen kein Problem mehr. Ein bei der Herstellung mit in das VIP eingeschweißter RFID-Transponder mit Drucksensor hat den Vorteil einer stetigen Kontrollmöglichkeit des Innendrucks des VIP sowohl direkt nach der Produktion als auch vor der Auslieferung. Somit kann der VIP-Hersteller sicherstellen, dass sein Vakuumisulationspaneel den Vorgaben der baurechtlichen Zulassung (z.B. Minimalwert Wärmeleitfähigkeit) entspricht. Momentan müssen bei der Planung einer Wärmedämmung mit VIP hohe Zuschläge des Wärmedurchgangskoeffi-

zienten bei der Auslegung eines Bauteils berücksichtigt werden. Diese sind nur teilweise auf den Randeffect der Wärmebrücken, aber auch auf Sicherheitsbedenken bezüglich der Wärmedämmleistung des VIP über einen längeren Zeitraum zurückzuführen. Durch eine zuverlässige technische Nachweismöglichkeit eines funktionierenden VIP könnten diese Zuschlagswerte herabgesetzt werden, was zu einem besseren Kosten-Nutzen-Verhältnis und größerer Nachfrage von Vakuumdämmpaneelen beiträgt.

#### **6.1.4.2 Vorteile bei Einbau und Abnahme**

In der Phase des Einbaus der VIP hat das verarbeitende Unternehmen den Vorteil, dass die VIP direkt nach der Anlieferung auf ihre Funktionsweise kontrolliert werden können. Defekte Paneele lassen sich so schnell erkennen, reklamieren und ersetzen. Vor allem wenn individuell formatierte Paneele auszutauschen sind, können die Daten und Maße des Paneels einfach und über das Internet nachbestellt werden, wenn über den Liefer- und Verlegeplan jedes VIP durch die Ident-Nummer zugeordnet ist. Nach dem Einbau kann der Innendruck erneut durch das ausführende Unternehmen kontrolliert und so dem Auftraggeber ein funktionstüchtiges Paneel garantiert werden. Bei der späteren Abnahme eines Gebäudes kann die RFID-Technik ebenfalls von Vorteil sein, da für den Bauherrn eine funktionstüchtige Fassade dokumentierbar ist. Für spätere Beschädigungen, die beispielsweise durch Folgegewerke wie Elektroinstallationen entstehen, könnte eine Nachverfolgung durch die Verpflichtung der Nachmessung des VIP-Zustands im Umfeld dieser Arbeiten zu sorgfältigem Arbeiten „erziehen“. Darüber hinaus dient der demonstrierbare Nachweis einer funktionierenden Fassade mit VIP-Dämmung als Verkaufsargument beim Weiterverkauf der Immobilie oder bei der Vermietung der Immobilie.

#### **6.1.4.3 Vorteile in der Nutzungsphase**

Durch die RFID-Sensortechnik ist auch während der Nutzungsphase eine Überwachung des Innendrucks und damit der Qualität der VIP-Dämmung möglich. Auf diese Weise können Druckerhöhungen durch Alterung, anliegende Feuchte oder durch Beschädigung der Paneele vom Hausmeister oder Facility-Manager festgestellt werden. Der Zeitpunkt eines Austausches der Paneele kann so sehr konkret festgelegt werden. Einem übermäßigen Wärmeverlust durch defekte Paneele kann damit vorgebeugt werden. Dem Nutzer des Gebäudes könnte durch eine regelmäßige Überwachung der VIP auf diese Weise ein bestimmter Qualitätsstandard der Fassade zugewiesen werden. Auf dieser Grundlage lässt sich zu jedem Zeitpunkt ein aktueller Energieausweis für das Gebäude erstellen, der die physikalisch stattfindende Alterung durch die Verringerung des Vakuums über die Lebensdauer der Vakuumdämmung zeitlich real berücksichtigt. Damit kann die RFID-Technik dazu beitragen, dass VIP-Bauteile nach messbaren Sanierungszyklen und nicht nach theoretisch festgelegten Lebensdauern erneuert werden.

Die Vorteile von RFID-Sensoren sind auch bei anderen VIP-Anwendungen außerhalb des Bauwesens wesentlich. Bei der Verwendung von VIP als Teil von Verpackungen für Medikamenten- oder Organtransporte ist die Überwachung des Innendrucks der Paneele sehr wichtig, um eine bestimmte Temperatur im Inneren der Verpackung zu halten. Ein beschädigtes VIP-Paneel kann durch die damit verbundenen höheren Wärmeverluste im schlimmsten Fall zu einer Beschädigung der Medikamente oder Organe führen. Mit der Kontrollmöglichkeit durch die RFID-Drucksensoren vor dem jeweiligen Gebrauch der Transportverpackung kann diese Gefahr untersucht und ggf. die Verpackung repariert werden. Somit erzeugt ein Qualitätskontrollsystem mit RFID-Drucksensor-System in VIPs Vorteile für die VIP-Hersteller durch eine transparente Nachweismöglichkeit, für den Investor durch eine bessere Kosteneffizienz und für den Gebäudebetreiber durch eine gute Kontroll- und Beschaffungsmöglichkeit.

### 6.1.5 Messunsicherheit und Abnahmeprozess bei RFID-Sensortranspondern

Zur Vorbereitung einer Serienproduktion ist als weiterer Schritt im Abnahmeprozess eine Zuverlässigkeitsprüfung notwendig. Gemäß dem Qualitätsmanagement im Fraunhofer-IMS nach ISO 9001-2008 sind im Prüfplan diese Schritte festgelegt:

- Lagerung bei hohen Temperaturen zur Abschätzung des Ladungserhalts bei Speicherzellen (EEPROM),
- Temperaturwechselzyklen zur Lebensdauerabschätzung des Aufbaus und der Verbindungstechnik (Löt- und Schweißstellen),
- Belastungstest unter Spannung zum Test auf Alterungserscheinungen (z.B. durch Elektromigration). Diese Messungen erfolgen auf ähnliche Weise wie die Kalibrierung (vgl. Kap. 6.1.3), allerdings über deutlich längere Zeiträume,
- Medientest zur Beeinflussung durch Fremdstoffe (Säurebildung).

Die Auswahl und Parametrisierung der Tests erfolgt unter Berücksichtigung der Umgebungsparameter wie Betriebs- und Lagertemperaturen sowie der Medieneinflüsse. Als Lagertemperaturen wird ein größerer Bereich von - 20 °C bis + 80 °C gewählt, während für den Betrieb, also die eigentliche Messung, ein Bereich von 0 °C bis 40 °C angenommen wird. Als Prüfumfang wird für jede Prüfung eine Anzahl Prüflinge gemäß Norm herangezogen, typische Losgrößen liegen bei 200 Mustern in der Erstprüfung. Wiederholungsprüfungen, die in der Regel jährlich stattfinden, haben einen reduzierten Probenumfang. Neben der Zuverlässigkeitsprüfung findet die elektrische Endprüfung und Kalibrierung statt. Diese umfasst 100 % der Prüfmuster bei denen die Funktion z.B. bei Raumtemperatur getestet wird.

Das Gesamtsystem bestehend aus Sensoren und Lesegerät muss weiterhin die CE-Richtlinien erfüllen, die aus den folgenden Prüfungen besteht:

- Funkparameter: Sendeleistung und Bandbreite werden auf Normeinhaltung getestet,
- Störabstrahlung: Komponenten werden auf die Aussendung von unbeabsichtigten Feldern (drahtlos und drahtgebunden) getestet,
- Störfestigkeit: Komponenten werden auf Geräteausfall durch von außen eingestrahelte Felder (drahtlos und drahtgebunden) getestet,
- Elektrostatische Entladung (ESD): Hochspannungspulse werden auf die Geräte abgegeben, um einen Geräteausfall durch statische Entladungen zu testen.

### 6.1.6 Prüfung der RFID-Drucksensor-Technik an Fassaden mit VIPs

In Kapitel 6.1.4 wurde erläutert welche Vorteile die Verwendung von RFID-Drucksensoren für VIP hat. Bisher existiert allerdings kein kommerziell eingesetztes Vakuumdämmpaneel bei dem ein RFID-Drucksensor zur Qualitätskontrolle verwendet wird. Dies hängt unter anderem mit der Schwierigkeit der Energieversorgung des Sensors zusammen. Durch die lange Nutzungsdauer der VIP im Bauwesen kommen bei der Integration von RFID-Sensortechnik nur passive RFID-Systeme in Frage<sup>27</sup>. Die Energieversorgung der Sensoren erfolgt

<sup>27</sup> Aktive oder semiaktive Systeme verfügen bisher über Nutzungsdauern von ca. 2 bis 5 Jahren. Im Vergleich kalkuliert man für die Nutzung der VIP über 20 Jahre. Ein Austausch der Batterien der aktiven oder semiaktiven Sensoren ist im Falle der eingeschweißten Sensoren nicht möglich.

damit nur über das elektromagnetische Feld der Antenne am Lesegerät. Ein wichtiges Kriterium für die Auswahl der Sensoren ist deshalb ein geringer Energiebedarf der Sensoren. Prototypen der modifizierten Druck-Sensor-Transponder wurden in VIP-Musterpaneelen der Firma va-Q-tec eingeschweißt, siehe Kapitel 6.1.6.1. Um die Praxistauglichkeit für Gebäudefassaden nachzuweisen, wurden neben den Leserversuchen in der Klimakammer auch welche an einer Testfassade in Pfosten-Riegel-Konstruktion durchgeführt (siehe Kapitel 6.1.6.2 und 6.1.6.3). Bei dieser Konstruktionsart werden aus architektonischer und ästhetischer Sicht häufig schlanke Fassadenbauteile gewünscht, weshalb sich der Einsatz von hochwertigen VIP-Bauprodukten im Bauteilinnern besonders anbietet. Bei solcher modularer Bauweise<sup>28</sup>, kann ein defektes Paneel ähnlich wie eine Fensterscheibe leicht ausgetauscht werden. Der untere Teil der Fassade wird dabei in der Regel als opakes Brüstungselement, der obere als Fenster oder Festverglasung ausgeführt. Die im Folgenden untersuchten Pfosten-Riegel-Fassaden befinden sich im Gips-Schüle-Gebäude des Fraunhofer IBP in Stuttgart. Die zwei Außenwände sind aus jeweils fünf Fassadenelementen aufgebaut und nach Süden oder Westen orientiert (vgl. Bild 34).

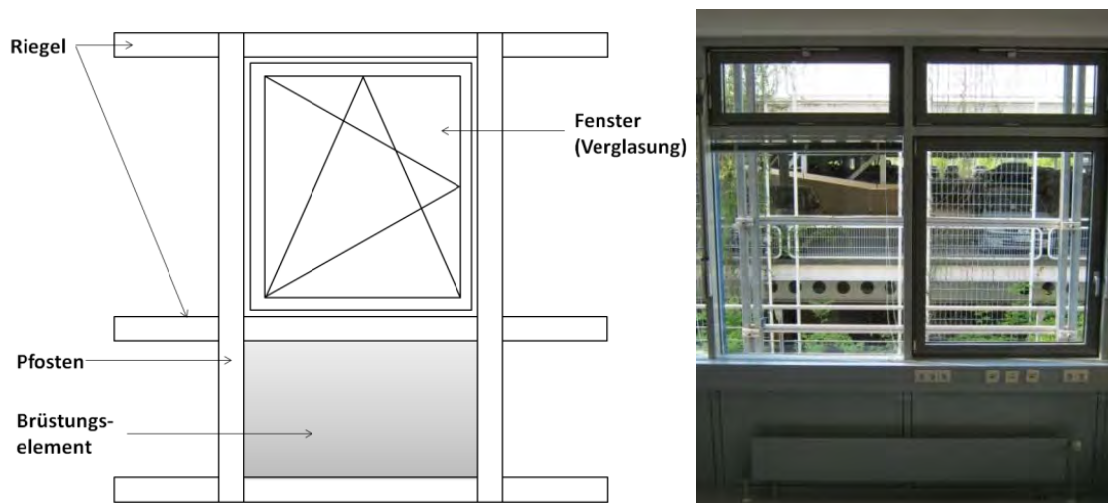


Bild 34: Schema eines Elements einer Pfosten-Riegel-Fassade (links) und Foto Testfassade (rechts).

### 6.1.6.1 Testkörper

Fünf Vakuumdämmpaneele der Firma va-Q-tec standen als Testobjekte A bis E zur Verfügung. Die Paneele bestehen aus einem porösen, ca. 20 mm dicken Kernmaterial, das mit zwei verschweißten Aluminiumverbundfolien umhüllt ist. Bei diesen Prototypen sind die Ränder des VIP mit einer ca. 15 mm überstehenden Schweißnaht umgeben, der RFID-Drucksensor-Transponder liegt mittig in einer Vertiefung des Kernmaterials direkt unter der Hüllfolie (Bild 35).

<sup>28</sup> In einzelnen Bauanwendungen werden bereits VIP als Brüstungselemente in Pfosten-Riegel-Fassaden verbaut. Ein Beispiel ist auf der vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten Internetseite [www.vip-bau.de](http://www.vip-bau.de) unter [http://www.vip-bau.de/d\\_pages/anwendungen/pfosten\\_riegel/kh\\_erenbach.htm](http://www.vip-bau.de/d_pages/anwendungen/pfosten_riegel/kh_erenbach.htm) zu finden, letzter Zugriff: 25.04.2011.





Bild 35: VIP mit RFID-Drucksensor-Transponder in der Paneelmitte (links) und Randdetail (rechts).

### 6.1.6.2 Versuche in der Klimakammer

In der IBP-Klimakammer wurde überprüft, inwieweit der Drucksensor im VIP einen Druckanstieg aufgrund von Temperaturwechseln wie genau detektieren kann (Bild 36). Dazu lagerten die VIP unterschiedlich lang bei + 70 °C, bei Raumtemperatur und bei - 30 °C. Dazwischen wurden die Druckwerte aus den Sensoren regelmäßig mit dem mobilen LF-IMS-Reader mit Handantenne (siehe Bild 27) ausgelesen.



Bild 36: Klimakammer (links) zum Test des Vakuumdämmpaneels in einer Rahmenkonstruktion zum Schutz gegen Beschädigung (rechts).

Die Lesungen bestanden aus mehreren Dauermessungen bei den unterschiedlichen Temperaturen; jede Dauermessung setzte sich aus 15 bis 20 Einzelmessungen mit einem Zwischenintervall von je 4 Sekunden zusammen. So konnten mehrere Messserien bei annähernd derselben Temperaturstufe zur Abschätzung von Messunsicherheiten gewonnen werden.

### 6.1.6.3 Langzeit-Messungen an der Testfassade

Für die Praxistests der VIP in der Pfosten-Riegel-Fassade wurden der besseren Anschaulichkeit halber die VIP nicht in das Brüstungselement aus Metall eingesetzt, sondern in den Fensterrahmen. Mit Thermoelemente auf der Innen- und Außenseite der Glasscheiben und auf der Innen- und Außenseite der VIPs konnte der Temperaturverlauf im Bauteil über mehr als 2 Jahre untersucht werden. Die Abmessungen des VIP-Elements als Prototyp ent-

sprachen nicht den Abmessungen der Glasscheiben, weshalb zuvor eine Umrandung für das VIP aus alukaschierten Polystyrolplatten erstellt wurde, die eine Beschädigung der Hüllfolien-Schweißnähte durch ein Umknicken verhinderte. Das ca. 28 mm dicke VIP-Fassadenelement mit integriertem RFID-Drucksensor zeigt Bild 37. Es wurden drei VIP-Fassadenelemente A, B, E in die Testfassaden eingebaut, eines auf der Südseite und die anderen beiden auf der Westseite des Messraums (Bild 38). Mit dem Messdatenerfassungssystem Agilent HP34970A wurde der Temperaturverlauf im Bauteil durch die integrierten Thermoelemente alle 5 Minuten wie auch die Druckwerte in den Sensortranspondern gemessen. Die Stromversorgung der RFID-Lesegeräte erfolgte über Netzteile für die Dauermessung und teilweise zum Test auch über die Geräteakkus.

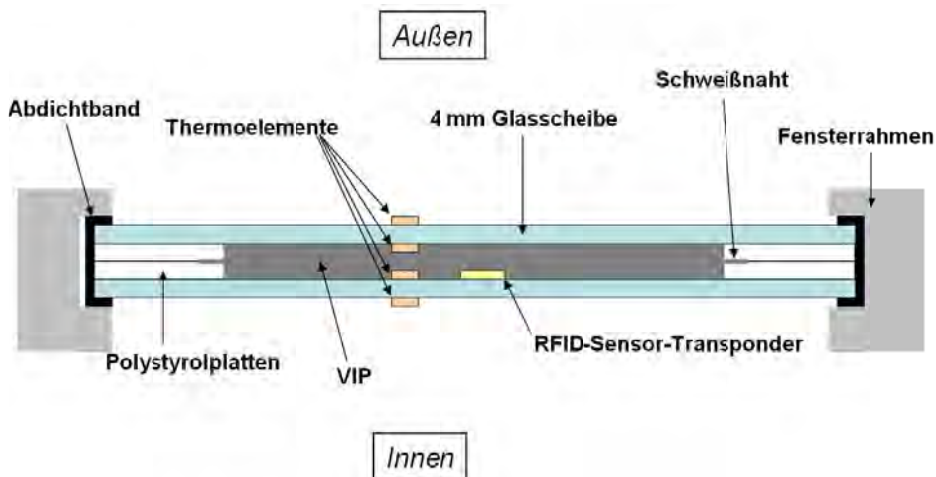


Bild 37: Skizze des Messaufbaus mit RFID-Drucksensor-Transponder im VIP.

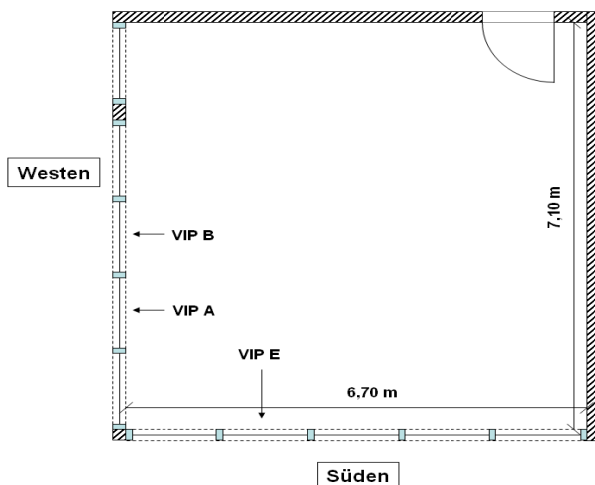


Bild 38: Grundrissplan des Messraums mit den Einbauorten der VIP-Fassadenteile (links) und Foto des Datenerfassungssystems (Agilent HP34970A, rechts).

Zwei Lesegeräte wurden jeweils auf einem Stativ befestigt und so vor den VIP platziert, dass die Antennenspule sich direkt vor dem Sensor in einem Abstand von ca. 30 mm von der raumseitigen Abdeckung befand (vgl. Bild 39). Auf dieser Weise konnten in einer Langzeitmessung parallel zwei VIP-Sensoren untersucht werden. Das dritte Element wurde zum Vergleich nur temporär gemessen. Da der Polystyrol-Rahmen um das VIP einen geringeren Wärmewiderstand aufweist als das VIP selbst, kommt es im EPS-Rand zu einem un-

gleichförmigen Temperaturverlauf. Somit wurden die Bezugstemperaturen für den RFID-Sensor-Tag nur in der Mitte des Vakuumisolationspaneels ausgewertet. Die Messergebnisse werden in den folgenden Abschnitten für unterschiedliche Einflussgrößen analysiert.



Bild 39: Testfassade mit VIP-Paneel B (links) und Lesegerät auf Stativ vor dem VIP-Paneel E (rechts).

#### 6.1.6.4 Tests zum Temperatureinfluss

Diese Untersuchungen sollten das Temperaturverhalten der RFID-Drucksensoren im Vergleich zum temperaturabhängigen Vakuum im VIP aufzeigen. Es wurden alle fünf VIP-Prototypen untersucht (A bis E). Die Klimakammer ermöglichte Temperaturen in dieser Versuchsreihe zwischen  $-23\text{ °C}$  und  $+47\text{ °C}$ . Unterschiede zwischen der Ist-Temperatur in der Klimakammer und der mit dem Drucksensor gemessenen Temperatur im VIP entstehen systematisch durch die z.T. zeitlich begrenzte Lagerzeit des VIP in der Klimakammer von ca. 1 h bis zur nächsten Lesung. Durch äußere Einflüsse in der Laborhalle variieren die gemessenen Temperaturen zwischen den verschiedenen Messserien um einige Kelvin. Das typische Verhalten der im VIP gemessenen Drücke in Abhängigkeit der Temperatur lässt sich am Beispiel des VIP-Elements B, Bild 40, diskutieren. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Innendruckwerte relativ stark streuen, d.h. bei einer ähnlichen Temperatur schwanken die Messwerte des Innendrucks in einem Bereich von teilweise über 2 mbar. Jeder Punkt im Diagramm entspricht dabei einer separaten RFID-Einzelmessung.

Um diesen Bereich genauer zu spezifizieren, wurden die Standardabweichungen der Innendrucke in verschiedenen Temperaturbereichen bestimmt. Dabei wurde darauf geachtet, dass der zusammengefasste Temperaturbereich nicht größer als 1 Kelvin war und mindestens 9 Messwerte enthielt. Bild 41 zeigt die Mittelwerte des Innendrucks und die dazugehörigen Standardabweichungen. Im Mittel beträgt diese beim Sensor in VIP B 0,57 mbar. Der Grund für diese Streuung ist auf das normale Messrauschen zurückzuführen, wobei es sich um eine zufällige, stochastische Störung handelt, die in jeglichen realen Sen-



sorwerten vorhanden ist<sup>29</sup>. Auf die Messunsicherheit der Sensoren selbst wird in Kapitel 6.1.7 weiter eingegangen. Der Verlauf der Messwerte kann durch eine Regressionsgerade dargestellt werden, so dass ein annähernd linearer Temperatur-Druckverlauf entsteht. Die Steigung der Regressionsgeraden beträgt 0,16 mbar/K. Das prinzipielle Temperaturverhalten in VIP B entsprach den Erwartungen hinsichtlich eines Druckanstiegs bei Zunahme der Temperatur. Allerdings wird im Bereich unter 10 °C deutlich, dass die gemessenen Werte nicht den tatsächlichen Werten entsprechen können, da der gemessene Innendruck in diesem Bereich negative Werte annimmt (siehe Bild 40).

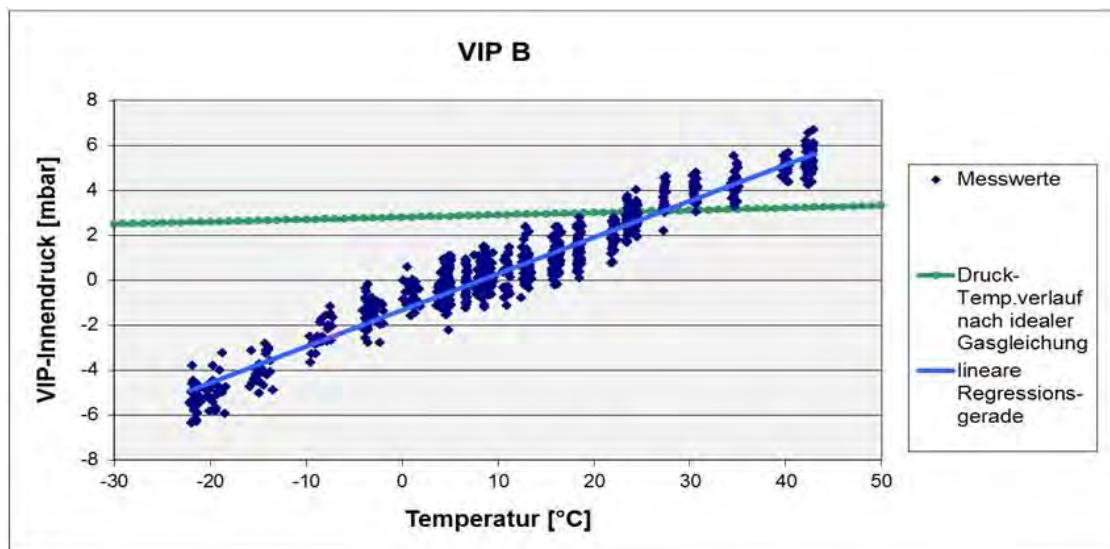


Bild 40: Abhängigkeit des Innendruck im VIP B von der Sensor-Temperatur in der Klimakammer und Vergleich mit dem mittels der idealen Gasgleichung prognostizierten Innendruck.

Der Vergleich des durch die Ideale Gasgleichung prognostizierten Innendruck mit dem gemessenen Innendruck zeigt, dass die Regressionsgerade aus den Messwerten einen deutlich steileren Verlauf als die prognostizierte Gerade aufweist. Der Grund hierfür hängt mit der in Kapitel 6.1.2 beschriebenen Kalibrierung und der Kalibrierdatei zusammen, die später bei den Drucksensoren der 2. Generation anzupassen war. Das Temperaturverhalten der Sensoren in den untersuchten VIP-Elementen A, B, E zeigt sich ähnlich, siehe Bild 41. Die Steigung der beiden Regressionsgeraden ist nahezu gleich. Die Regressionsgerade von VIP A liegt allerdings um ca. 3 mbar unter der Regressionsgerade von VIP B. Die Regressionsgerade des VIP E hat im Vergleich zu VIP A und B eine größere Steigung von ca. 2 mbar/K. Aus den Ergebnissen der Temperaturverläufe von VIP-Element C und D konnte man erkennen, dass die im Sensorchip hinterlegten Kalibrierfaktoren fehlerhaft waren, so dass diese Elemente in den weiteren Untersuchungen nicht mehr berücksichtigt wurden. Mit relativ wenig Aufwand lassen sich die Messergebnisse zum Innendruck im VIP für die eingebauten Sensoren nach oben oder unten verschieben, da es dazu nur die Veränderung einer Konstanten in der Berechnungsformel (vgl. Formel (1.4) aus 6.1.2) des Drucks bedarf. Für die drei in die Testfassade eingebauten Paneele wurde eine solche Verände-

<sup>29</sup> Vgl. Volodymyr Vasyutynsky: Send-on-Delta-Abtastung in PID-Regelungen, Dissertation, Technische Universität Dresden, Jörg Vogt Verlag, Dresden 2009, S. 57.

ung so durchgeführt, dass die Regressionsgerade bei 20°C einen Innendruck von ca. 3 mbar anzeigt.

Die Messungen an der Testfassade stellen einen sehr praxisnahen Messaufbau dar, der einen Einsatz der VIP in einer Pfosten-Riegel-Fassade demonstriert. Ein Unterschied zur Anwendung in der Baupraxis ist die häufigere nicht-transparente Abdeckung des VIP mit Blechen, Holzverkleidung oder unter Putz. Der Einfluss der Abdeckung aus unterschiedlich abschirmendem Material wird in Kapitel 6.1.6.8 näher untersucht.

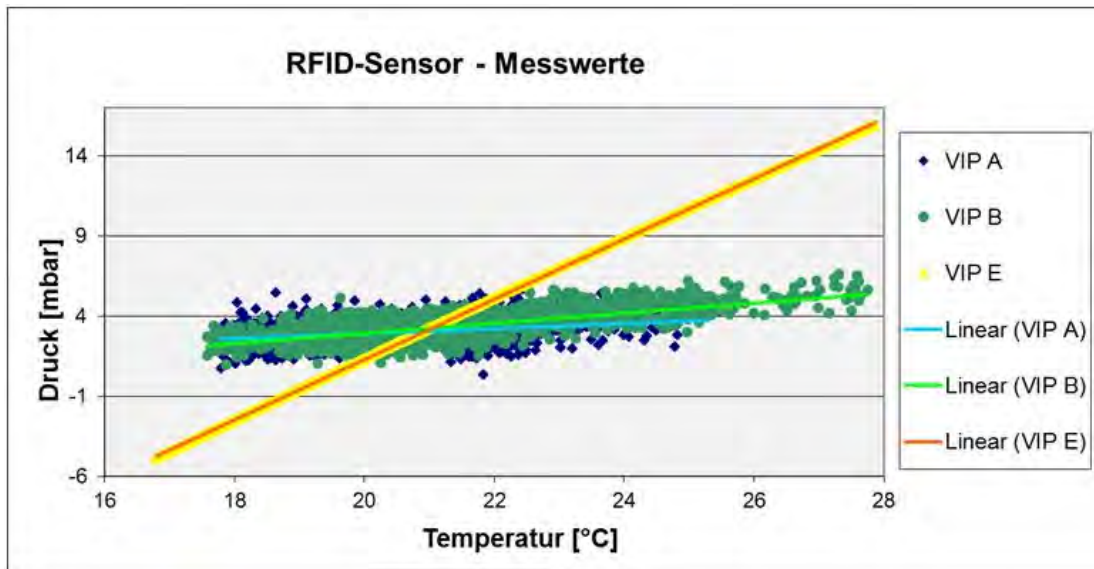


Bild 41: Einfluss der VIP-Temperatur auf die gemessenen Innendrücke der drei VIP-Elemente A, B, E in der Testfassade in Abhängigkeit von der realen Umgebungstemperatur im Zeitraum 2011.

Das in der Klimakammer gemessene Temperaturverhalten der RFID-Drucksensoren konnte auch aus den Messungen an der Testfassade bestätigt werden. Die Abhängigkeit der Vakuum-Druckwerte von der Sensortemperatur (Tagesmittelwerte) aller drei VIPs zeigt Bild 41. Das dynamische Verhalten durch den Einfluss von typischen Tagesverläufen der Außen- und Raumlufttemperatur an einem Frühjhrstag auf das Messergebnis des RFID-Drucksensors im VIP ist in Bild 42 dargestellt. Die Temperaturänderungen der Außenluft erzeugen auf der Außenseite der Glasscheibe Temperaturen zwischen 4,5 °C in der Nacht und 51,5 °C bei der stärksten Sonneneinstrahlung am Nachmittag (Westseite), die wiederum Temperaturschwankungen auf der Innenseite des VIP zwischen + 18 °C und + 25 °C verursachen. Der Einfluss der Außentemperaturänderung auf die Sensortemperatur im Innern des VIP ist durch die geringe Wärmeleitfähigkeit des VIP relativ gering. Dabei spielen Strahlungsgewinne, die durch die umliegenden Fenster den Raum zusätzlich erwärmen, eine zusätzliche Rolle und erklären Unterschiede in den Temperaturspitzen.

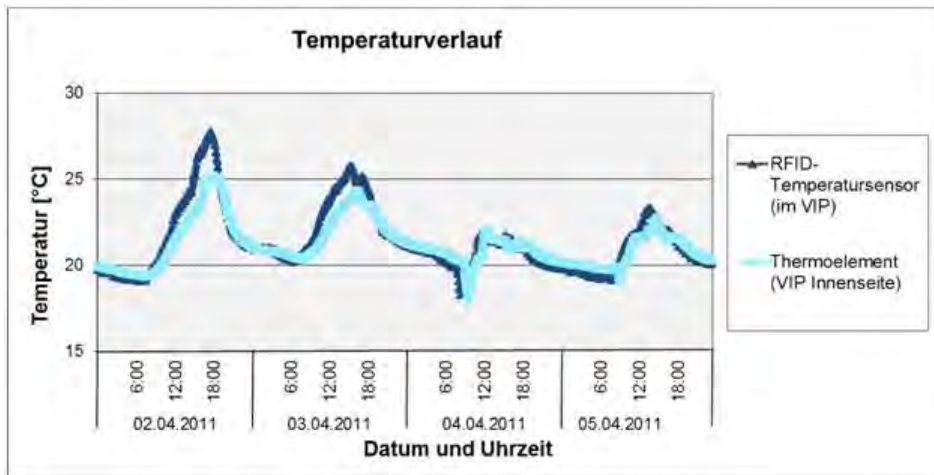


Bild 42: Temperaturen auf der Innenseite des VIP und mit dem RFID-Sensortransponder im VIP gemessen im Tagesverlauf an der Testfassade 2011.

Die in Bild 42 gezeigte Veränderung der Temperatur im VIP-Inneren ist auch im Druckverlauf der VIPs B und E deutlich, jedoch unterschiedlich zu sehen, Bild 43. Die Sensivität der RFID-Drucksensoren ist beim VIP E sehr stark, verursacht durch (noch) nicht angepasste Kalibrierfaktoren. Der im VIP-Transponder integrierte Temperatursensor ist jedoch von der Auflösung und Dynamik befriedigend dimensioniert.

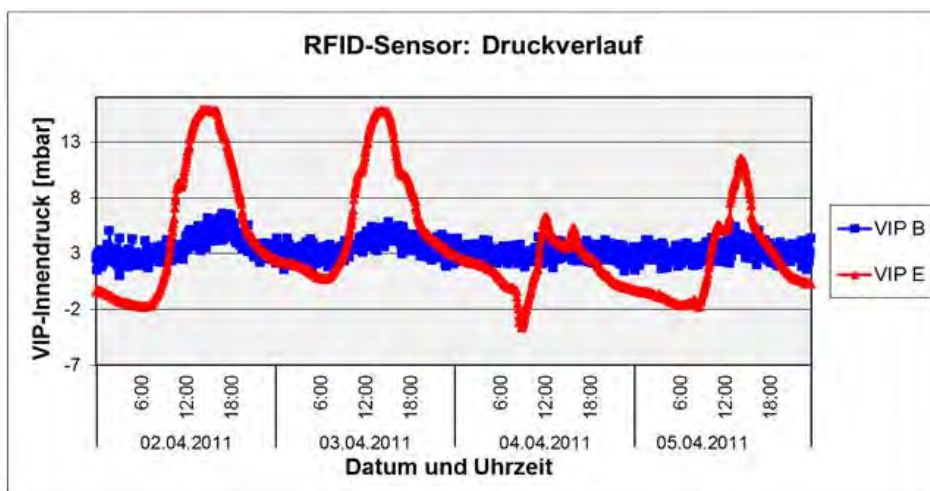


Bild 43: Druckverlauf in VIP B und VIP E im Tagesverlauf an der Testfassade 2011.

#### 6.1.6.5 Tests zur Auslesbarkeit

Die Versuche zur Auslesbarkeit der Sensoren sollten zeigen, welche Randbedingungen bei einer Messung des VIP-Innendrucks einen Einfluss auf einen erfolgreichen Ausleseversuch haben. Dazu wurde der Einfluss des Lesegeräts und der verwendeten Antenne, der Einfluss des Befestigungszustandes der Antenne, der Einfluss von verschiedenen Zwischenschichten zwischen Sensor und Lesegerät und der Einfluss des Winkels zwischen Antenne des Lesegeräts und Sensor untersucht. Die Ergebnisse aus den Messungen zur prinzipiellen Auslesbarkeit sowie dem minimalen und maximalen Leseabstand sind im Folgenden dargestellt.

### 6.1.6.6 Einfluss von Lesegerät und Antenne

Für die Messungen an der Testfassade standen unterschiedliche Lesegeräte mit jeweils anderen Antennen aus dem Fraunhofer IMS zur Verfügung. Die Kennzahlen (in fett) werden in den nachstehenden Tabellen verwendet.

Lesegerät **1**: VIP-Lg Hw. 4.1-2

Lesegerät **2**: VIP-Lg Hw. 4.1-3

Antenne **A**: V3.2-6

Antenne **B**: V3.2-12

Es werden die minimalen und maximalen Ausleseabstände verschiedener Kombinationen aus Lesegerät und Antenne, montiert auf einem Stativ, verglichen. Die Messungen wurden am VIP B an der Testfassade mit der Glasabdeckung innen durchgeführt.

Tabelle 6: Möglicher Ausleseabstand bei verschiedenen Antennen und Lesegeräte.

Leseabstände für RFID-Drucksensor-Transponder im VIP B mit Glasabdeckung		
Lesegerät - Antenne	Minimum (mm)	Maximum (mm)
1 - A	12	84
2 - A	12	85
1 - B	32	99
2 - B	30	117

Die Ergebnisse zeigen, dass das Lesegerät keinen Einfluss auf den Ausleseabstand hat. Der Austausch der Antenne bewirkt hingegen eine teilweise deutliche Veränderung des auslesbaren Abstands zwischen Sensor und Antenne. Die Ursache liegt in der anderen Wicklung des Antennendrahtes und einer verbesserten Anpassung der Auslesesoftware.

### 6.1.6.7 Einfluss der Antennenhalterung

Bei diesen Versuchen wurde der Unterschied einer handgehaltenen und einer auf einem Stativ befestigten Antenne untersucht (Bild 44). Die Ergebnisse ergaben, dass der Einfluss der Antennenhaltung für den minimalen Leseabstand relativ gering ist. Der maximale Abstand kann hingegen durch eine starre Befestigung und damit einer erschütterungsfreien Haltung der Antenne etwas vergrößert werden.



Bild 44: Testanordnung zur Bestimmung des Einflusses der Antennenhalterung

### 6.1.6.8 Einfluss von Zwischenschichten

Zur Bestimmung des Einflusses von zusätzlichen Bauteilschichten zwischen dem RFID-Sensor und der Antenne des Lesegeräts wurden diese typischen und unterschiedlich dicken Materialien getestet:

- 10 mm dicke aluminiumkaschierte expandierte Polystyrol-Platte (EPS),
- 15 mm und 21 mm dicke extrudierte Polystyrol-Hartschaumplatte (XPS),
- 20 mm dicke verleimte Pressholzplatte (Holz),
- 13 mm dicke Gipskartonplatte (GK),
- 1 mm dicke Metallplatte (Metall),
- 0,5 mm dicke Aluminiumfolie.

Als Referenzwert wurde ebenfalls eine Messung ohne Zwischenschicht durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Tabelle 13, Kap. 10.2 dargestellt. Es zeigt sich, dass die nichtmetallischen Zwischenschichten ein Auslesen erlauben. Durch die Aluminiumfolie und die Metallplatte ist ein Auslesen des Sensors nicht möglich, was für die LF-Technik zu erwarten war. In Kapitel 3.3 wurde erwähnt, dass metallische Oberflächen Funkwellen besonders gut reflektieren. Dieser Effekt führt zu einer Mehrwegeausbreitung und verhindert so die ausreichende Energieversorgung des RFID-Sensors innerhalb des VIP. Auch die aluminiumkaschierte EPS-Platte verhindert im Falle der nach vorne zur Antenne gerichteten Aluschicht ein Auslesen. Erst nach dem Drehen der Platte d.h. wenn der EPS-Schaumstoff zur Antenne zeigt, war ein Auslesen wieder möglich. Die Hüllfolie des VIP besteht aus Aluminiumverbundfolie (vgl. Kapitel 6.1), bei der die Metallschicht nur sehr dünn aufgedampft ist. Das ist der Grund, weswegen ein Auslesen des Sensors durch die Hüllfolie des VIP trotz Metall zwischen Lesegerät und Sensor möglich ist.

### 6.1.6.9 Einfluss des Haltewinkels

Unter dem Haltewinkel wird hier der Winkel  $\alpha$  verstanden, in dem die Antennenspule zur Oberfläche des VIP oder des RFID-Drucksensor gehalten wird. Bild 45 zeigt eine Skizze des untersuchten Messaufbaus.

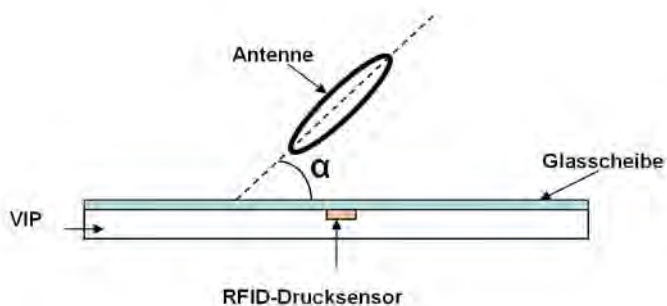


Bild 45 : Skizze des Versuchsaufbaus

Ein Foto des Messaufbaus bei einem Haltewinkel von  $45^\circ$  ist in Bild 44 dargestellt. Untersucht wurden die Winkel  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $90^\circ$ . Der Winkel  $0^\circ$  entspricht einer parallel zum Drucksensor gehaltenen Antennenspule.  $90^\circ$  entsprechen einer horizontal zur VIP-Ebene stehenden Antenne. Die Abstände der Antenne zum Sensor wurden von der nächstgelegenen Stelle der Antenne zum Sensor gemessen. Das Ziel der Untersuchung war es, herauszufinden wie empfindlich das Lesegerät auf eine Veränderung des Haltewinkels reagiert. Auf diese Weise sollen erste Aussagen darüber getroffen werden, wie praxistauglich das vorhandene RFID-Sensor-Messsystem ist.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Vergleich des minimalen und maximalen Ausleseabstands für Haltewinkel von 0°, 45° und 90° bei verschiedener Kombination aus IMS-Lesegerät, Antenne, Antennenhalterung und VIP.

Untersuchtes VIP	Winkel	0°		45°		90°	
	Variante	min	max	min	max	min	max
VIP A (verbaut)	1A; Stativ	14	103	4	57	4	14
	1A; handgehalten	14	69	4	48	4	8
	2B; Stativ	38	133	4	89	16	
	2B; handgehalten	39	129	4	64	9	
VIP B (verbaut)	1A; Stativ	19	100	4	49	4	9
	1A; handgehalten	9	76	4	44	4	14
	2B; handgehalten	29	126	4	59	4	14
VIP D (unverbaut)	2B; Stativ	35	104	2	65	0	18

Im Vergleich zur parallel zum Sensor ausgerichteten Antenne (0°) verringert sich der maximale Ausleseabstand bei einem Haltewinkel von 45° deutlich. Der minimale Abstand nimmt ebenfalls ab. Der Auslesebereich bei einer horizontal zur VIP-Ebene gehaltene Antenne nimmt im Vergleich zu einem Haltewinkel von 45° weiter ab und ist nur noch in einem sehr begrenzten Bereich möglich.

### 6.1.7 Tests zur Messunsicherheit an VIP-Drucksensor-Technik

Um eine Aussage zur Messunsicherheit der Drucksensoren nach [33] machen zu können, wurden alle gemessenen Druckmesswerte<sup>30</sup> nach der Temperatur zum Messzeitpunkt sortiert. Von jeweils zehn beieinander liegenden Messwerten (die Temperaturdifferenz bei den zehn Messwerten betrug im Mittel unter 0,1 K) wurde die Standardabweichung und daraus der Mittelwert je VIP gebildet, siehe Tabelle 8.

Tabelle 8: Mittlere Standardabweichung der RFID-Drucksensoren in VIP A, VIP B und VIP E.

Sensor-Tag	Standardabweichung
-	mbar
VIP A	0,81
VIP B	0,59
VIP E	0,01

Es wird deutlich, dass die Messunsicherheit der Drucksensoren aus dieser Charge zum Teil stark differiert. Die Standardabweichung der Sensoren in VIP A und B liegen in einer Größenordnung, die dem vorläufigen Datenblatt entspricht (+/- 1 mbar). Der Sensor in VIP E zeigt eine sehr geringe Standardabweichung und misst mit einer höheren Genauigkeit. Im Verlauf des Projekts stellte Fraunhofer IMS weitere Drucksensoren S1 bis S3 aus einer neu-

<sup>30</sup> Für VIP A lagen 11322 Messwerte, für VIP B 8207 Messwerte und für VIP E 20014 Messwert vor.



eren Produktionsserie mit angepasstem Lesegerät zur Verfügung. Diese waren fehlerfrei kalibriert und zur weiteren Analyse der Messunsicherheit geeignet. Die Sensoren wurden bei Umgebungsdruck und bei Unterdruck, erzeugt zur einfachen Funktionskontrolle und als Demonstrator mit einem Saugheber mit Handpumpe ausgelesen (vgl. Bild 46).



Bild 46: Messaufbau mit Lesegerät, Antenne und Drucksensor zwischen Scheibe und Saugheber.

Die Messungen zur Langzeitstabilität erfolgten bei minimal möglichem Unterdruck und durch Zugabe von Umgebungsluft bei reduziertem Vakuum („Zwischenzustand“). Der Normal-Luftdruck wurde einer Wetterstation und dem Internet zeitgenau entnommen und pro Sensor drei Messreihen à fünf Einzelmessungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Kap. 10.3 tabelliert. Bei der Messung im Zwischenzustand können nur die fünf direkt hintereinander gemessenen Werte miteinander verglichen werden, da es nicht möglich war, für alle Messungen die gleichen Bedingungen zu generieren. Die Standardabweichung nimmt Werte zwischen 0,2 mbar und 3,0 mbar an. Die Ergebnisse der Messungen bei Umgebungs-Luftdruck und Raumtemperaturen von 23 °C für jeweils 300 Einzelmessungen sind in Bild 47 dargestellt.

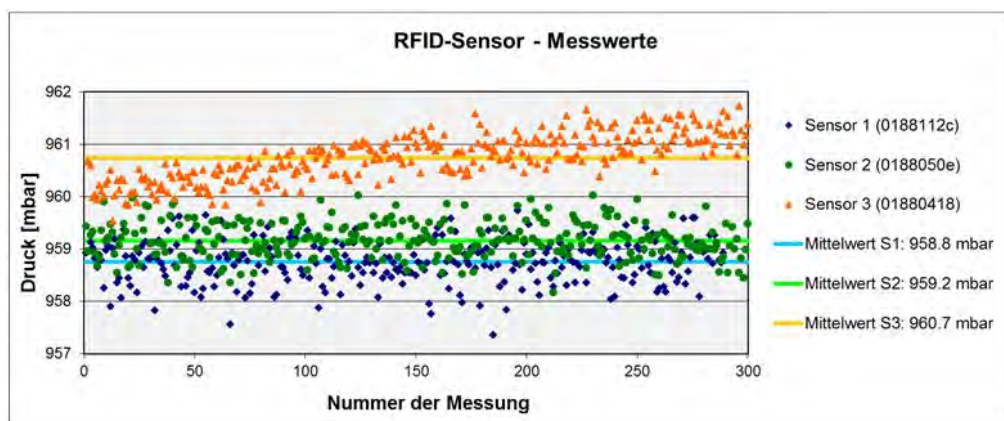


Bild 47: Gemessener Umgebungsdruck für drei RFID-Drucksensor-Transponder.

Die Mittelwerte der Sensoren liegen sehr nahe beieinander (Gesamtmittelwert 960 mbar, Differenz S1 zu S2 0,4 mbar). Der Mittelwert von Sensor 3 ist um ca. 1 mbar über den Werten von S1 und S2. Dieser Sensor reagierte empfindlicher auf die geringfügigen Unterschiede im barometrischen Luftdruck (Wetterlage) im Messzeitraum. Die Standardabweichung der Messungen für die 3 Sensoren ist in Tabelle 9 aufgeführt und passt gut zu den Sollwerten der RFID-Sensor-Transponder; weitere Anpassungen im Kalibrierprozess wurden hieraus mit abgeleitet.

Tabelle 9: Gemessene Standardabweichung der RFID-Drucksensor-Transponder

Sensor-Tag	Ident-Nr.	Standardabweichung
-	-	mbar
Sensor 1	0188112c	0,40
Sensor 2	0188050e	0,36
Sensor 3	01880418	0,43

## 6.2 Feuchte- und Temperatur-Transponder zur Bauteil-Überwachung

Zur Erfassung der Materialzustände in Bauteilen wie Außenwände, Decken oder Flachdächer und deren bauphysikalische Qualität im Bauprozess wurde vom Fraunhofer IMS ein passiver RFID-Transponder mit Feuchte- und Temperatur-Sensoren im LF-Frequenzbereich angepasst. Die Bauform ist aufgrund des flachen Designs für enge Zwischenräume z.B. zwischen Dämmung und Beplankung oder in WDV-Systemen geeignet. Er kann wie der IMS-Drucksensor-Transponder nur aus der Nahdistanz ausgelesen werden. Der Feuchte- und Temperatur-Transponder besteht aus folgenden Komponenten: einem „Ultra Low Power Mikrocontroller“, den Sensoren, entsprechenden Wandlern, der Versorgungsspannungsüberwachung sowie dem analogen Frontend zum Empfang von Energie (nach Standard ISO 18000-2) und Übertragen der Daten zum Lesegerät, siehe Bild 48.

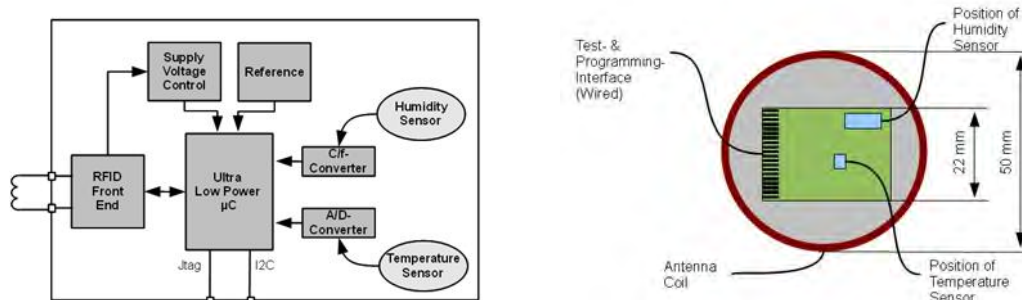


Bild 48 : Blockdiagramm und Layout-Schema des Feuchte- und Temperatur-Transponders

Als Feuchtesensor kommt ein kapazitiver polymerer Sensor zum Einsatz (siehe Kap.10.5.3). Die Schaltung zum Wandeln des Kapazitätswertes in einen digitalen Wert ist speziell optimiert auf Robustheit gegenüber Versorgungsspannungsschwankungen. Bild 49 zeigt eine Ansicht des Feuchte- und Temperatur-Transponders in unterschiedlicher Ausführung. Die Antennen-Spule hat einen Durchmesser von 50 mm. Die Trägerplatte ist 22 mm x 28 mm groß. Die Dicke des Transponders beträgt ca. 2 mm. Für unterschiedliche Anwendungen kann der Sensortransponder zum Schutz der Elektronik mit Epoxidharz bautaughlich vergossen und mit geeigneter Folie oder Schaumkeramik der Feuchtefühlerbereich abgedeckt werden (siehe Bild 49). Zur Demonstration der Bautaughlichkeit wurde der mobile IMS-LF-Reader für die Nutzung des Feuchtesensor-Transponders in weiter entfernten Bauteilen angepasst. Die Leseantenne mit einem Durchmesser von 10 cm ist über ein Teleskoprohr und Kabel mit dem Reader verbunden und kann so leichter über die Bauteil-Oberflächen geführt werden. Damit kann eine mit VIP-Drucksensor- und Feuchtesensor-Transponder bestückte Wand „gescannt“ werden; Praxiserprobungen dazu mit Langzeittests finden im Fraunhofer InHaus-1 statt (siehe auch Kap. 7.1). Die Weiterentwicklung des IMS-Prototyp-Readers zum kleineren sog. Tiny-Reader zum Projektende in 2012 ist im Kap. 7.1 und 9.3 dargestellt.





Bild 49: Ansicht des IMS-LF-Feuchte-Tags (links) und als Prototyp (grau, rechts) in Handfammung.

Die wesentlichen technischen Daten des RFID-Feuchtesensor-Transponders sind:

- Modulationsgrad: typ. 90 %,
- Ident-Datenformat nach ASK-Standard,
- Messbereich Feuchte: 0 bis 100 % (bei -20 °C bis +85 °C),
- Hysterese: max. 1,5 %,
- Genauigkeit: typ. 5 %,
- Messbereich Temperatur: -40 °C bis +125 °C
- Genauigkeit: +/- 0,5 °C (0 °C bis +65 °C), +/- 1,0 °C (-20 °C bis +85 °C).

### 6.3 Anwendungsbeispiel Energie: Energetischer Soll-Ist-Vergleich

Im Kapitel 6.1 wurden Voraussetzungen für die Anwendung des RFID-Systems bei VIP untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass mit dem vorhandenen System bereits ein ausichtsreiches, manuelles Kontrollsystem für Vakuumdammpaneele besteht. Allerdings zeigen die Versuche auch, dass Faktoren wie Sensortemperatur und Kalibrieraufwand bei der Datenauswertung integriert sein müssen. Das Ziel einer automatisierten, künftigen Anwendung des Systems ist es, dem Nutzer die wesentlichen Informationen übersichtlich zur Verfügung zu stellen. In diesem Kapitel werden deshalb Möglichkeiten zur Erfassung und Aufbereitung der Messdaten für eine Integration in die elektronische Kennzeichnung von Bauteilen zum Wärmeschutz [10] und in die Gebäudeautomation aufgezeigt. Wenn Vakuumisulationspaneele (VIP) mit RFID-Sensortransponder als Dammssystem in einem Gebäude eingebaut sind, könnte der Anwender des RFID-Monitoringsystems der Facility Manager (FM) und Hausmeister sein. Die Aufgaben des FM erstrecken sich i.a. über mehrere Lebenszyklusphasen des Gebäudes, der Übernahme nach der Bauerstellung, dem laufenden Betrieb mit den Sicherheitsbegehungen und der Instandhaltung des Gebäudes. Somit befindet sich die Kontrolle der Funktionstüchtigkeit einer Fassade oder eines Daches im Aufgabenfeld des Facility Managements.

Im untersuchten Fallbeispiel einer Fassade mit VIP-Dämmung und integrierten RFID-Drucksensor-Transpondern zeigt das Lesegerät den Druck bei einer bestimmten Temperatur im VIP mit der zugeordneten Identnummer an. Eine Möglichkeit mit diesen Daten umzugehen, ist die dezentrale Feststellung und Verarbeitung vor Ort durch den Facility Manager. Im Falle der Vakuumdammpaneele würde dieser im einfachsten Fall mit einem Lesegerät durch das Gebäude gehen und die VIP (oder andere Bauteile mit RFID-Transpondern) einzeln von Hand kontrollieren. Auf ansteigende Drücke in den kontrollierten VIP müsste entsprechend reagiert werden. Dieses Verfahren ist zu aufwändig und durch den nötigen Abgleich mit Tabellenwerten nicht sehr anwenderfreundlich.

Eine Softwarelösung könnte so aussehen: der gemessene Innendruck im VIP wird mit den Soll-Druckwerten abgeglichen und dem Nutzer durch ein Ampelsystem der Funktionszustand des VIP übersichtlich dargestellt. Daraus wird der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) des Fassadenelements mit Hilfe der Wärmeleitfähigkeit und der Dicke des VIP berechnet. In Bild 50 ist ein Blockdiagramm eines möglichen Ablaufs der Datenverarbeitung aus dem VIP-Sensortransponder für diesen Fall dargestellt.

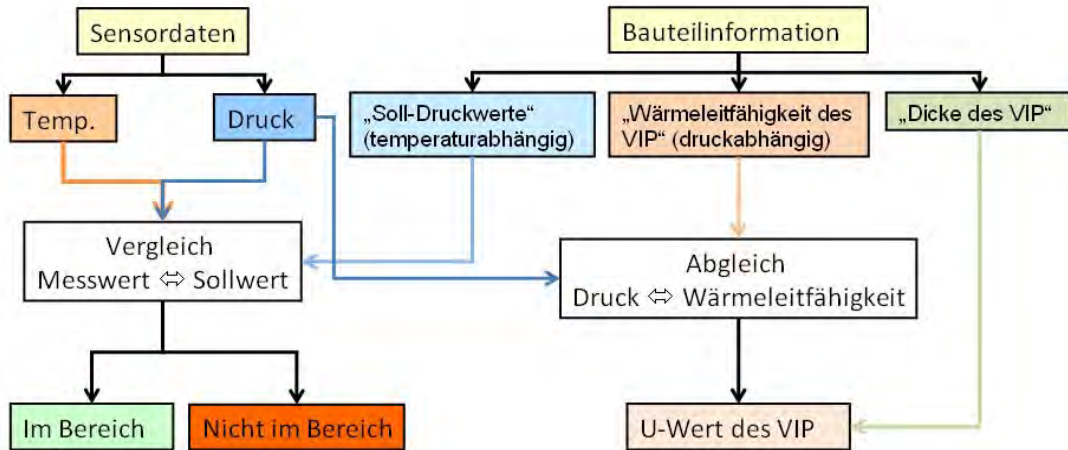


Bild 50 : Blockdiagramm des prinzipiellen Ablaufs eines Programms zur Sensordatenverarbeitung

Bei den Eingangsdaten der Software kann zwischen Sensordaten und Bauteilinformationen unterschieden werden. Die für die Berechnung relevanten Daten werden in Kapitel 6.3.1 und Hinweise zum Datenspeicherort in Kapitel 6.3.2 beschrieben.

Aus der automatisierten Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten des kompletten Fassadenelements kann mit Hilfe der Plandaten des Gebäudes die Berechnung des Heizenergiebedarfs und der Abweichungen auf Grund des festgestellten Zustands der Fassade erfolgen. Für diesen Fall wurde ein Beispielprogramm entwickelt, das dem Facility Manager eine übersichtliche Funktionskontrolle mit Hilfe der Zahlenwerte aber auch durch eine Ampeldarstellung den Zustand des VIP anzeigt und den U-Wert des VIP sowie des gesamten Fassadenelements berechnet. Bild 51 zeigt die Bedienoberfläche des Programms nach einem Auslesevorgang. Dem Nutzer wird die Ident-Nummer des ausgelesenen Sensors, die Temperatur und der Innendruck im VIP angezeigt (von links oben nach unten). Aus dem gemessenen Druckwert wird die derzeitige Wärmeleitfähigkeit des VIP durch die hinterlegten Herstellerdaten aus der baurechtlichen Zulassung abgeleitet. Die Ampelfarbe im Hinweisfeld zeigt den Funktionsstatus des VIP an: grün symbolisiert einen Zustand innerhalb des gültigen Funktionsbereichs. Gelb eine Abweichung innerhalb der Toleranzgrenzen, die eine Alterung berücksichtigen kann. Für die Nutzungszeit der VIP über viele Jahre ist die physikalisch reale Veränderung des Vakuums durch den natürlichen Gasaustausch in den Sicherheitsbeiwert bei der bauaufsichtliche Zulassung mit eingerechnet. Dieser könnte zeitperiodengenau nun über den gemessenen, tatsächlichen Innendruckzustand verglichen werden. Damit lassen sich höhere Vorhaltemaße und eine künstliche Verschlechterung in den ersten Jahrzehnten kompensieren. Mit dem U-Wert des VIP und den Bauteil-daten des auf der rechten Seite dargestellten Fassadenelements (FE) wird der U-Wert dieses Fassadenelements berechnet. Auch für dieses Feld ist die Ampelfunktion eingerichtet.

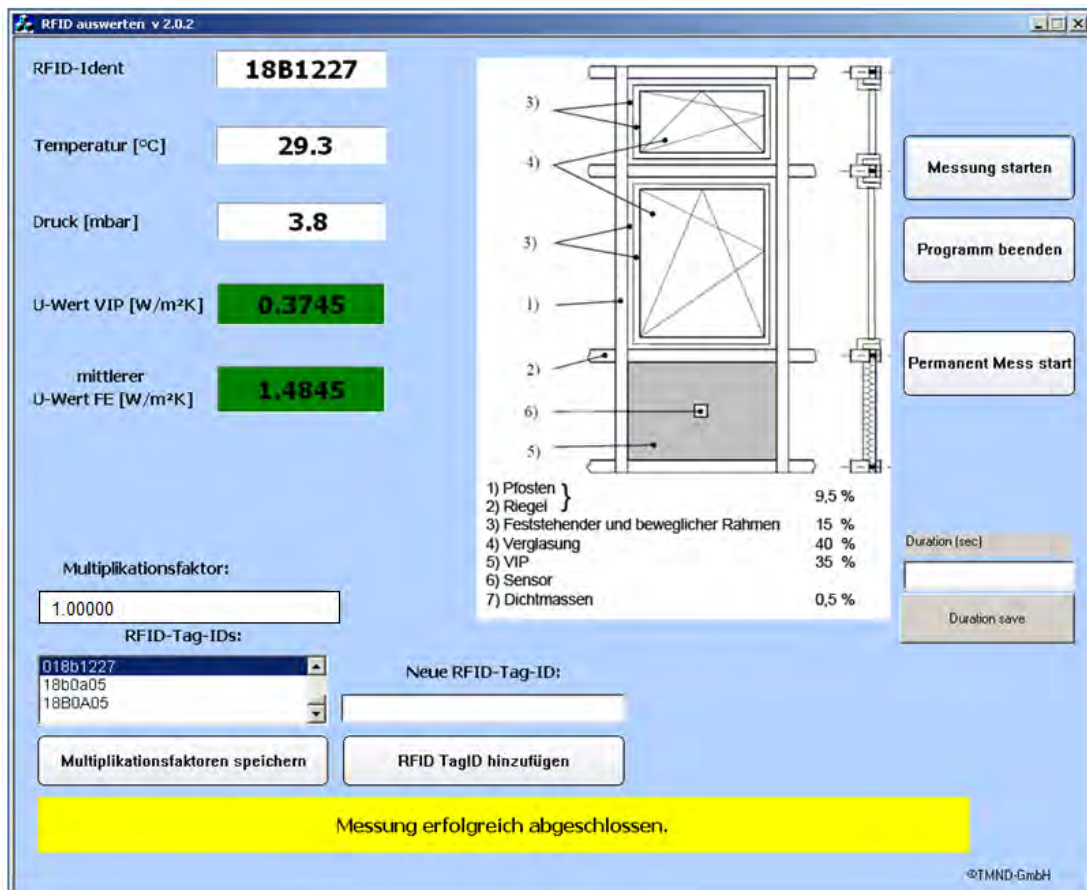


Bild 51 : Bedienoberfläche des Beispielprogramms nach einem Auslesevorgang des VIP.

### 6.3.1 Relevante Bauteildaten

Die Festlegung, welche Bauteildaten einer Fassade relevant sind, hängt weitestgehend von der späteren Anwendung ab. Als Beispielanwendung wurde die zuvor dargestellte Berechnung des U-Werts eines Fassadenelements gewählt. Dafür sollten diese Parameter aus den Solldaten der Planung und im Idealfall aus den Ist-Daten der Barcode- oder RFID-Kennzeichnung vorhanden sein:

- U-Werte der verschiedenen Bestandteile des Fassadenelements,
- Prozentuale Anteile oder Maße der Bestandteile am gesamten Fassadenelement, d.h. für Fenster, Pfosten, Riegel, Brüstungselement(e),
- Kennwert für den Bauteilanschluss als längenbezogener U-Wert oder Wärmebrücken-Zuschlag zur Charakterisierung der Bauweise.

Die generellen Vorteile einer Kennzeichnung der Bauteile durch die RFID-Technik wurden bereits in der ersten Projektphase „Kennzahlen und Bauqualität“ behandelt [5]. Besonders für größere Gebäude mit sehr vielen Fassadenelementen bedeutet dies eine große Anzahl an Transpondern. Der Aspekt der Wirtschaftlichkeit kann hierbei zur Schwierigkeit werden, solange die Verwendung der RFID-Transponder sich noch auf wenige Anwendungen beschränkt. Dies ist im Projekt „InWeMo“ [2] und „IntelliBau“ [3] ausführlich dargestellt. Ein Lösungsansatz ist die Bildung von modularen „Bauteilpaketen“, die ähnlich aufgebaut sind und (vorerst) jeweils nur mit einem Transponder ausgestattet sind. Bei Elementfassaden werden die funktionalen Einheiten bereits vormontiert auf die Baustelle geliefert. Hierbei ist ein Transponder je Fassadenelement bereits ausreichend, wenn dieser einen ausreichenden Speicherchip zur Datenhaltung besitzt. Die dynamische Änderung

des U-Werts, die durch das im Fassadenelement verbauten VIP zustande kommt, muss bei der Datenhaltung zusätzlich berücksichtigt werden.

### 6.3.2 Datenspeicherort

Prinzipiell sind verschiedene Möglichkeiten in der Erprobung, wo die Daten für ein Bauteilmonitoring gespeichert werden können.

#### Data-on-Tag

Alle relevanten Bauteilinformationen sind direkt auf dem Transponder gespeichert. Die Speichergröße der Transponder ist von der Informationsmenge, die gespeichert werden soll, abhängig. Zu beachten ist, dass mit einer größeren Speichergröße der Preis des Transponders steigt. Sollen viele Daten gespeichert werden, stellt sich somit die Frage der Wirtschaftlichkeit einer solchen Möglichkeit. Eine weitere Schwierigkeit ist der gesteigerte Energiebedarf bei der Datenübertragung, die gewährleistet sein muss.

#### Data-on-Network

Die relevanten Daten sind in einer Datenbank gespeichert. Die Zuordnung der Bauteilinformationen findet über eine Software statt, die die Ident-Nummer (ID) des Transponders den in der Datenbank gespeicherten Daten zuweist. Für den Speicherort der Datenbank stehen auch zwei Möglichkeiten zur Verfügung.

a) Die Datenbank ist direkt an die Software gekoppelt und auf dem PC an dem die Software ausgeführt wird gespeichert. Die Daten könnten ggf. vom Nutzer selbst ergänzt werden. Für diesen Fall wäre eine Verbindung der Software zu anderer Planungssoftware wie beispielsweise CAD-Programmen sinnvoll. Die Planung eines Gebäudes müsste für diesen Fall in kompatibel zueinander arbeitenden Programmen erfolgen, um das Nutzenpotential der ID-Nummern zu verbreitern. Ein Standard für eine solche Lösung ist der Datenaustausch über das genormte Building Information Modell (BIM) der Industriallianz für Interoperabilität (IA/IFC) [34]. Auf diese Weise können Architekt, Fachplaner und Gebäudebetreiber mit der passenden Software die Daten zu den mit RFID-Transpondern ausgestatteten Bauteilen in ein digitales Gebäudemodell integrieren. Die Schwierigkeit einer solchen Lösung liegt in der Zusammenführung von Planung und Ausführung. Der Einbauort jedes Bauteils mit RFID-Technik muss entweder zuvor bei der Planung festgelegt werden oder bei der Ausführung in das Gebäudemodell eingepflegt werden. Derzeit stehen dafür nur wenige Programmsysteme zur Verfügung (siehe Kap. 7.2 und 9.3).

b) Die Datenbank ist zentral auf einem Server gespeichert. Die Datenbank könnte beispielsweise von den Herstellern, der mit RFID-Transponder ausgestatteten Produkte zur Verfügung gestellt werden. Die Software zur Auswertung der Sensortransponder-Daten (einfache Identnummer und dynamische Sensorwerte) nach der Erfassung mit dem Reader könnte über das Internet auf diese Datenbank zugreifen. Solche Modelle sind derzeit unter dem Stichwort „Cloud-Computing“ vor allem für Smartphones in der Nutzung. Die in Kap. 9.3 dargelegten weiteren Entwicklungen für die Gerätekopplung werden dieses Potential erschließen.

Die genannten Möglichkeiten zur Datenspeicherung weisen sowohl Vorteile als auch Nachteile auf. Ein wesentliches Argument für die Verwendung einer zentralen Datenbanklösung ist die Anzahl der verwendeten Transponder. Je mehr RFID-Transponder die einem Gebäude eingesetzt sind, desto lohnenswerter wird die Speicherung in einer Datenbank. Im Hinblick auf die zukünftige Entwicklung und Verbreitung der RFID-Technik, ist ebenfalls

die Datenbanklösung zu favorisieren. Die Prognosen sagen der RFID-Technik eine weiter ansteigende Marktentwicklung voraus [6, 14]. Wenn sich der Markt der RFID-Technik weiter im bisherigen Maße entwickelt, ist zukünftig eine zentrale Lösung der Datenspeicherung (über das Internet) sinnvoll, anwenderfreundlicher und wirtschaftlicher. Diesem Bereich widmeten sich in letzter Zeit unter dem Begriff „Internet der Dinge“ viele Firmen und Forschungseinrichtungen [12, 15, 29].

### 6.3.3 Integration in die Gebäudeautomation

Die Definition der Gebäudeautomation (GA) „Einrichtungen, Software und Dienstleistungen für automatische Steuerung und Regelung, Überwachung und Optimierung sowie für Bedienung und Management zum energieeffizienten, wirtschaftlichen und sicheren Betrieb der TGA“ nach VDI und [35] charakterisiert die Notwendigkeit der Datenvernetzung in den 3 Funktionsebenen der GA. Beispiele dafür sind die zuvor beschriebenen Möglichkeiten für eine zukünftige Anwendung des RFID-Kontrollsystems an Bauteilen wie VIP in der Fassade. Im Bereich der Wartung von technischen Anlagen zum Brandschutz oder in Kraftwerken ist die Nutzung der RFID-Tags schon eingeführt [6]. Langfristig wird eine Integration der RFID-Sensordaten in die Gebäudeautomation selbstverständlich sein, um eine automatische Funktionskontrolle der Bauteile (wie VIP) im eingebauten Zustand zu ermöglichen. Die RFID-Drucksensoren, die im oben gezeigten Ebenenmodell der GA in der Feldebene sind, müssen somit mit der Automationsebene (z.B. durch Metaprogramme wie BACnet [35]) verbunden werden. Dieser Schritt kann z.B. durch eine größere Reichweite beim Auslesen der RFID-Sensoren erreicht werden. Dann lassen sich die Sensoren über ein drahtloses Sensornetz mit einem zentralen Funkmodul im Raum verbinden (siehe Beispiele in Kap. 4.3 und 6.7). Ein Steuern oder Regeln auf Grund der Sensordaten wäre in dieser Feldebene nicht nötig, wenn die Daten direkt an die Managementebene weitergeleitet werden. Dort lassen sich die Daten in der Gebäudeleittechnik (GLT) weiter verarbeitet und der in Kapitel 6.3 beschriebene Vergleich zwischen Soll- und Messwert zentral durchführen und bewerten. Im Falle eines ansteigenden Innendrucks im VIP kann die GLT der zuständigen Person (Facility Manager) eine Warnmeldung per E-Mail oder SMS auf das Mobiltelefon zukommen lassen.

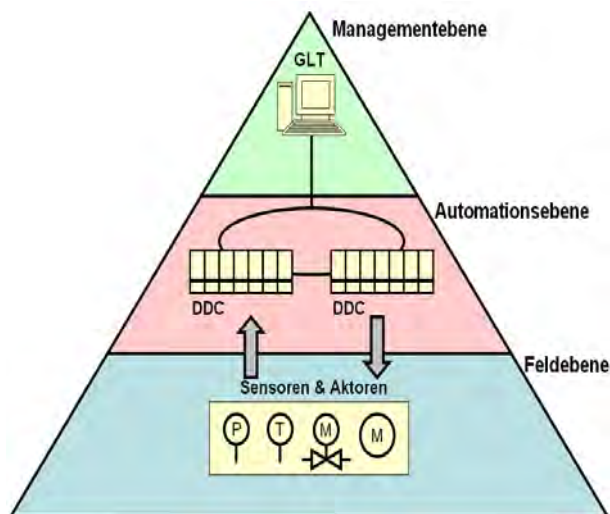


Bild 52 : Hierarchisches Ebenenmodell in der Gebäudeautomation (nach [35])

Die Bedeutung von drahtlosen Sensornetzen nimmt im Bereich der Gebäudeautomation ständig zu, da sie eine funkbasierte Aufnahme von Messwerten ermöglichen. Durch das Nicht-Vorhandensein von Kabelverbindungen eignen sie sich besonders gut zum Nachrüsten und ermöglichen eine maximale Flexibilität. Deshalb ist es nicht verwunderlich, dass in den letzten Monaten und Jahren immer mehr Hersteller drahtlose Sensornetze kostengünstig anbieten (siehe Übersicht in Kap. 4.3). Da diese Sensoren zur Steuerung von Sonnenschutz, Beleuchtung oder Türen in den jeweiligen Bauteilen wie Jalousien, Leuchten bzw. Schlösser ihre Identdaten codiert hinterlegt haben, ist es nur ein kleiner Schritt diese ID-Nummern auch für die Herstell- und Lieferlogistik sowie die Wartung etc. zu nutzen. Eine Kopplung mit der Sachverständigen-Tätigkeit bei der Geräte-Prüfung nach UVV-BGV als Prüfpflicht des Anlagen-/Gebäudebetreibers wird seit kurzem als RFID-basiertes Service-Managementssystem kommerziell angeboten [36]. Eine weitere Möglichkeit RFID-Daten in der GA zu nutzen stellen Module wie der Multi Application Server<sup>31</sup> dar. Solche Geräte verfügen über ein eigenes Funkmodul und ermöglichen so das Auslesen von Sensordaten via Funk. Die Messwerte können dann im Gebäude an einer drahtgebundenen LAN-Schnittstelle und/oder einer Internet-Verbindung bereitgestellt werden (siehe auch Kap. 6.7). Eine weitere Voraussetzung für die oben beschriebene Umsetzung einer Anbindung des RFID-Sensortransponder-Systems an die Gebäudeautomation ist die Erhöhung der Auslese-Reichweite durch die Verwendung von GHz-Sensornetze, siehe Kap. 6.5.3.

#### **6.3.4 Dynamischer Energieausweis**

Eine Möglichkeit, die RFID-Sensordaten aus Bauteilen über die Gebäudeautomation zu nutzen, ist die automatische Erstellung eines dynamischen Energieausweises. Der Vorteil ist zum einen eine ständige und aktuelle Kontrollmöglichkeit des Energieverbrauchs eines Gebäudes (ohne Einfluss des Nutzerverhaltens), zum anderen kann einem Mieter oder Käufer einer Immobilie gezeigt werden, welche energetische Gesamteffizienz die Immobilie aktuell besitzt. Das Ziel des Energieausweises ist es, den Energiebedarf von Immobilien untereinander vergleichbar zu machen und dadurch die Transparenz auf dem Immobilienmarkt zu erhöhen. Die gesetzlichen Rahmenbedingungen des Energieausweises werden durch die Energieeinsparverordnung (EnEV) geregelt [37]. Eine Besonderheit der Energieeinsparverordnung ist, dass der maximal zulässige Energiebedarf eines Gebäudes sich nicht auf die Endenergie an der Gebäudegrenze bezieht, sondern auf die Primärenergie. D.h. die Energie, die zur Gewinnung, Umwandlung und Verteilung des Energieträgers nötig ist, wird ebenfalls berücksichtigt. Die Berechnungsverfahren für die energetische Bewertung von Gebäuden sind in der Normenreihe DIN V 18599 [38] beschrieben. Bei der Erstellung des Energieausweises wird zwischen bedarfsorientiertem und verbrauchsorientiertem Energieausweis unterschieden. Der verbrauchsorientierte Energieausweis wird auf Grundlage des Energieverbrauchs eines Gebäudes der letzten drei Jahre erstellt wozu „nur“ die Daten aus der Energielieferung erforderlich sind. Der Nachteil bei dieser Möglichkeit der Erstellung ist der große Einfluss des Nutzerverhalten, der eine eindeutige Vergleichbarkeit von Gebäuden untereinander kaum zulässt solange nicht das Nutzerverhalten über z.B. intelligente Erfassungsgeräte wie Stromzähler transparent wird (was viele nicht wünschen). Der bedarfsorientierte Energieausweis wird auf der Grundlage des Energiebedarfs eines Gebäudes erstellt. Das heißt anhand der baulichen Gegebenheiten wie

<sup>31</sup> Vgl. [http://www.webolution.de/MAS\\_4TE\\_d.pdf](http://www.webolution.de/MAS_4TE_d.pdf), letzter Zugriff: 20.06.2011.



der Wärmedämmung von Fassaden und Heizanlagen wird berechnet, wie viel Energie zur Heizung und Warmwasserbereitung benötigt wird. Der Nachteil dieser Methode ist der hohe Aufwand, der vor allem bei der nachträglichen Erstellung an einem Bestandsgebäude betrieben werden muss bis alle Bauteile aufgenommen wurden. Bei Neubauten, bei denen die Erstellung des Energieausweises hingegen schon bei der Planung berücksichtigt wird, kann der Aufwand in Grenzen gehalten werden, da zu diesem Zeitpunkt die Bauteilaufbauten sowie die verwendete Anlagentechnik bekannt sind.

Eine Verbesserung in Hinblick auf eine höhere Genauigkeit des Energieausweises könnten RFID-Transponder in Bauteilen in Kombination mit Sensoren am Gebäude darstellen. Im Folgenden wird deshalb ein Szenario aufgezeigt, wie der bedarfsorientierte Energieausweis sich zukünftig für die jeweilige Immobilie erstellen und den dynamisch sich ändernden Randbedingungen anpassen lässt. Dafür wären folgende Voraussetzungen nötig:

- Der Energieausweis wird durch eine Software berechnet.
- Alle notwendigen Gebäudeparameter sind durch den Planer (Architekt, Energieberater) in einer Datei hinterlegt, auf die die Software zugreifen kann.
- Alle verwendeten RFID-Transponder (ohne oder mit Sensorik) dienen der Identifikation und Beschreibung von Bauteilen und deren Eigenschaften. Die Bauteileigenschaften werden von den Herstellern über das Internet bereitgestellt.
- Die verwendeten Sensortransponder sind mit der Gebäudeleittechnik verbunden.

Der Energieberater muss für eine Anfertigung des Energieausweises zuerst die Gebäudedaten erfassen. Dies geschieht derzeit in der Regel durch Ortsbegehungen in denen er die Gebäudedaten notiert. Durch Bauteile, die mit RFID-Transpondern ausgestattet sind, könnte der Aufwand der Datenerfassung wesentlich verringert werden. Das Aufmessen, Notieren der Daten und der Rechercheaufwand bei nicht sichtbaren Bauteilaufbauten entfallen. Bei der Begehung müssen ausschließlich die RFID-Transponder ausgelesen, Daten gespeichert und Fotos in das Erfassungsprogramm integriert werden. Danach könnte eine transparente Gebäudeakte vorliegen. Diese Vision entstand schon 2007 mit der Novelle der EnEV und ergab neue Werkzeuge für die Datenerfassung und Datenbewertung wie die Elektronische Gebäude- und Anlagen-Checkliste für eine Gebäudeinspektion (siehe Bild 53) als Basis für die Berechnungen nach DIN V 18599 [39]. Dort werden eine Vielzahl von Kenndaten zum energetischen Zustand von Bauteile und Anlagenteilen erhoben, derzeit noch meist ohne eine Dokumentation, woher die Daten stammen und welche Qualität diese haben. Es ist i.a. nicht ersichtlich, ob die Kennwerte aus der Schätzung des Energieberaters vor Ort stammen, ob dies einzelne Messwerte sind oder ob dies statistisch abgesicherte Bemessungswerte sind. Vor allem bei den Kennwerten zum Wärmeschutz wie R- oder U-Werte können signifikante Unterschiede auftreten, die die Qualität der Ausweise beeinflussen. Eine Integration solcher Bewertungshilfen ist notwendig, um die auch für diese Normenserie „18599“ geltende Forderung der EU-Kommission nach einer Abschätzung der Aussagegenauigkeit von Energieausweisen zu erfüllen. Mit der begonnenen Marktaufsicht bei Bauprodukten und deren CE-Kennzeichnung sind weitere Chancen an die elektronische Kennzeichnung durch die RFID-Technik verbunden (siehe Kap. 9.4).

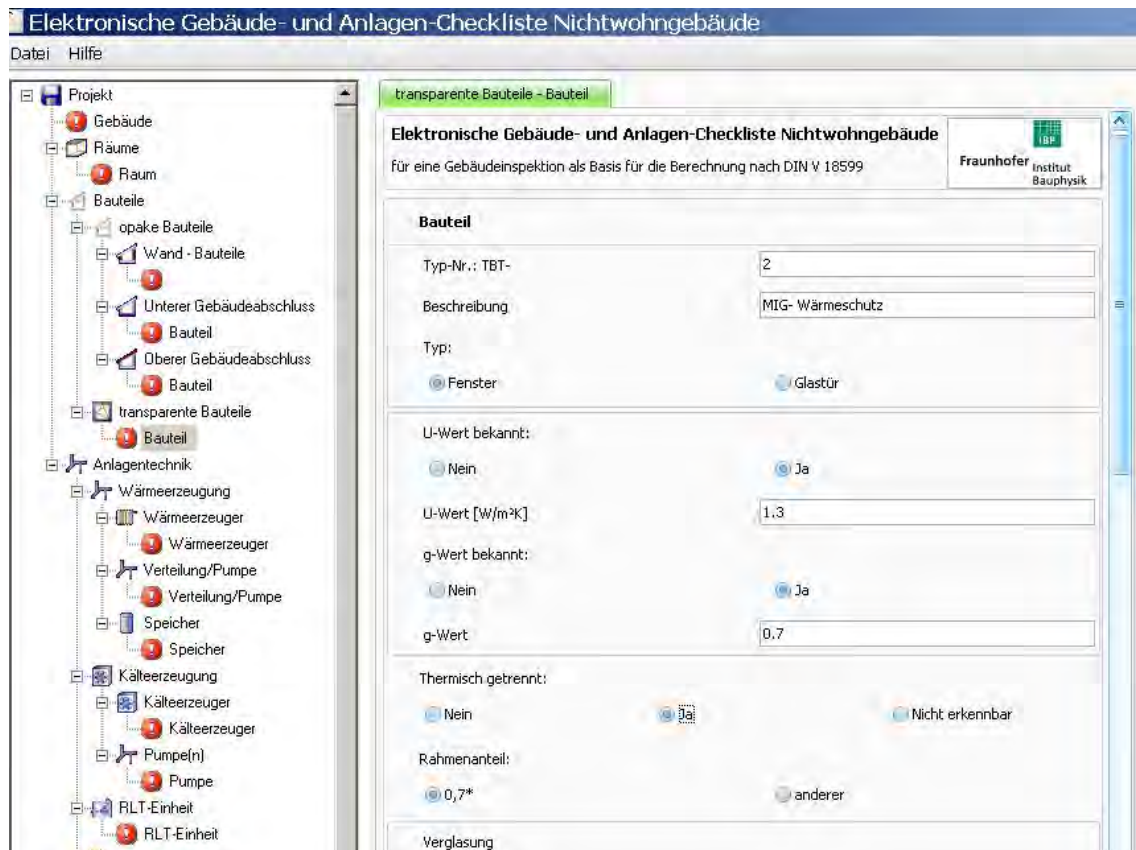


Bild 53: Darstellung der Eingabemaske für eine Checkliste zur Kenndatenerfassung nach DIN V 18599 (aus [40]).

Zusammen mit den laufenden Arbeiten in der ARGE RFIDimBau zur Nutzung der RFID-Technik in und an Bauteilen ergeben sich so kurz- und mittelfristig Umsetzungspotentiale nicht nur für die o.g. Checkliste für Energieausweis-Daten. Mit einer hoffentlich besseren Dokumentation und Rückverfolgbarkeit der Bauprodukt- und Bauteil-Daten in den Datenbanken und Speicherchips lassen sich diese bei der Anlieferung und beim Einbau „automatisch“ erfassen, melden ihre Daten an die Gebäudeakte im „Bauserver“ und erzeugen den gewünschten Soll-Ist-Vergleich zur Bauabnahme. Daraus können die geforderten Nachweise und die Daten zur Verwaltung von Gebäude und Anlagen entstehen. Ein möglicher Weg vom Paprietikett zur elektronischen Datei für die Erstellung von Dokumentationen und Nachweise (wie Energieausweis) ist schematisch für die wesentlichen Schritte im Bauprozess in Bild 54 dargestellt (aus [10]).



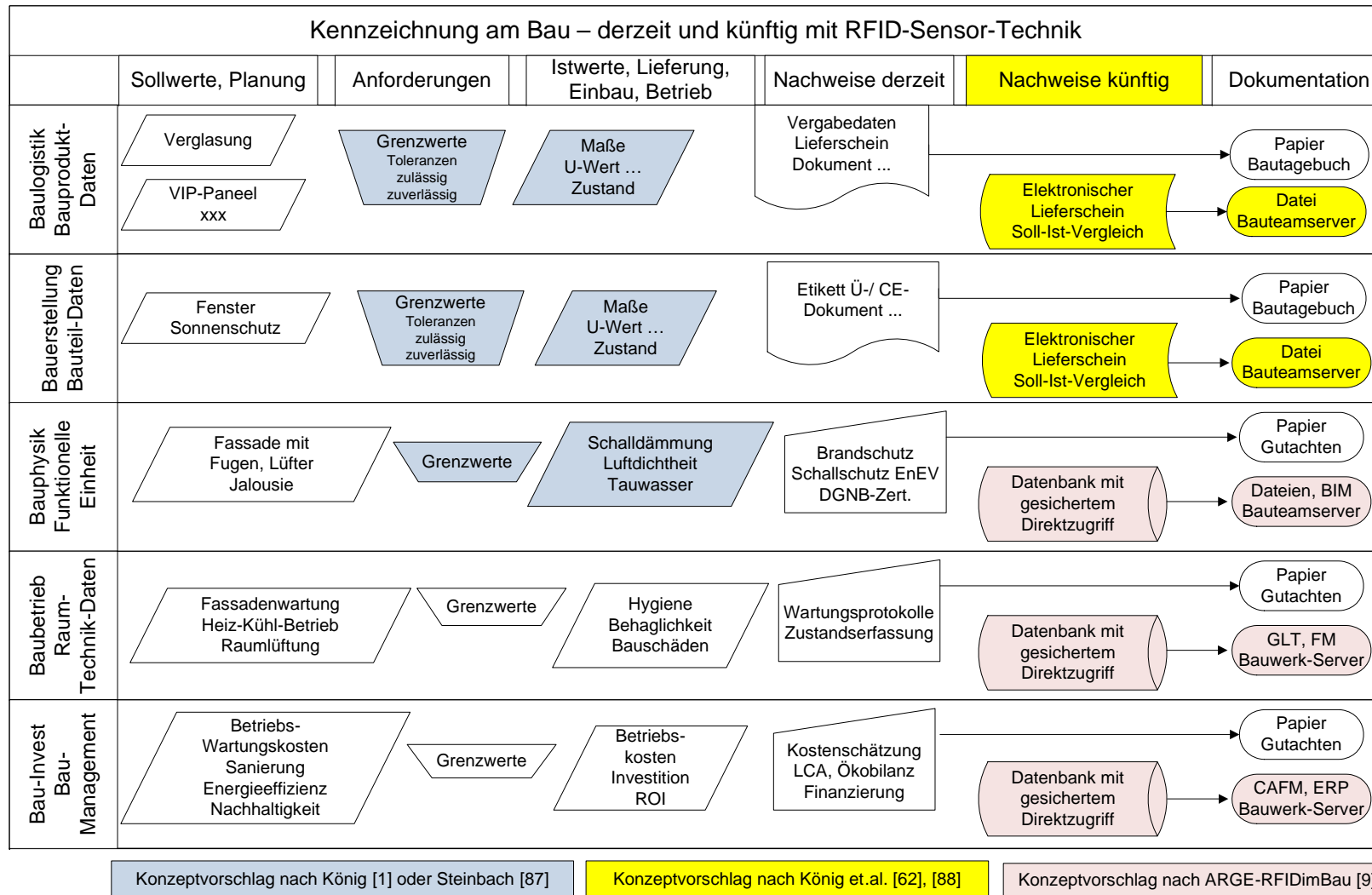


Bild 54 : Schema der zukünftigen Kennzeichnung am Bau mit RFID-Sensortechnik zu Dokumentation und Nachweis von Bauqualität

## 6.4 Anwendungsbeispiel Energie: Solaranlagensteuerung

Im Winter bewirkt der Schneebelag auf Solarmodulen eine Einbuße des solaren Ertrags. Wünschenswert ist hier eine einfache Abtaugung der Oberflächen. Damit lassen sich Solarthermie- wie auch Kombianlagen aus Photovoltaik- und Solarthermiemodulen ausrüsten. Mit einem Reverse-Betrieb des Wasserkreislaufs lässt sich die Oberfläche so weit erwärmen, dass mit der Bildung eines Wasserfilms der Schneebelag abrutschen kann. Wichtig ist dabei der Einsatz einer geeigneten Sensorik zur Erkennung der einzelnen Zustände. Aus den Anforderungen des Projektpartners Firma Roto Dach- und Solartechnologie GmbH wurde ein Konzept für eine solche Solaranlagensteuerung entwickelt und mit ausgewählten Komponenten aus dem Projekt RFID-Sensor als Demonstrator realisiert. Das als Prototyp vorhandene System setzt sich aus einem Sensortransponder, einer Basisstation und ein PLC-Gateway zusammen (siehe Kap. 3 und Bild 55). Der Sensortransponder besteht aus einem Mikrocontroller, Feuchte-, Temperatur-, Beleuchtungs- und Dehnungssensoren, einem Transceiver und einer Batterie. Die Basisstation verfügt über eine USB-Schnittstelle zum Anschluss an einen PC oder ein Steuergerät für Solaranlagen. Das PLC-Gateway besteht aus einem Transceiver und einem PLC-Modem und hat die Aufgabe die empfangenen Daten aus den Sensortranspondern auf PLC (Power Line Communication) umzusetzen. Dadurch kann die Reichweite eines Netzwerkes aus Sensortranspondern erhöht werden. In der hier beschriebenen Anwendung werden die Sensordaten auf diese Weise vom Dach eines Gebäudes zur Solarsteuerung in den Keller übertragen.



Bild 55 : Beispiele für Sensornetzwerk-Komponenten als Prototyp (Fraunhofer IMS): Sensortransponder für Temperatur, Feuchte, Licht mit externem Sensor am Kabel (links), PLC-Gateway (Mitte) und Basisstation zum Datenempfang (rechts).

In einem Experiment konnte gezeigt werden, dass mit Hilfe aktiver Sensortransponder eine Beschneigung einer PV-Solaranlage erkannt und zur Steuerung einer Abtauvorrichtung realisiert werden kann. Dazu wurde eine Glasscheibe in einem für Solardächer typischen Winkel aufgestellt und dahinter zwei aktive Sensortransponder platziert. Die Sensortransponder sind mit der oben gezeigten Sensornetz-Basisstation zur Datenerfassung an einem PC vernetzt. Die grafische Auswertung der Sensorsignale erfolgte mit dem in Kap. 4.4 erläuterten Programm Sensornet Viewer. Mit diesem Messaufbau wurden nun verschiedene Szenarien simuliert, um die Funktionalität nachzuweisen. Bild 56 zeigt die Beleuchtungsstärke als Messwert aus dem RFID-Sensorknoten über der Zeit. Um ca. 10:48 Uhr wurde der Schnee über dem rechten Sensor entfernt. Gut zu erkennen ist die sprunghafte Zunahme der Beleuchtungsstärke dieses Sensors (Sensor 1, Blau) gegenüber dem zweiten beschneiten Sensor (Sensor 2, Magenta).

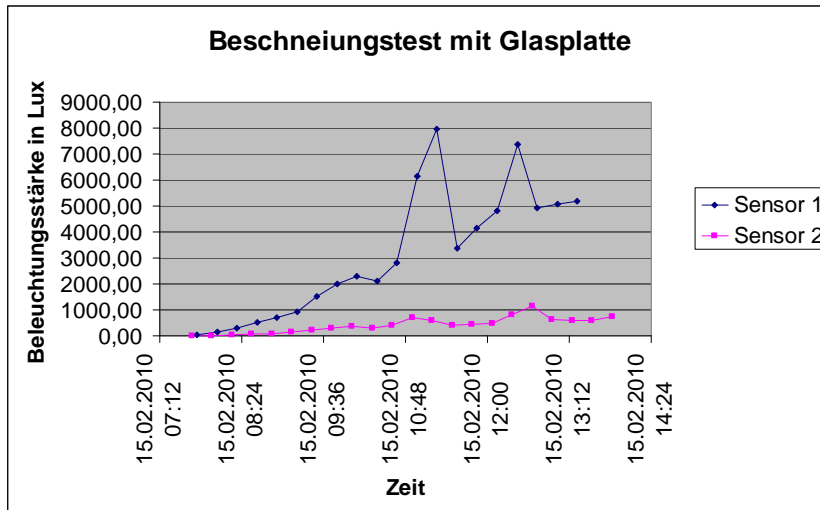


Bild 56: Einfluss von Schnee auf das RFID-Sensorsignal.

Aus dem Experiment ist zu folgern, dass die Lichtsensoren in den Sensornetzknotten für eine solche Steuerung einer Solaranlage prinzipiell geeignet wären. Weitere Experimente und Umsetzungsvorschläge mit diesen Sensornetzknotten und Erfassungsgeräten zur Übertragung von Sensordaten aus Anlagen und Bauteilen sind in den folgenden Kapiteln dargestellt.

## 6.5 Anwendung Hygiene, Lüftungsleitungen

Die Luftqualität im Raum und im Gebäude stellt einen wesentlichen Faktor für unser Wohlempfinden, unsere Leistungsfähigkeit und unsere Gesundheit dar. Neben verschiedenen Emissionsquellen im Raum wie z. B. Schadstoffe aus Baumaterialien, Einrichtungsgegenständen oder Personen hat die Raumluftechnik einen erheblichen Einfluss auf die Qualität der Raumluft. Hygienisch bedenkliche Zustände in RLT- Anlagen wie verschmutzte Lüftungsleitungen, durchnässte Luftfilter oder Tauwasser, durch die sich Bakterien und Schimmelpilze bilden können, stellen eine Gefahr für die Gesundheit des Menschen dar und führen zu Beschwerden und Geruchsbelästigungen. Zwar sind turnusgemäße Wartungen und Kontrollen vorgeschrieben, dennoch beziehen sich diese hauptsächlich auf den technischen Zustand der Anlagen. Eine Überprüfung der Hygiene im gesamten Luftkanalnetz, besonders in schwer zugänglichen und verwinkelten Bereichen, wird dagegen eher vernachlässigt und spielt in den dafür notwendigen Normen eine vergleichsweise untergeordnete Rolle.

Die Hygiene in technischen Anlagen bietet ein großes Potential für die Anwendung der RFID-Sensortechnik. Sensoren in Luftleitungen und wichtigen Anlagenkomponenten können physikalische Prozessgrößen aufnehmen und die Daten kontaktlos an ein Lesegerät übermitteln. Damit lassen sich Überschreitungen wichtiger Grenzwerte wie z.B. der Feuchte automatisiert erkennen und Maßnahmen steuern. Es kann auch nach einer Mitteilung an das Facility Management (FM) eine unverzügliche Überprüfung und Wartung stattfinden. Im Folgenden werden dazu Beispiele für die verschiedenen Funktionsweisen und praktischen Anwendungsmöglichkeiten der RFID- Sensortechnik genannt und Vor- und Nachteile diskutiert.

### 6.5.1 Anforderungen an Luftleitungen

In den „Hygiene-Regeln“ der Serie VDI 6022/1<sup>32</sup>, VDI 6022/2<sup>33</sup> und VDI 6022/3<sup>34</sup> sind die Anforderungen an die einzelnen raumluftechnischen Komponenten und an die Schulung des Personals detailliert aufgeführt. Je nach Anforderung und Nutzen des Gebäudes gelten weiterhin die DIN 1946/4 „Raumluftechnische Anlagen in Gebäuden und Räumen des Gesundheitswesens“, die DIN 1946/6 „Lüftung von Wohnungen Anforderungen, Ausführung, Abnahme“ und die DIN EN 13779 „Lüftung von Nichtwohngebäuden- Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlage und Raumkühlsysteme“. Für die Ausführung gilt die Norm mit dem jeweils höheren Anspruch an die Komponente.

Zur Einhaltung der Anforderungen an die Hygiene gibt die VDI 6022/1 regelmäßige und verschiedene Überprüfungsverfahren vor. Ein Verfahren sind unter anderem Hygienekontrollen, welche durch Fachpersonal durchgeführt werden. Sie beinhalten u.a. eine Sichtprüfung der Anlage und eine mikrobiologische Prüfung. Alle Hygienekontrollen sind zu dokumentieren und mindestens sechs Monate zu archivieren. Zusätzlich zu diesen Kontrollen werden in bestimmten Intervallen Hygieneinspektionen durchgeführt. Das Besondere an dieser Richtlinie ist, dass sie weiterhin einen kompletten Leitfaden bezüglich der Wartung vorgibt. Instandhaltungsmaßnahmen für die jeweiligen Komponenten und Zeitintervalle sind dort aufgeführt. Die Inspektion und Sichtkontrolle der Lüftungsleitungen erfolgt durch Revisionsöffnungen oder durch Befahrung mit einer Kamera an repräsentativen Stellen. Bei relativ kleinen Dimensionen und Querschnitten verwendet man zur Reinigung Bürsten und Druckluftsysteme, bei großen Querschnitten werden Roboter eingesetzt oder man reinigt die Anlage manuell durch das sogenannte „Bekriechen“.



Bild 57: Beispiel eines verschmutzten Luftkanals <sup>35</sup>

Neben dem Aspekt der Hygiene ist ein weiteres wesentliches Kriterium aus der Sicht eines Anlagenbetreibers die Energieeffizienz einer RLT-Anlage. Abgesehen von den kapital- und betriebsgebundenen Kosten stellen die bedarfsgebundenen Kosten einen wesentlichen Teil der Gesamtkosten eines raumluftechnischen Systems dar. Sind also Luftleitungen verschmutzt (Bild 57) oder Ventilatoren und Filter infolge von Staub- und Schmutzansammlungen verstopft, wird die Lüftungsleistung beeinträchtigt. Die Verschmutzungen bewirken Reibungswiderstände und somit einen Druckabfall. Durch die erzeugten Druckverluste

<sup>32</sup> VDI 6022/1 „Hygiene- Anforderungen an Raumluftechnische Anlagen und Geräte“

<sup>33</sup> VDI 6022/2 „Hygienische Anforderungen an Raumluftechnische Anlagen- Anforderungen an Hygieneschulung“

<sup>34</sup> VDI 6022/3 „Hygienische Anforderungen an Raumluftechnische Anlagen in Gewerbe- und Produktionsbetrieben“

<sup>35</sup> Quelle: <http://www.boesch-buersten.ch/files/BXMediaPlusMasterImage2621file.jpg>

muss zum Ausgleich die Leistung der Ventilatoren hochgefahren werden, was zu einem erhöhten Stromverbrauch und ggf. mehr Geräusentwicklung der Aggregate führt. Die Sicherstellung eines hohen Wirkungsgrades anhand von regelmäßigen Reinigungen und Wartungen ist eine entscheidende Größe für die energieeffiziente Nutzung einer RLT-Anlage.

### 6.5.2 Bauliche Problembereiche und Grenzwerte in Lüftungsleitungen

Problembereiche in einem RLT-System stellen also jene Bereiche dar, an welche Schmutz und Feuchtigkeit herankommt. Im Allgemeinen sind das Außenluftansaugungen, Filter und besonders Befeuchter oder Luftwäscher. Für Lüftungsleitungen, insbesondere die Zuluftleitungen, gelten Umlenkungen und Ecken als problematisch, da es dort zu einer vermehrten Staubablagerung kommen kann. Auch in den Teilen der Anlage, in denen die Luftgeschwindigkeit nicht mehr ausreichend hoch ist, um Sedimente abzutragen, kommt es zu Anreicherungen. Weiterhin sind alle Stellen, an denen dauerhaft Tauwasser anfallen kann, als besonderes Gefahrenpotential anzusehen. Dies betrifft z.B. außerhalb laufende und nicht oder unzureichend wärmegeämmte Zuluftleitungen.

RLT-Anlagen sind so zu betreiben, dass mikrobiologisches Wachstum vermieden wird. Daraus leiten sich bestimmte kritische Werte ab, die einzuhalten sind und als Kenngrößen für RFID-Sensortransponder dienen können. So z.B. gibt die *VDI 6022/3* vor:

- Die relative Luftfeuchte in Filtern und Schalldämpfern darf einen Wert von 90% nicht überschreiten.
- An Außenluftfiltern darf die durchschnittliche Luftfeuchte innerhalb von drei Tagen nicht höher als 80% sein.
- Eine Anlage darf keine dauerhaften Feuchteniederschläge aufweisen.
- Luftleitungen müssen „besenrein“ sein. Je nach Standard darf aber eine Staubkonzentration von 10g/m<sup>2</sup> nicht überschritten werden.

Die *VDI 3803* schreibt vor:

- Im gesamten Luftleitungsbereich ist die relative Luftfeuchte auf maximal 90% zu begrenzen.
- Eine Taupunktunterschreitung ist grundsätzlich zu vermeiden.

In der *DIN 1946/2* heißt es weiterhin:

- In Lüftungsleitungen welche sich hinter einem Luftbefeuchter befinden, darf kein Niederschlag sein.

### 6.5.3 Verwendete RFID- Technik

In diesem Abschnitt werden die RFID-Sensortransponder und Komponenten vorgestellt und erläutert, welche bei den jeweiligen Untersuchungen an Lüftungsleitungen zum Einsatz gekommen sind. Da bereits im Kapitel 3.5 und 4 die für die Bautechnik geeignete „RFID- Technik“ allgemein beschrieben wurde, werden im Folgenden lediglich ergänzende Informationen und Funktionsweisen der Systeme gegeben.

#### 6.5.3.1 RFID- Sensornetz als UHF- System mit externem Sensor

Ein wichtiger Bestandteil des Systems ist der externe Betauungssensor zur Erkennung von hoher Luftfeuchte und Betauung. Das Messprinzip basiert auf einem resistiven Sensor mit einem Mikrocontroller, der eine wechsellspannungsmäßige Impedanzmessung mit einer max. Auswertespannung von < 0,8 Vpp  $\approx$  zulässt. Der Einsatzbereich des Sensors liegt zwischen 0 % und 100 % relativer Feuchte (d.h. tauwasserfest) und zwischen 0 °C und 60 °C Medientemperatur (weiteres siehe Datenblatt Kap. 10.5.2).

Dieser externe Sensor wird an das schon in Kap. 3 und 4.3 beschriebene aktive IMS-Sensornetz-System angeschlossen, das im Funkfrequenzband von 2,4 GHz arbeitet und somit für große Lesereichweiten und Bauteile mit metallischen Materialien geeignet ist.

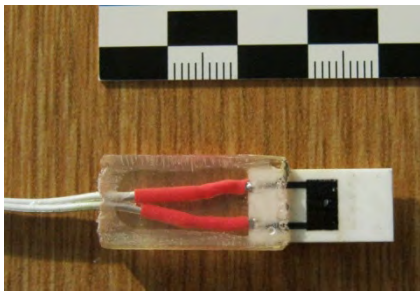


Bild 58: Betauungssensor mit Anschlussleitung zum RFID-Transponder-System

Wie in Bild 59 dargestellt, besteht das Funksystem aus einer „Basisstation“ d.h. dem Empfänger, den einzelnen Sensorknoten (Sender) und den angeschlossenen externen Sensoren. Der Sensorknoten enthält zusätzlich interne Sensoren, um die Temperatur, die Feuchte und die Lichtstärke (modellabhängig) im Kästchen selbst zu messen.

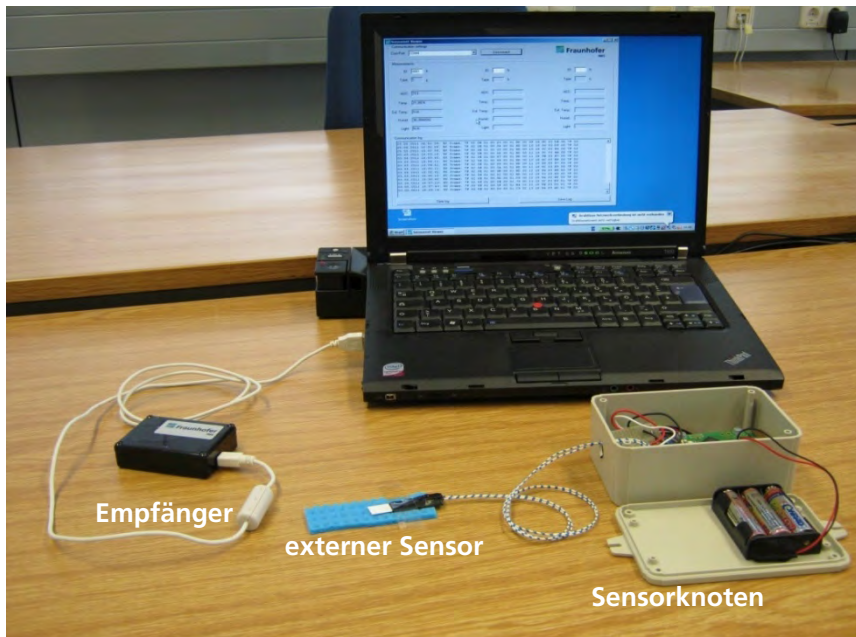


Bild 59: Sensornetz aus Empfänger, Sensorknoten mit Sensoren und Laptop-Rechner.

Der Sensorknoten verfügt am Gehäuse über eine IP68 Steckverbindung. Dadurch können weitere externe Sensoren, in diesem Fall die SHS-A3-Sensoren, angebunden werden. Die Energieversorgung wird über die angeschlossenen Batterien, Typ Mignon, AA/ LR6/ AM-3, im Clip sichergestellt. Nach Aktivierung sendet jeder Sensorknoten das Datentelegramm an die Basisstation, die es dann mittels einer USB-Verbindung an den PC, Laptop oder Smartphone überträgt. Mit Hilfe der Software „Sensornet Viewer“ werden die Telegramme von bis zu drei Sensorknoten aufgezeichnet und können im Anschluss ausgewertet werden. Zunächst werden 30 Telegramme alle 30 Sekunden lang an die Basisstation gesendet. Danach reduziert sich die Übertragung auf alle 30 Minuten. Für z. B. Verbindungstests kann jedoch der Aktivierungsknopf/ Taster am Knoten erneut gedrückt werden, dadurch wird unmittelbar ein Telegramm gesendet und das Intervall beginnt erneut. Die Einstellung eines solchen Intervalls sorgt für einen stromsparenden Betrieb und ist für derarti-



ge Anwendungen absolut ausreichend. Da sich die Hygienezustände nicht kurzfristig verändern, ist es nicht notwendig, die Messwerte in einem kürzeren Abstand zu senden. Zudem führt das Einsparen an Energie wiederum zu einer längeren Lebensdauer der Batterie. Die Funktion des Sensornetzes wird durch die Nutzung der „SensorNet Viewer“-Software überprüft. Die eindeutige ID eines Sensorknotens wird in das gekennzeichnete Feld 1 eingetragen,

Bild 60. So können alle Messwerte dem richtigen Knoten zugeordnet werden. Nach dem Log-in und der Verbindung zwischen Empfänger und Sender werden alle Ereignisse mit Datum und Uhrzeit im unteren Feld 2 festgehalten. Die aufgenommenen Messwerte des internen Sensors werden aus den gesendeten Informationen der Telegramme errechnet und in den darüberstehenden Feldern 3 dokumentiert. Die Messwerte angeschlossener externer Sensoren werden als sog. ADC-Werte (Analog-Digital-Converter) ausgegeben und in Feld 4 dargestellt. Mit Hilfe der Batteriespannung wird dieser ADC-Wert in Bit gemessen. Der Analog-Digital-Wandler (ADC) wandelt eine elektrische Spannung in eine Digitalzahl um. Im Allgemeinen wird dabei die Messspannung mit einer Referenzspannung verglichen. Der ausgegebene Wert drückt demnach das proportionale Verhältnis beider Spannungen aus und gibt in diesem Fall den Bezugswert für die relative Feuchte in Prozent an. Diese Telegramme werden in ein „Ausleseformular“ weitergegeben, in dem der gemessene ADC-Wert in die entsprechende relative Feuchte umgerechnet wird.

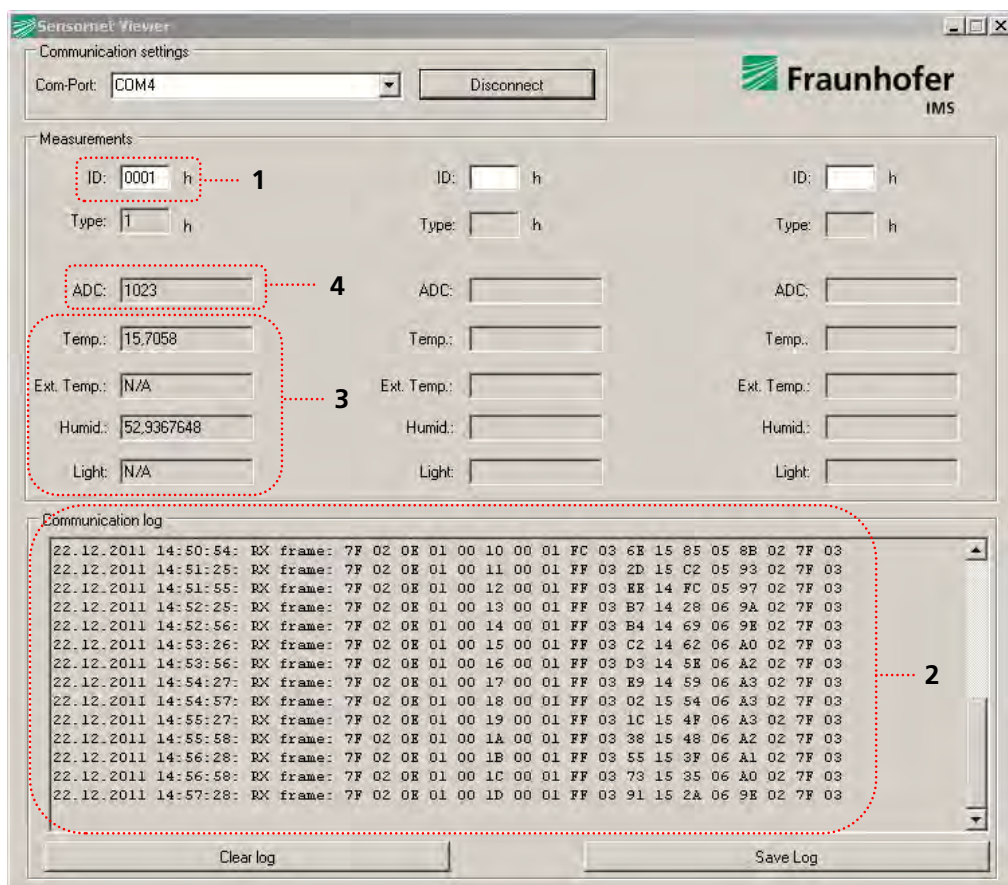


Bild 60 : Beispiel der Messwert-Erfassung mit externem LF-Feuchtesensor ID-0001 und der Software "SensorNet Viewer"



### 6.5.3.2 RFID- LF- System zur Feuchtemessung

Ein weiterer Bestandteil der im Projektteil „Hygiene“ verwendeten RFID-Technik sind die passiven LF-Feuchtetransponder (siehe Kap. 4.1.3) mit dem zugehörigen IMS-Reader mit Handantenne (siehe Kap. 4.2.1 und Bild 27). Über die im Lesegerät gespeicherte Software kann der Lesevorgang gestartet und die Messwerte auf dem Display abgelesen und im internen Speicher dokumentiert werden. Abzulesen sind das Datum, die Uhrzeit, Temperatur, Ident- Nummer des Transponders sowie die relative Feuchte in Prozent. Neben der Datenverwaltung sind im Lesegerät die Messintervallzeit und die Art der Messung (Einzelmessung aus mehreren Kurzabfragen, Dauermessung mit Grafikanzeige oder Schnellmessung) einstellbar.

### 6.5.3.3 Versuchsanlagen

Um sowohl die Anwendung und Funktionalität bei Luftleitungen zu überprüfen als auch das Verhalten der RFID- Sensor-Technik unter simulierten Bedingungen und kritischen Zuständen zu analysieren, wurden für Untersuchungen unter Laborbedingungen mehrere Versuchsanlagen genutzt. Unter anderem wurde ein Modell-Versuchsstand gebaut (Bild 61). Dieser besteht aus einem geschlossenen Luftkanalsystem aus Flachkanälen (1), Rohr aus Kunststoff mit eingebautem Ventilator mit einer Förderleistung von 80 m<sup>3</sup>/h (2). Alternativ lässt sich der Ventilator an einen Regeltrafo (3) anschließen, um die Leistung des Ventilators und damit die Luftgeschwindigkeit zu drosseln. Um Zugriff auf das Innere des Kanalsystems zu bekommen, um beispielsweise dort die Sensoren (6) etc. anzubringen, aber auch um Sichtkontakt während der Versuche zu haben, wurden die anderen Kanalelemente mit kleinen Aussparungen als Revisionsöffnung (4) versehen und mit einer PMMA-Platte und Dichtungen luftdicht verschlossen. Sie sind so befestigt, dass sie sich mit einfachen Handgriffen öffnen und schließen lassen.

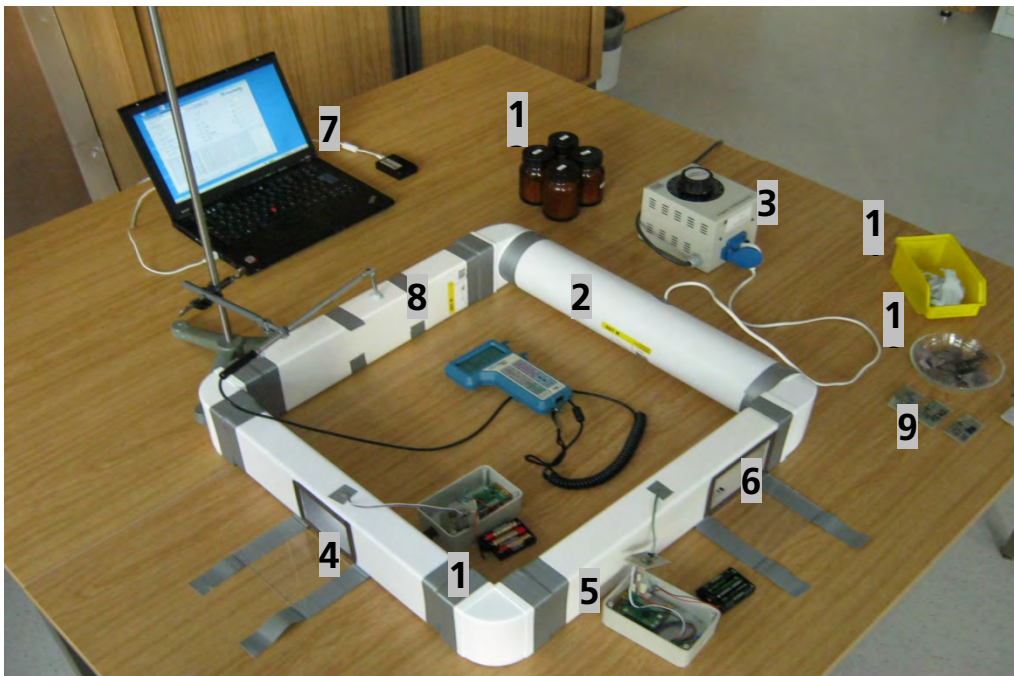


Bild 61: Versuchsanlage Luftkanal mit RFID-Sensor-Technik

Für Untersuchungen unter realen Bedingungen wurde auf die ständig im Betrieb befindliche Lüftungsanlage des Fraunhofer Institutes vor Ort zurückgegriffen. Die Untersuchungen der Sensor-Transponder im Lüftungskanal sind im zweiten Obergeschoss des Gips-Schüle-Gebäudes IBP durchgeführt worden. Die Verteilerleitung und Einzelanbindungen

im zweiten Obergeschoss bestehen teilweise aus Stahlblech und Wickelfalzrohr und sind gut geeignet, um kleinere Installationen und minimalinvasive Maßnahmen durchzuführen, wie beispielsweise die nachträgliche Integration des RFID- Systems in die Lüftungsrohre. So konnten Zuluftparameter bestimmt, das Sensorverhalten beobachtet und die Sende- und Empfangsreichweite untersucht werden. Die Zuluft wird über Tellerventile in den Raum eingebracht. Alle Kanäle und Rohre befinden sich in einer durch Metallpaneele abgedeckten Zwischendecke. Auch die Lüftungsleitungen der RLT-Zentrale im Technikraum im Untergeschoss des zweistöckigen Gebäudes konnte zu Testzwecken genutzt werden.

#### 6.5.4 Demonstrator Hygiene, Lüftungsleitungen

Mit Hilfe eines einfachen Demonstrators soll die Funktionsweise der RFID- Sensortechnik verdeutlicht, die Anwendung in der Praxis aufgezeigt und verschiedene Szenarien dargestellt werden. Dazu dient ein Modell im Maßstab 1:1, um durch eigene Handhabung die Funktion der RFID-Sensortransponder erkennbar zu machen und dem Anwender gleichzeitig den Mehrnutzen der RFID- Technologie zu präsentieren. Weiterhin kann damit bei Messen und Veranstaltungen sowie bei Workshops die Anwendungsmöglichkeit im Teilprojekt „Hygiene“ gezeigt und visualisiert werden, um Anregungen für weiterführende Diskussionen zu geben. Im Demonstrator sind sowohl das RFID-LF-System als auch das RFID-UHF-System integriert, um damit die Anwendung zur Messung der für die Hygiene wichtigen Parameter wie Feuchte, Tauwasser und Staub/ Schmutz demonstrieren zu können. Auch die Auslesbarkeit der RFID-Sensoren durch verschiedene Werkstoffe hindurch lässt sich vorführen.

Das Modell wurde kompakt und transportfähig in einer Box aus Metall mit den äußeren Abmessungen (L x B x H) 43 cm x 34 cm x 23 cm aufgebaut und enthält die wesentlichen Komponenten (siehe Bild 62).



Bild 62: Demonstrator zur Präsentation der RFID-Sensortechnik bei RLT-Anlagen

#### LF-Feuchte-Demonstrator

Der am Demonstrator eingesetzte LF-Feuchte- und Temperatur-Sensor ist in unterschiedlichen feuchten Baustoffen integrierbar und soll neben den Feuchte- und Temperaturmessungen die Möglichkeiten der Auslesbarkeit des RFID-Sensors verdeutlichen. Zu diesem Zweck kann der Sensor mit verschiedenen Werkstoffen (z.B. Holz- und Stahlblechplatte, Glasscheibe) bedeckt und dann mit dem Reader ausgelesen werden. Zur Veranschaulichung kann ebenfalls der Aluminiumdeckel der Box geschlossen und der Sensor von außen im Abstand von einigen cm ausgelesen werden. Da der Sensor bis auf das Stahlblech durch alle vorhandenen Werkstoffe hindurch ausgelesen werden kann, sind somit die Grenzen und Möglichkeiten dieser Technologie einfach und anschaulich zu zeigen.

### **UHF-Sensornetz-Demonstrator mit externem Feuchtesensor**

Die Auslesbarkeit über große Entfernungen und durch Wände hindurch wird im direkten Vergleich mit dem UHF-Sensornetz-System dargestellt. Ein Sensorknoten kann in der geschlossenen Box bleiben, während sich der Empfänger und die Basisstation weiter entfernt befinden. Die Lüftungsleitung aus Kunststoff soll dabei helfen, weitere Szenarien darzustellen und Anwendungen aufzuzeigen. Da es im Rahmen von Veranstaltungen und Messen kaum möglich ist, die Luftfeuchte in einem Modell ständig zu variieren und so das Verhalten der Sensoren zu demonstrieren, wird der externe Sensor SHS-A3 mit unterschiedlich feuchtem Kanalbelag beaufschlagt. Je nach Feuchtegehalt variiert der Messwert aus dem Sensor und kann in der Auswertesoftware auf dem PC-Bildschirm sichtbar gemacht werden. Die Veränderung des Feuchtegehalts im Lüftungskanal und eine Überschreitung der kritischen Werte lässt sich so anschaulich darstellen und anhand einer Alarmmeldung durch einen Soll-Ist-Vergleich für externe Nutzer verständlich machen.

### **6.5.5 Fazit und Ausblick für Lüftungsleitungen**

Belüftungs- und Entlüftungsanlagen sind in energieeffizienten Gebäuden mit luftdichteren Fenstern und Fassaden in der heutigen Zeit vielfach anzutreffen. Vom einfachen Privathaushalt über große Bürogebäude bis hin zur Klimatisierung von Versammlungsstätten, Kliniken u.a. Funktionsbauten - die Luft ist in Analogie zum Trinkwasser als wichtigstes Lebensmittel anzusehen und auch dementsprechend zu behandeln. Neben den gesundheitlichen Auswirkungen auf den Menschen bei mangelnder Lüfthygiene kann der leichtfertige Umgang bei Wartungs- und Reinigungsarbeiten auch rechtliche Konsequenzen nach sich ziehen. Eine automatische Überprüfung hygienischer Zustände in Lüftungsleitungen unter Nutzung der RFID-Sensor-Technik sowie eine sich daraus ergebende Möglichkeit der Optimierung von Wartungs- und Instandhaltungsprozessen führen zu einer verbesserten Qualität des Wohnens und Arbeitens.

Die Untersuchungen im Teilprojekt Hygiene/Lüftung konnten zeigen, inwieweit es mit Hilfe der RFID-Sensortechnik möglich ist, Missstände zu erfassen und Ansätze für eine künftige Nutzung mit kommerzielleren Sensortranspondern liefern. Die Versuche haben ergeben, dass es möglich ist, die hygienisch notwendigen Parameter wie Feuchte, Schmutz und Temperatur anhand von verschiedenen RFID-Kontrollsystemen auszulesen, auszuwerten und auch zu überwachen. Neben der manuellen Kontrolle, dem Auslesen der Sensortransponder durch mobile Handlesegeräte, besteht auch die Möglichkeit, die Messwerte der Sensoren über ein funkbasiertes Sensornetzwerk zu erfassen und dem Endnutzer über eine Basisstation am PC direkt zur Verfügung zu stellen. In den Untersuchungen mit den Prototyp-Bauteilen und -Sensoren konnte festgestellt werden, dass die Systeme und das messtechnische Verhalten der externen Sensorik den bauüblichen Witterungs- und Umgebungsbedingungen noch nicht genügt. Eine Optimierung der Hardware und Auswertesoftware ist für eine Anwendung im Gebäudebetrieb zusammen mit den Geräteherstellern notwendig. Die theoretischen Untersuchungen zeigten verschiedene Anwendungspotentiale zur Integration in die Anlagenwartung über das Facility Management. Dabei stellte sich als eins der wichtigsten Kriterien zur effizienten Nutzung der Technik heraus, Schnittstellen für die Anbindung in die Gebäudeleittechnik anzupassen und das universelle Kommunikationsprotokoll BACnet zu nutzen, um die Messwerte aus der Feldebene in die Managementebene zu transferieren und die Informationen dem Entscheidungsträger individuell und benutzerfreundlich zur Verfügung zu stellen. Nur durch so eine Visualisierung kritischer Messwerte wie z.B. einem einfachen Ampelsystem, kann sofort reagiert und damit Lüftungsleitungen mit allen dazugehörigen Komponenten in hygienisch einwandfreiem Zustand betrieben werden.

## 6.6 Anwendung Sicherheit, Holzbauteile

Durch die zunehmenden Anforderungen an die Tragfähigkeit, Dauerhaftigkeit und somit Nachhaltigkeit von Gebäuden, spielt die fortlaufende Überwachung von einzelnen Konstruktionen oder ganzen Bauwerken eine immer größere Rolle. Beispiele für sensible Bauteile, welche hohen Anforderungen genügen müssen, sind Dächer. Vor allem Flachdächer gehören zu den wohl am stärksten beanspruchten Teilen eines Bauwerkes, da sie in besonderem Maße Umwelteinflüssen ausgesetzt sind. Durch eindringende Feuchtigkeit oder Tauwasserbildung im Inneren von Bauteilen, verursacht z.B. durch Planungsfehler, mangelhafte Bauausführung, Alterung bei Dampfbremsen oder Dichtstoffen, wird die Funktionsfähigkeit der Konstruktion eingeschränkt. Die Dämmwirkung wird beeinträchtigt, die Ansiedlung von Pilzen und Algen begünstigt und die Funktionssicherheit des Bauwerkes auf Dauer reduziert. Die häufigste Schadensursache an Holzkonstruktionen ist jedoch die Feuchtebelastung durch Konvektion. Hierbei dringt feuchte Raumluft durch Undichtheiten in der Dampfbremse oder Dampfsperre in die Konstruktion ein und taut, sobald der Sättigungspunkt an der kälteren Oberfläche erreicht ist. Es kommt zum Tauwasserausfall und somit zur Schädigung des Bauteils. Solche Feuchteschäden sind im Entstehungsstadium meist nicht erkennbar, entwickeln sich aber mit gravierenden Folgen bis hin zu einer dauerhaften Schädigung der Bausubstanz. Um diese Gefahr für den Menschen abzuwenden, erscheint eine Überwachung und Lokalisierung des Feuchtewertes, gerade an unzugänglichen, kritischen Stellen in der Konstruktion, sinnvoll. So könnte dann durch eine automatisierte Mitteilung an den Nutzer oder Gebäudebetreuer eine unverzügliche Überprüfung veranlasst werden.

Um einen Feuchteintritt durch eine defekte oberseitige Dachabdichtung schnell orten und beheben zu können, bieten Unternehmen vollautomatische Leckmeldeanlagen<sup>36</sup> für Flachdächer an. Hierbei wird eine dünne Sensorlage aus leitfähigem Glasvlies unterhalb der Abdichtung angebracht. Über ein Raster von Messsensoren ist diese Schicht mit einem computergesteuerten Auswertesystem verbunden. Die Sensoren registrieren eine Spannungserhöhung bei eindringender Feuchte, was dann auf dem virtuellen Grundriss des Daches dargestellt wird. Wartungsintervalle oder andere benutzerspezifische Daten können, anders als bei der RFID-Technik, nicht im System aufgenommen und am Bauteil gespeichert werden. Außerdem bringt das Verlegen solcher aufwendiger Elektroinstallationen einen zusätzlichen Kostenaufwand mit sich.

Durch RFID-Sensortransponder lassen sich an beliebigen Stellen die Temperatur und Feuchtigkeit per Funkverbindung überwachen, eine Verkabelung ist somit nicht mehr notwendig. Doch anders als bei dem Leckmeldesystem kann diese Technik auch auftretendes Tauwasser in der Konstruktion wahrnehmen. Somit ist ein Schutz des Bauwerks auch bei einer eventuellen Feuchtebelastung von innen möglich. Darüber hinaus lassen sich die verwendeten Materialkennwerte sowie die Ergebnisse der augenscheinlichen Kontrollen oder Inspektionen von Fachingenieuren vor Ort direkt auf dem RFID-Tag des Bauteils speichern und sind bei Bedarf jeder Zeit abrufbar. Ein nachträgliches Hinzufügen von Daten oder Wartungsprotokollen ist so problemlos möglich (siehe auch Kap.6.7.2). Aber auch ohne direkte Feuchteeinwirkung stellt sich unterhalb des Material sättigungsreiches ein Gleichgewicht zwischen Temperatur und relativer Feuchte der umgebenden

<sup>36</sup> Z.B.: „Smartex“ von Progeo Monitoring GmbH, Online im Internet <http://www.progeo.com>  
oder „Sensor DDS“ von Sensor Dichtungs-Kontroll-GmbH, Online im Internet <http://www.sensor-dks.com>

Luft und der Holzfeuchte ein. Vor allem bei offenen Konstruktionen wie Hallendächer oder Holzbrücken ist die Tauwassertropfenbildung an der Unterseite von Bauteilen z.B. bedingt durch die Abstrahlung der Eisfläche oder des Nachthimmels (siehe Bild 63).



Bild 63: Tropfenbildung in einer Eishalle auf der Unterseite eines Hallenbinders<sup>37</sup>

Um weiterführende Aussagen über eine Anwendung der RFID-Sensor-Systeme in Holzbaukonstruktionen machen zu können sollen folgenden Fragestellungen untersucht werden:

- Welche Reichweite besitzt ein Sensor-Funktransponder und durch welche Materialien wird sie beeinflusst?
- Welchen Einfluss hat die Kabellänge auf das Messverhalten der externen Sensoren und in wie fern wird ein Messwert durch Materialrückstände auf der Sensoroberfläche beeinträchtigt?
- Welche Position und welche Art der Befestigung der Sensoren eignen sich am besten zur Messung der Holzfeuchte in einer Konstruktion?

Bei diesen Versuchen wurden RFID-Sensornetz-Systeme mit externen Feuchtesensoren im GHz-Funkfrequenzbereich verwendet, wie zuvor in Kap. 6.5.3 beschrieben.

### 6.6.1 Untersuchungen an Testaufbauten zu Feuchtesensoren

Die Kabellänge der externen Feuchtesensoren SHS-A3 (Kap. 10.5.2) lag bei allen bisher durchgeführten Versuchen im Durchschnitt bei ca. 0,25 m. Dies resultiert aus der Voraussetzung, dass zwischen externem Sensor und Sensorknoten genügend Abstand besteht, um die Sensoren an repräsentativen Schwachstellen in Holzkonstruktionen anbringen zu können. Zur Überprüfung des Einflusses auf den Messwert wurde daher bei einigen Sensoren die Länge der Anschlussleitung variiert. Auch bei einer Länge von ca. 1,00 m konnte keine Veränderung festgestellt werden; noch längere Anschlussleitungen erscheinen nicht notwendig.

Bei weiteren Tests wurde überprüft, ob Materialablagerungen auf der Polymerschicht der Sensoroberfläche die Messwerte der Sensoren beeinflussen. Dies erfolgte unter praxisnahen, jedoch definierten Randbedingungen im Exsikkator bei unterschiedlichen Luftfeuchten (u.a. bei 90 % r.F.). Die Sensoren wurden über den Innenwiderstand kalibriert und die Oberflächen mit unterschiedlichen Materialien wie Staub, Holzfasern oder Mineralwolle

<sup>37</sup> aus: Güldenpfennig, J. et al., Zur Feuchteproblematik in Eissporthallen, Bautechnik, 87. Auflage, 2010, S. 133-138, Online im Internet <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bate.201010011/pdf> [22.06.2012]



präpariert. Die Messung dauerten mindestens 10 Stunden, wurden dreimal durchgeführt und anschließend ein Mittelwert aus den Ergebnissen gebildet. Das Beispiel der Messung mit Rückständen von Holzspänen ist in Bild 64 dargestellt. Der Feuchtegehalt im Testvolumen wird durch den ADC-Wert dargestellt. Dieser lag bei dem mit Holzspänen präparierten Sensor zu Beginn der Messungen unter dem des sauberen Sensors. Dieses Verhalten ist dadurch zu erklären, dass die Holzfasern die Sensoroberfläche vollständig abdeckten. Erst nach einem Feuchteausgleich der Sägespäne mit der Luftfeuchte im Exsikkator registrierte der präparierte Sensor den korrekten Wert von ca. 90 %. Es zeigte sich, dass nach dem Herausnehmen der Sensoren aus dem Exsikkator der präparierte Sensor wieder etwas träger auf eine Änderung der Luftfeuchte reagierte, jedoch keine weiteren Beeinträchtigungen der Messwerte festzustellen war.

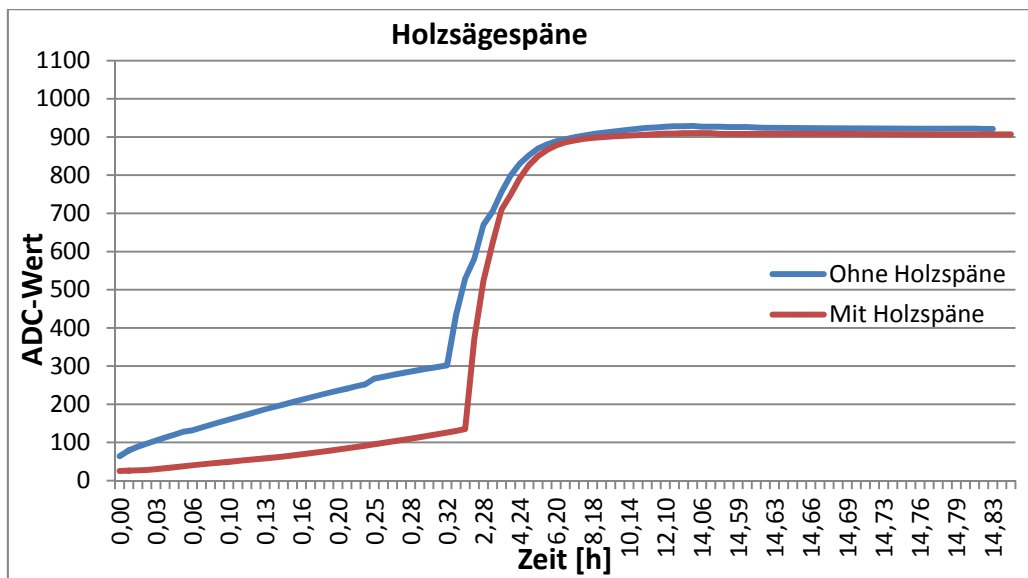


Bild 64: Ergebnis der Versuche mit Holzfasern oder Sägespänen

Die Untersuchungen der präparierten SHS-A3 Feuchtesensoren verfolgten das Ziel, sowohl die Funktionalität und das messtechnische Verhalten, als auch die Praxistauglichkeit der Sensoren zu überprüfen. Die verschiedenen Ablagerungen wirkten sich dabei unterschiedlich stark auf die Messwerte der Sensoren aus, wobei der Verlauf der Ergebnisse grundlegend den Erwartungen entsprach. Nur bei den Messungen der mit Mineralwolle-Rückständen präparierten Sensoren kam es zu Abweichungen durch das gelöste Phenolharz aus dem Dämmstoff. Dies veränderte die aktive Polymerschicht des Sensors und verursachte undefinierte Zustände im Messwert. Daraus ist zu folgern, dass die hier untersuchten Sensoren für den direkten Kontakt mit Mineralfaserdämmstoffe mit Phenolharz-Bindemitteln bei Tauwasseranfall ungeeignet sind. Als Lösungsmöglichkeit werden keramisches Sintermaterial oder Gewebevlies als Schutzfilter um den Sensor angeboten, die sich jedoch über den langen Zeitraum einer Bauteilüberwachung auch zusetzen können.

### 6.6.2 Test zur Funkreichweite in Deckensystemen

Zum Test der Praxistauglichkeit von RFID-Sensornetzen wurde die Auslesbarkeit der Sensortransponder im Gebäude und im Freifeld untersucht. Parameter waren dabei sowohl die Entfernung als auch der Einfluss von Bauteilen wie Wände oder Decken aus Stahlbeton zwischen Sender und Empfänger. Getestet wurden die IMS-Sensortransponder als Proto-

typ sowie die XBee-Sensortransponder als Serienbauteile (siehe Produktvergleich in Kap. 4.3 und Datenblatt in Kap. 10.5.4). Beide Systeme arbeiten im modifizierten „Ultra-High-Frequency“-Bereich von 2,4 GHz und unterscheiden sich vorrangig in ihrer Baugröße. Zum Test der Verbindungsreichweite im Freifeld wurden die Basisstationen in 10 m-Schritten von den Empfängern entfernt, später der Abstand auf ca. 5 m verringert. Hierbei war zu jeder Zeit die Sicht frei auf die Empfänger und die Entfernungen mit einem Lasergerät gemessen. Die Außenlufttemperatur betrug zum Zeitpunkt der Messung 15 °C und die Luftfeuchte lag bei ca. 57 %. Die Messungen ergaben, dass die von „Digi®“ angegebene maximale Funkreichweite der Transponder von 120 m nicht erreicht werden konnte. Bei dem durchgeführten Versuch konnten ab einer Entfernung von 62 m zwischen Basisstation und Transponder die Datenpakete nicht mehr regelmäßig empfangen werden. Dies wäre jedoch für eine zuverlässige Anwendung im Baubetrieb unerlässlich. Die Funkverbindung der IMS-Transponder hingegen war bis zu einer Entfernung von 74 m stabil. Die Funkreichweite der RFID-Technik im Freifeld ist sowohl von der Batteriespannung als auch von den Umgebungsbedingungen abhängig (u.a. Luftfeuchte und Vegetation). Neben den reichweitenbestimmenden Faktoren wie z.B. Antennenverstärkung und –ausrichtung muss ein weiterer physikalischer Effekt berücksichtigt werden: nicht nur die Sichtverbindung sondern auch die 1. Fresnellsche Zone. Dies ist ein gedachter Rotationsellipsoid zwischen den Antennen, der frei von Hindernissen sein muss<sup>38</sup>. Bei den oben genannten Parametern beträgt der maximale Radius des Ellipsoids etwa drei Meter, was bereits eine merkliche Dämpfung des Signals darstellt.

Zur Bestätigung der Lesereichweiten unter praxisnahen Bedingungen in Gebäuden fanden weitere Tests im Parkhaus und im GS-Gebäude des Fraunhofer IBP statt, um Einflüsse wie die von 22 cm dicken Betondecken und metallischen Gegenständen, wie Autos und Stahlstützen auf die Funkreichweite zu erfassen. Das Parkhaus hat fünf Parkebenen und ist in Stahlbetonbauweise (Parkebene 1 und 2) oder in Stahlbauweise (Ebene 3 und 4) mit einer Deckenhöhe von 2,40 m gebaut. Die Transponder wurden jeweils im Brüstungsbereich des Parkhauses auf dem Boden der einzelnen Stockwerke angebracht, die Position des Empfängers verändert und Messwerte aufgenommen. Die Tests im GS-Gebäude, ebenfalls in Stahlbetonbauweise, fanden auch über 4 Stockwerke in der Umgebung des Versorgungsschacht des Gebäudes auf den jeweiligen Stockwerken statt (Bild 65). Getrennt werden die Stockwerke jeweils durch ca. 20 cm dicke Geschossdecken aus Stahlbeton und dem darüber liegendem Fußbodenaufbau, womit sich ein Höhenunterschied von ca. 12,20 m zwischen den Sensormodulen ergab.

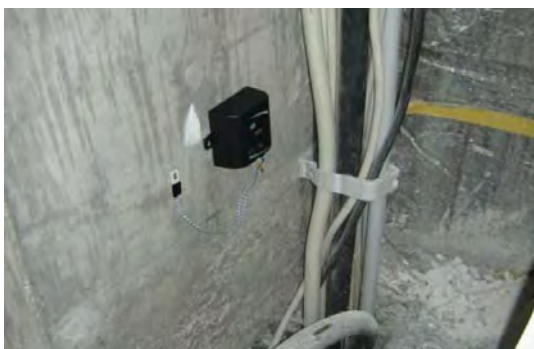


Bild 65: Platzierung eines XBee-Transponders im Versorgungsschacht

<sup>38</sup> Vgl. Jürgen Detlefsen, Uwe Siart: Grundlagen der Hochfrequenztechnik. Oldenbourg Verlag, München Wien 2006



Bei der ersten Messung wurde der Empfänger zunächst in der Technikzentrale im Untergeschoss des GS-Gebäudes platziert. Es folgten weitere Messungen im Bereich des Versorgungsschachtes auf jeder Stockwerksebene. Ergebnisse dazu sind exemplarisch in Tabelle 10 dargestellt. Dabei sind zunächst keine großen Unterschiede zwischen den IMS-Prototypen und den XBee-Serienmodellen erkennbar. Auffällig war dennoch, dass die Funkverbindung des IMS-Sensornetzes bei einigen Messpunkten etwas stabiler war als die der XBee-Module. Dies machte sich durch längere Wartezeiten beim Datenempfang bemerkbar.

Tabelle 10: Auswertung der Sensorreichweite im GS-Gebäude

Empfangsebene	Sendeebene	Entfernung [m]	Auslesbarkeit der Transponder	
			IMS	XBee
UG	UG	0,00	Ja	Ja
UG	EG	3,30	Ja	Ja
UG	1. OG	7,30	Ja	Ja
UG	2. OG	12,20	Nein	Nein
EG	UG	3,30	Ja	Ja
EG	EG	0,00	Ja	Ja
EG	1. OG	4,00	Ja	Ja
EG	2. OG	9,30	Nein	Nein
1. OG	UG	7,30	Ja	Ja
1. OG	EG	4,00	Ja	Ja
1. OG	1. OG	0,00	Ja	Ja
1. OG	2. OG	4,90	Ja	Nein
2. OG	UG	12,20	Nein	Nein
2. OG	EG	9,30	Nein	Nein
2. OG	1. OG	4,90	Ja	Ja
2. OG	2. OG	0,00	Ja	Ja

Um ausschließen zu können, dass eine Funkverbindung vorrangig durch den Versorgungsschacht stattfand, wurden weitere Messungen im Technikum des GS-Gebäudes vorgenommen. Dabei wurden zwei Transponder im 2. Obergeschoss über dem Technikum des Gebäudes angebracht. Die Empfangsstation befand sich auf dem Boden der Halle mit einer lichten Raumhöhe von 7,30 m. Es sollte die Positionierung der Transponder in einem massiven Hallenflachdach und die Anbringung der Empfänger in einem Technikraum in der Halle sowie im Untergeschoss der Halle simuliert werden.

Die Ergebnisse der Tests in Gebäuden mit praxisnaher Einbausituation haben gezeigt, dass es möglich ist, über drei Stockwerksetagen eine stabile und zuverlässige Funkverbindung aufzubauen. Sind Sender und Empfänger durch mehr als drei Vollgeschosse voneinander getrennt, ist ein Auslesen der Transponder nicht mehr möglich. Ziel muss es dennoch sein, Bauwerke jeglicher Art mit dieser Technik überwachen zu können. Demzufolge ist es zweckmäßig, die Sensortransponder über eine nahezu ungestörte Verbindung, wie z.B. in Versorgungsschächten oder Treppenhäuser, oder über Zwischenknoten (Transmitter) mit dem Empfänger zur Datenerfassung kommunizieren zu lassen. Bei einer Verwendung der RFID-Technik in Hallendächern, wo größere Deckenhöhen, aber keine Unterbrechungen

durch Stahlbetondecken o.ä. vorhanden sind, bewiesen die Versuche, dass ein Auslesen der Transponder problemlos möglich ist.

### 6.6.3 Test zur Sensorpositionierung in Holzbauteilen

Diese Versuche dienten zur Positionierung und Befestigung der externen Sensoren für die Bestimmung der Holzfeuchte mit RFID-Sensortranspondern. Hierbei war vor allem die Reproduzierbarkeit der Messwerte im Vordergrund, weshalb Bauteile und der Aufbau des Dach-Wand-Demonstrators verwendet wurden, siehe Bild 66.



Bild 66: RFID-Demonstrator mit Modellinstallationen an Holzdach und VIP-Wand.

Für die Tests wurden das Modell eines Holzdaches mit Sichtholzschalung und eine zeitgesteuerte Befeuchtungseinrichtung verwendet. Ein in die Oberseite der Latte gesägter Schlitz sorgte dafür, dass das Wasser an dieser Stelle tiefer in das Material eindrang und die Ergebnisse dadurch schneller signifikant ausfielen. Da die Holzlatte punktuell und über einen kurzen Zeitraum befeuchtet wurde, kamen je zwei Sensoren parallel zum Einsatz. Auf diese Weise sollte eine Dokumentation der Feuchtigkeit im gesamten Holzstück sichergestellt werden.

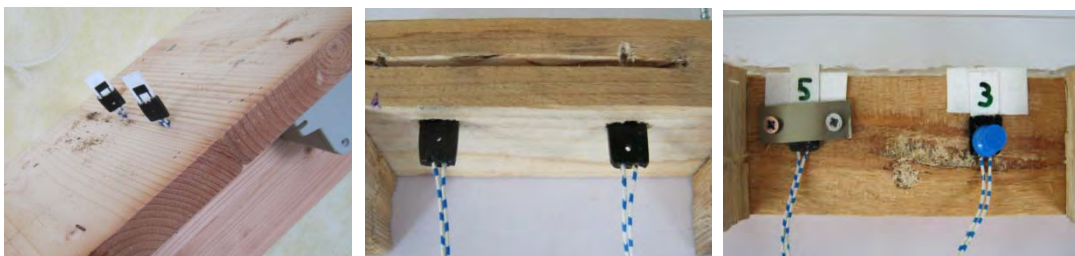


Bild 67: Test der Anbringung und Wirksamkeit externer Feuchtesensoren an Holzbauteilen (hier ohne Dämmung dargestellt)

Die auf der Innenseite des Dachmodells am Sparren befestigten Transponder nahmen alle 30 Minuten die Sensorwerte auf und sendeten diese drahtlos an die nachgeschaltete Basisstation. Ein Intervall zur Befeuchtung betrug z.B. 24 Stunden. Die Befeuchtungsdauer

innerhalb dieses Intervalls lag bei jeweils 30 Minuten. Um die durch Befeuchtung zu erwartende Wassermenge in einer realen Konstruktion pro Quadratmeter nachzustellen, wurden 5 ml Wasser innerhalb eines Befeuchtungszyklus auf die Holzlatte aufgebracht. Die Messdauer betrug jeweils 72 Stunden. Die nachfolgende Grafik zeigt ein Beispiel der gemessenen Holzfeuchte mit unterschiedlich befestigten Sensoren auf der Holzoberfläche. Wie aus der Grafik erkennbar ist, stellte sich beim ersten Befeuchtungsvorgang ein maximaler ADC-Wert von fast 1000 d.h. 100 % ein. Bei den weiteren Zyklen macht sich beim Sensor 3 bemerkbar, dass der Kontakt zum Holz unzureichend war. Beim Verdunstungsvorgang zeigten die Sensoren z.T. unterschiedliche Feuchtwerte an. Dennoch wird deutlich, dass das Holz mit der vorgegebenen Wasserbelastung bis auf unter 80 % r. F. trocknen konnte. Dies ist in etwa der Grenzzustand für die Luftfeuchte, bei der Schimmelpilzbildung einsetzt. Somit lässt sich durch diese Ergebnisse zeigen, dass die verwendeten RFID-Sensoren am Sensorknoten ausreichend sensibel reagiert, um Schadenspotenziale bei Holzbauteilen erfassen und bewerten zu können.

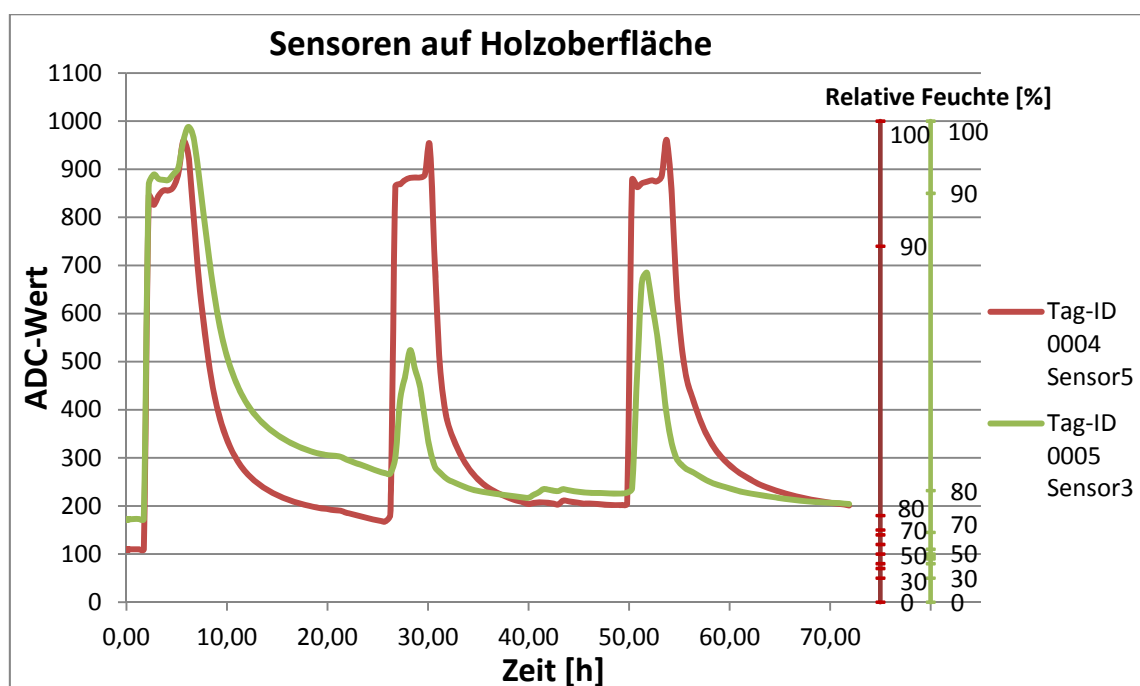


Bild 68: Ermittlung des Feuchtegehalts von Holz mit RFID-Sensoren.

Bei der Implementierung der Sensoren in die zu messenden Holzbauteile ist allerdings mit großer Sorgfalt zu arbeiten, da die Keramikträger der Feuchtesensoren in der getesteten Art (Prototyp) bruchempfindlich sind. In einer kommerzialisierten Lösung könnte eine variable Aufnahmehalterung für die Sensoren in Betracht kommen, die sich je nach Bedarf aus dem Sensornetzknotten schieben lässt. Mit Schrauben kann dann das Sensornetz-kästchen am Holzbauteil befestigt werden. Auf diese Weise wäre der Sensor vor Spritzwasser und mechanischen Kräfteeinwirkungen geschützt und eine einfache Montage für den Anwender sichergestellt. Dennoch ist ein nachträgliches Einbauen der Sensoren mit den IMS- oder XBee-Sensorknoten in Bestandsgebäude aus technischer Sicht einfach zu handhaben und ohne großen Aufwand möglich.

## 6.7 Integration der RFID- und Sensor-Daten in den Gebäudebetrieb

Die Integration der Sensor-RFID in die GA und die Bereitstellung der erfassten Daten ist abhängig von der Art des verwendeten RFID-Systems. Ein automatisiertes, funkbasiertes

System als Sensornetz mit einer hohen Lesereichweite ist dem manuellen Auslesen passiver Transponder mit einem Lesegerät im Nahfeld vorzuziehen. Dennoch spielt der Prozess der manuellen Messdatengewinnung in der Gesamtbetrachtung vor allem bei Wartungsvorgängen in Anlagenzentralen eine wichtige Rolle, da dort lokal der Zustand einzelner Transponder zu erfassen ist und die Gefahr der Datenüberlagerung aus mehreren nah beieinander befindlichen Transpondern groß ist. Dazu ist ein exemplarischer Datenverlauf zur Überwachung der Kontrollparameter in Lüftungsleitungen im nachfolgenden Flussdiagramm für beide Varianten grafisch dargestellt.

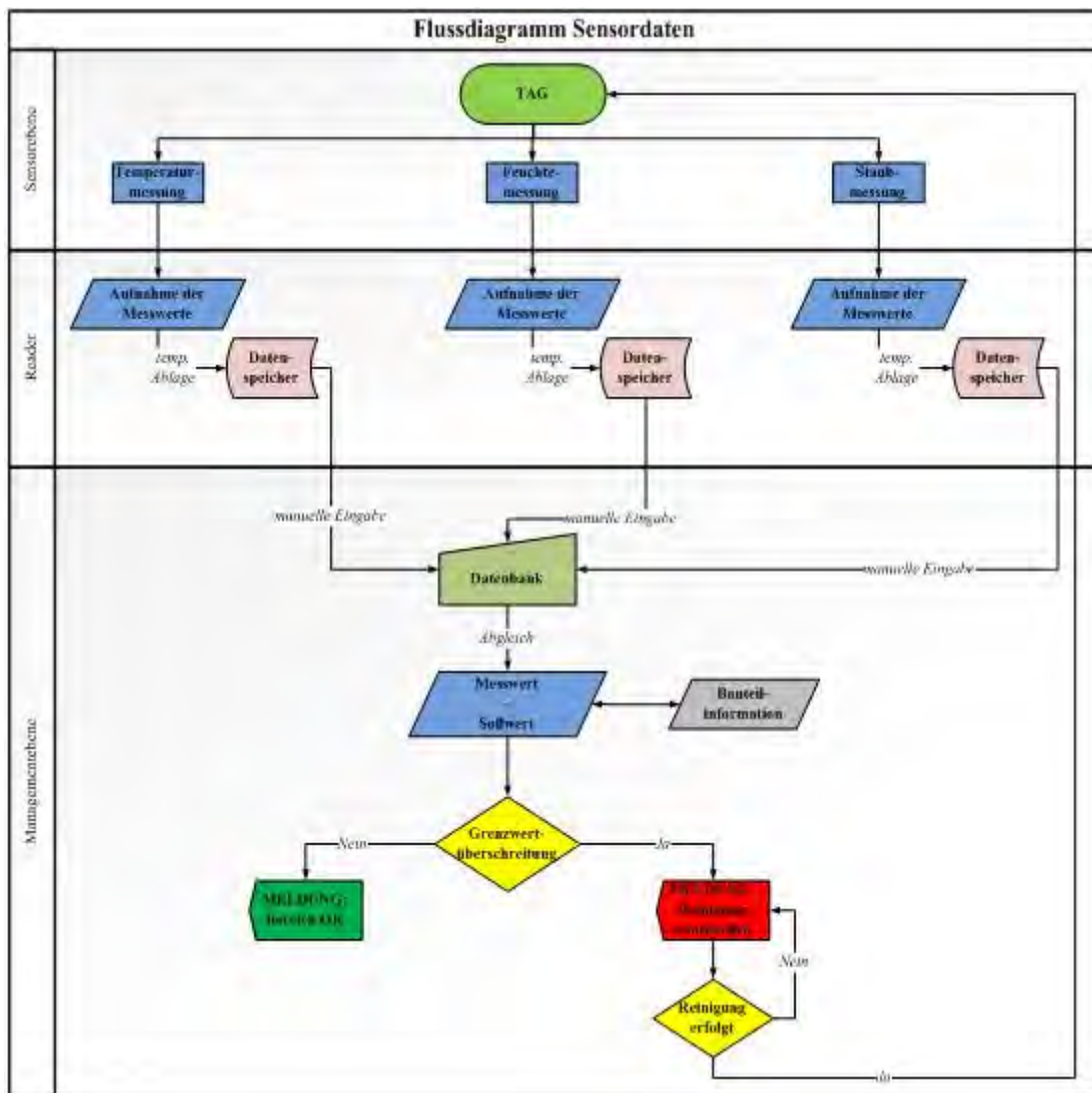


Bild 69: Datenverlauf bei **manuellem** Auslesen der Sensor-Transponder

**LF-Nahfeld-System:** Die installierten TAGs müssen manuell mit einem mobilen Hand-Lesegerät ausgelesen und die so gewonnenen Daten anschließend mit einer Datenbank in der Managementebene synchronisiert werden (Bild 69). Sollten Grenzparameter überschritten werden, zum Beispiel bei einem Anfall von Tauwasser in der Lüftungsleitung

oder einer Überschreitung der Staubkonzentration von z.B.  $10 \text{ mg/m}^2$  <sup>39</sup>, so kann dies der Nutzer in diesem Szenario erst nach dem Auslesen feststellen und anschließend beheben. Diese Form der Anwendung stellt zur herkömmlichen Überprüfung und Inspektion von Lüftungskanälen und RLT-Komponenten bereits eine erhebliche Prozessvereinfachung dar, dennoch ist das Auslesen jedes einzelnen Sensortransponders und die damit verbundenen Arbeitsschritte noch sehr zeitaufwändig.

**UHF-GHz-Fernfeld-System:** Optimiert werden kann dieser Prozess durch das bereits erwähnte System der Funkübertragung. Für einen direkten Vergleich wird diese Abfolge in der nachfolgenden Bild 70 ebenfalls als Flussdiagramm dargestellt.

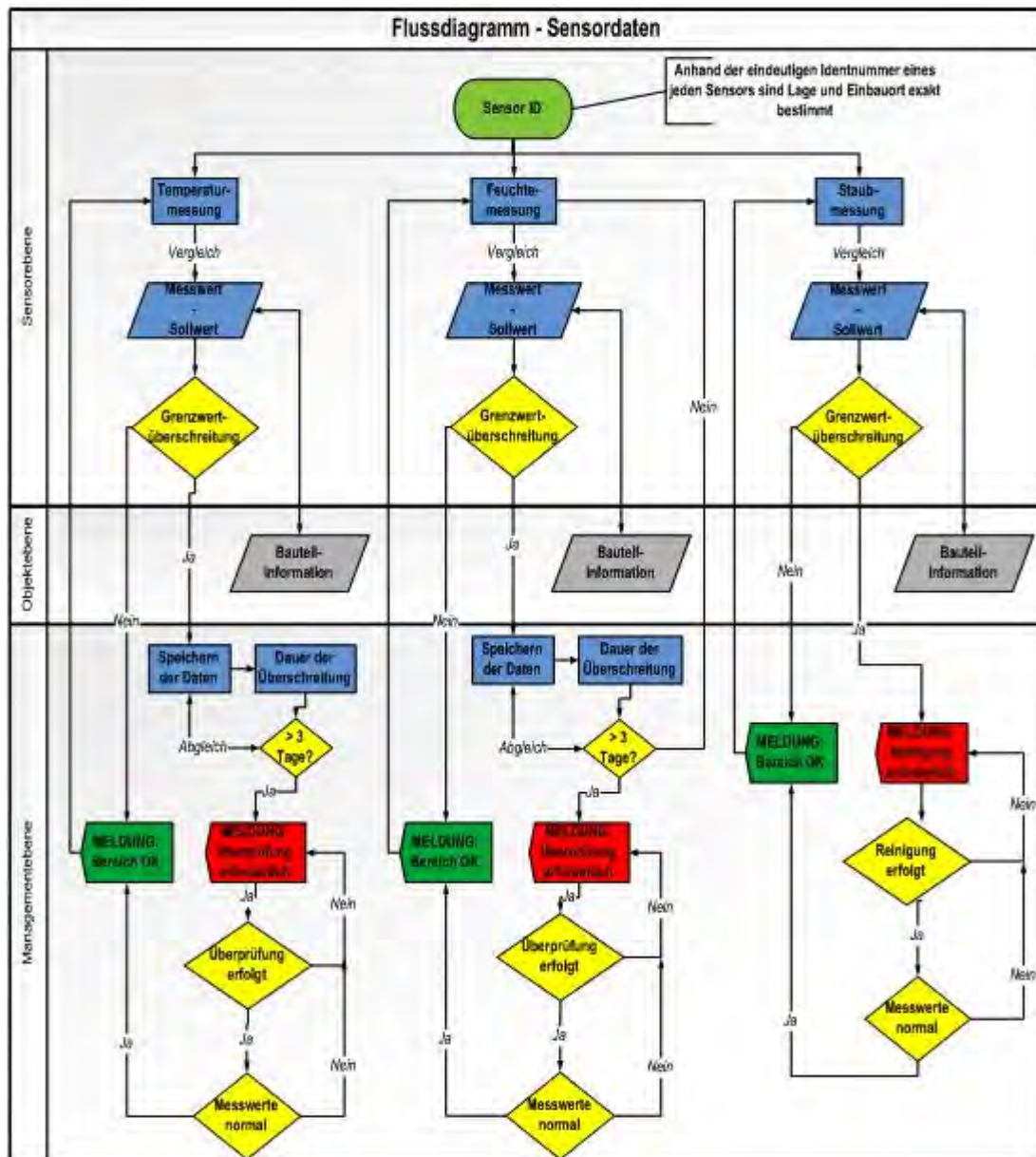


Bild 70: Datenverlauf beim **automatisierten** RFID-Sensornetz-System.

<sup>39</sup> Vgl. VDI 6022/3



Für einen automatisierten Datenverlauf mit dem RFID-Sensornetzsystem zur Kontrolle von technischen Anlagen oder der Gebäudehülle ist die Integration der RFID-Technik in die Gebäudeautomation notwendig. Das heißt, dass für den Einsatz von Sensornetzen die notwendigen Sensortransponder in der Feldebene an den jeweiligen technischen Anlagen wie zum Beispiel den Lüftungskanälen installiert und mit den nächsten Ebenen verknüpft sein müssen. Die Kommunikation zwischen Sender und Empfänger und von der Feld- bis hin zur Managementebene erfolgt in der GA in der Regel durch das Verlegen von Kabelverbindungen und bedeutet einen hohen Arbeits- und Kostenaufwand. Doch durch das Prinzip der Funkübertragung von Messwerten unter Nutzung von drahtlosen Sensornetzwerken würde das aufwändige Verlegen der Kabel entfallen. Besonders mit dem Blick auf eine nachträgliche Ausrüstung von Altanlagen und zu sanierende Gebäude kann eine Integration in die GA wesentlich flexibler und mit wenig Aufwand gestaltet werden.

### 6.7.1 Visualisierung und Schnittstellen Beispiel Lüftung

In der Managementebene der GA erfolgt das Betreiben, Überwachen, Verwalten und Instandhalten eines Gebäudes mit den technischen Anlagen wie einer zentralen Lüftung. Grundlage für die gesamte Koordination bilden die Informationen aus den einzelnen Geräten und den Sensordaten, welche in dieser Ebene zusammenlaufen. Ermöglicht wird dies durch kommerzielle GLT-Software oder entsprechende Management-Software, sogenannte computergestützte Facility Management Systeme (CAFM). Beispiel für derartige Software-Programme mit standardisierten Schnittstellen wie OPC oder BACnet sind u.a. iFIX , Fix32 oder hercon-Studio<sup>40</sup>, welche zur Störungsanalyse und Funktionsbeurteilung aller auf das System geschalteten Anlagen herangezogen werden können. Der Facility Manager hat so die Möglichkeit, einen direkten Zugriff auf die aktuellen Messdaten der Anlage zu erhalten und diese objektbezogen visualisieren zu lassen [40]. Der Vergleich zwischen Mess- und Sollwert signalisiert dem Anwender mittels einer Ampelfunktion die Zustände in den Lüftungsleitungen. Bei einer Abweichung des Messwertes vom Sollwert, wie etwa der Überschreitung der zulässigen Staubkonzentration, könnte ein RFID-Funk-Sensor auch direkt eine Meldung oder einen Alarm an den Nutzer ausgeben. Erst nach Behebung des Problems, z.B. bei Reinigung der Leitung und damit durch eine Normalisierung der Messwerte, würde die Störfallmeldung wieder beendet werden. Mit Hilfe dieser Funktion könnte eine rechtzeitige Kontrolle der hygienischen Zustände in kritischen Bereichen der Lüftungsleitungen angeordnet werden; Nutzer dieser Anwendung wären der Facility Manager sein oder entsprechendes Wartungspersonal.

Hierzu wird im Folgenden eine mögliche Visualisierung einer mit RFID-Sensor-Transponder gekoppelten Benutzeroberfläche für die automatisierte Überwachung eines Lüftungskanals mit RFID-Sensor-System erläutert (Bild 71). Um den Ansprüchen an die Benutzerfreundlichkeit gerecht zu werden, erfolgt eine klare Gliederung einzelner Bereiche. Der erste Bereich (1) stellt grundlegende Informationen des ausgelesenen Sensortransponders bereit. Durch eine CAD-Schnittstelle wäre es möglich, einen Gebäudegrundriss oder die RLT-Anlage einzulesen. Die Ebenenauswahl (1.1) stellt in diesem Fall das Stockwerk dar. In der grafischen Anzeige würde demnach der für das Stockwerk entsprechende Lüftungs-

<sup>40</sup> Vgl. <http://www.herrmann-leittechnik.com/produkte/hercon%20AF/ifix-logview> oder [http://www.herrmann-leittechnik.com/sites/default/files/hercon\\_Studio.pdf](http://www.herrmann-leittechnik.com/sites/default/files/hercon_Studio.pdf)

kanalverlauf zu erkennen sein. In (1.2) könnte der jeweilige RFID- TAG angewählt werden. Weitere Informationen wie die ID-Nummer des Sensors, Bauteilinformationen, Einbauort und das Datum der letzten Wartung könnten mit einer Datenbankanbindung zur Verfügung gestellt werden. Es wäre auch denkbar, die entsprechende Position des TAGs für eine bessere Übersicht in der Grafik anzeigen zu lassen (1.3). Die automatisierte Abfrage z.B. der Messwerte erfolgt nach einem bestimmten Intervall, je nach QM-Vorschrift täglich oder wöchentlich. Im zweiten Bereich (2) ist es dem Anwender aber möglich, durch verschiedene Buttons die Messungen auch manuell zu starten. Das könnte dann der Fall sein, wenn Messwerte zu einem bestimmten Zeitpunkt vorliegen müssen oder durch Wiederholungsmessungen die Korrektheit der Werte zu überprüfen ist. Dazu lassen sich einzelne Transponder direkt ansteuern oder dem System hinzuzufügen.

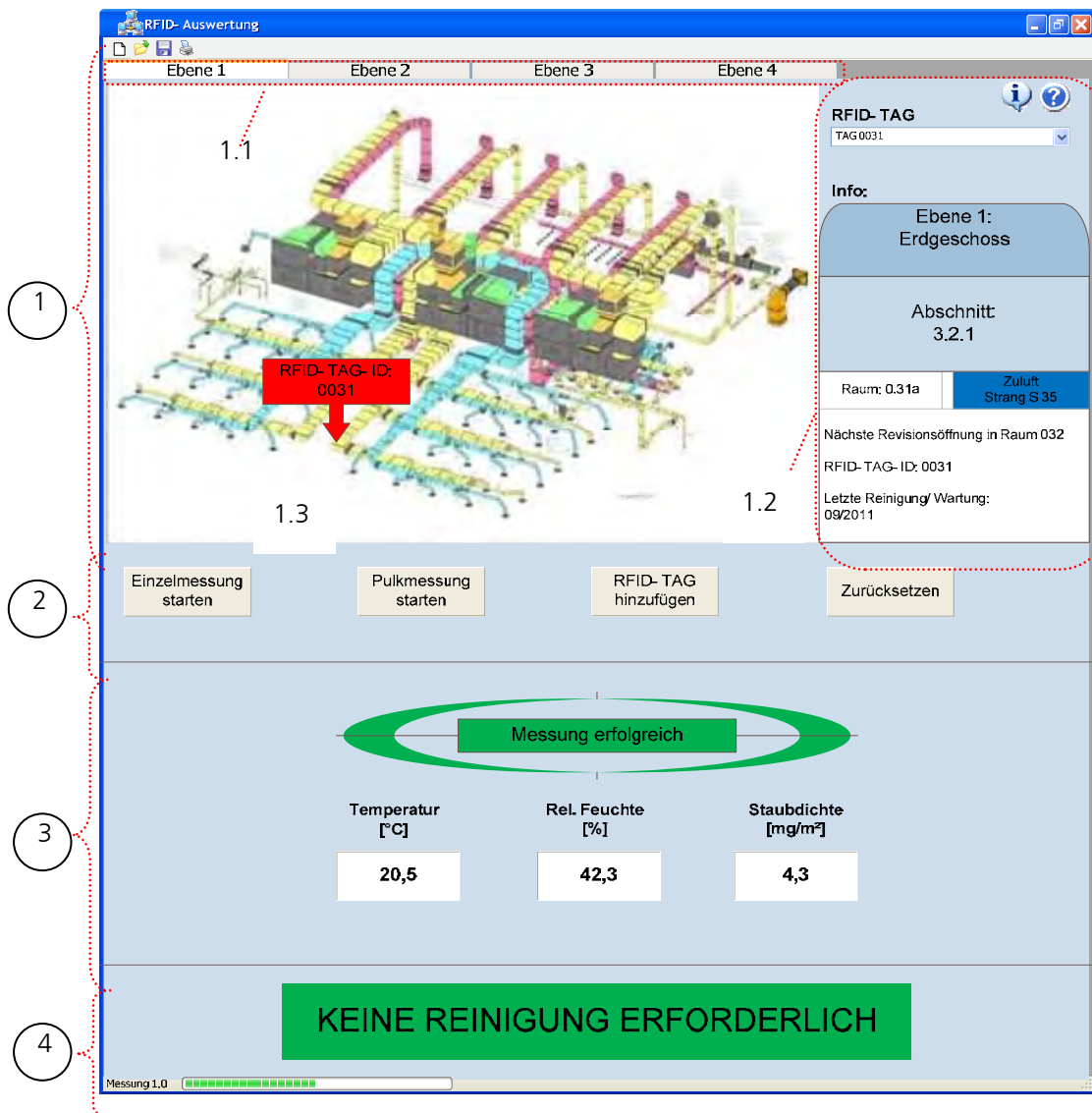


Bild 71: Möglichkeit der Visualisierung einer RFID-Auswertmaske <sup>41</sup>

<sup>41</sup>Quelle der 3D-Konstruktionszeichnung: <http://www.rvtlima.net/images/dhmuenster3d.jpg>



Der dritte Bereich (3) gibt, nach Parameter geordnet, die Ergebnisse der verschiedenen Messungen wieder. Neben den Messungen ist gleichzeitig zu erkennen, ob diese auch erfolgreich gewesen ist, d.h. alle Transponder korrekt ausgelesen sind. Diese Funktion könnte auch über eine entsprechende Farbe suggeriert werden: grün für einen positiven Funktionsstatus und rot für einen gescheiterten Messvorgang. Nach dem Abgleich von Ist- und Sollwert wird im vierten Bereich (4) über eine einfache Ampelfunktion eine Meldung als Information ausgegeben. Liegen die gemessenen Werte außerhalb eines vorher definierten Bereiches von zum Beispiel 0 bis 10 mg/m<sup>2</sup> Staub, erscheint eine Störfallmeldung mit entsprechender Anweisung wie in Bild 72 dargestellt.

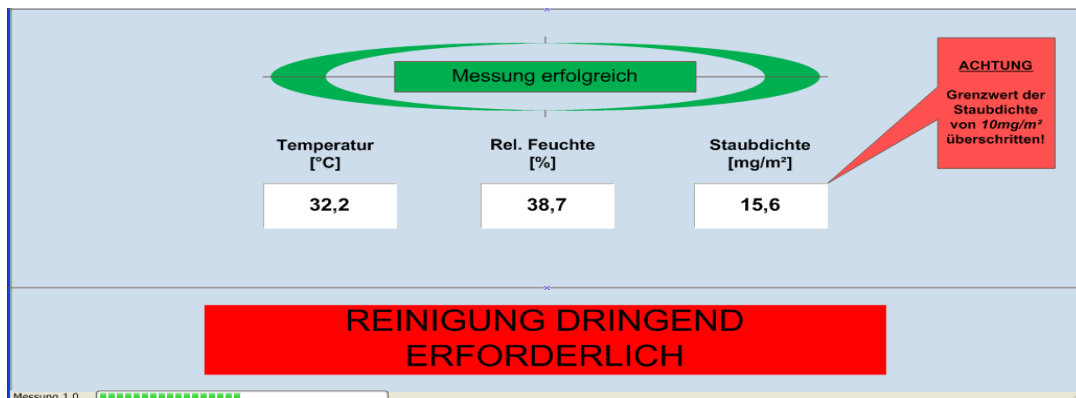


Bild 72: Störfallmeldung der RFID-Auswertmaske

### 6.7.2 Visualisierung und Datenbank Beispiel Dächer

Die zuvor genannten FM-GLT-Programme [40] können als offenes System auch die Daten aus der RFID-Produktidentifikation mit beinhalten. Das Bild 73 zeigt den „Startbildschirm“ einer beispielhaften Managementsoftware für RFID-Sensordaten aus dem Anwendungsfall Holzfeuchte in Dächern.

Zur deutlicheren Übersicht ist diese Visualisierung in drei Bereiche eingeteilt. Im ersten Bereich (1) wird eine Bild des Gebäudes dargestellt. Dabei kann der Nutzer über verschiedene Register zwischen CAD-Konstruktionszeichnungen und Fotos des Gebäudes wählen. Aufnahmen könnten über verschiedene Schnittstellen (USB, Bluetooth, etc.) oder über das Internet mühelos der Datenbank hinzugefügt werden. Zusätzlich stellt dieser Bereich Basisinformationen, wie Temperatur, Luftfeuchte und Hinweise zur Verfügung. So ließen sich bspw. Wartungshinweise oder kritische Bauteilzustände übersichtlich darstellen. Im zweiten Abschnitt (2) der Benutzeroberfläche kann zwischen verschiedenen Applikationen gewählt werden. Durch Anwählen dieser Menüpunkte gelangt der Nutzer direkt zu den jeweiligen Aktionsfenstern, in denen benutzerspezifische Einstellungen vorgenommen und Informationen eingeholt werden können. Im unteren Bereich (3) werden benutzerfreundliche Diagramme und Grafiken dargestellt. So könnten an dieser Stelle der dynamische Energieverbrauch oder Klimadaten des Gebäudestandortes aufgezeigt werden.

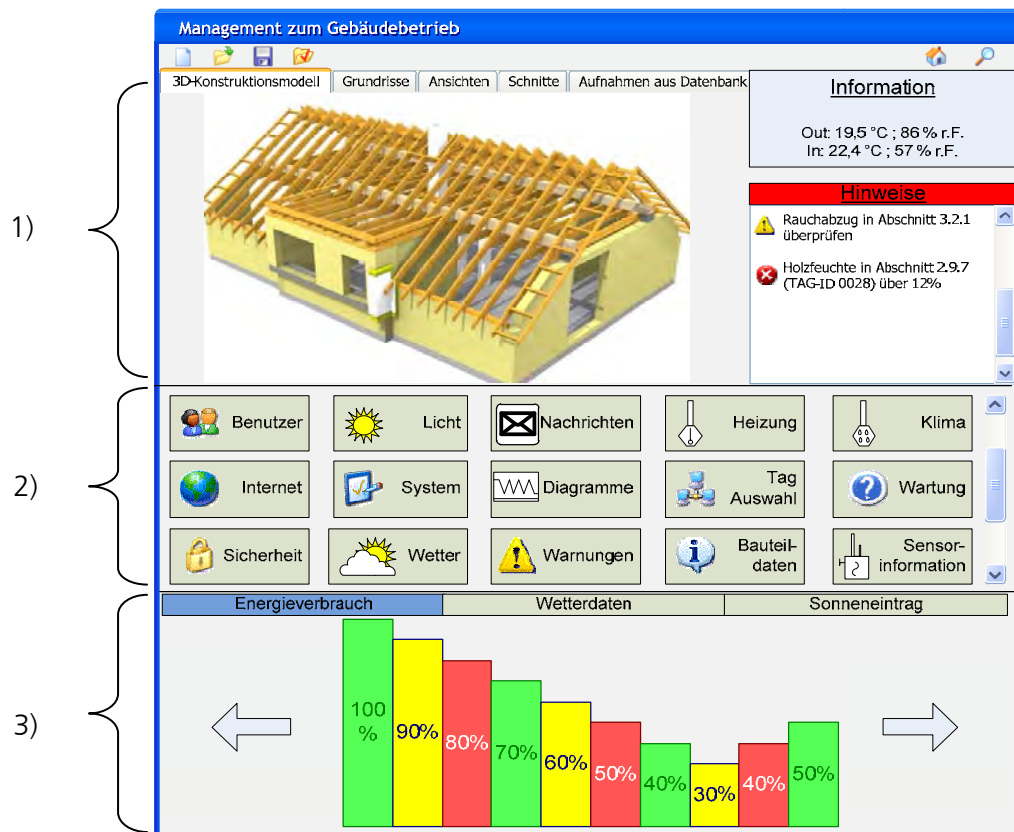


Bild 73: Mögliche Benutzeroberfläche einer RFID Softwarestruktur beim Holzdach <sup>42</sup>

Im zweiten Bildschirm „Sensorinformation“ (Bild 74) werden alle Parameter des RFID-Sensors sowie zusätzliche Interaktionsmöglichkeiten dargestellt. Die Auswahl der Ebenen, in Abschnitt (4), stellt in diesem Fall das Stockwerk des Gebäudes dar. In der grafischen Anzeige würde demnach der Grundriss des darüber liegenden Stockwerkes zu erkennen sein. Durch die Auswahl des jeweiligen Transponders werden über eine Datenbankanbindung weitere Informationen, wie die ID-Nummer des Sensors, Bauteilinformationen, Einbauort und das Datum der letzten Wartung bereit gestellt. Für eine bessere Übersicht kann die Position des Transponders in der nebenstehenden Grafik angezeigt werden. Alle notwendigen Informationen wären auf einen Blick verfügbar. Die Abfrage der Sensor-Messwerte erfolgt automatisch nach einem festgelegten Intervall.

Im Bereich (5) ist es dem Nutzer jedoch möglich, die Messung, durch Auswahl des Feldes „Einzelmessung starten“, auch manuell durchzuführen. Dieser Fall könnte nötig sein, wenn Messwerte zu einem bestimmten Zeitpunkt benötigt oder Wiederholungsmessungen zu starten sind. Weiterhin besteht die Möglichkeit, Sensordaten auszulesen oder Einzelmesswerte auf dem Transponder zu speichern. Darüber hinaus können hier dem System weitere Transponder hinzugefügt oder aus dem System gelöscht werden.

Abschnitt (6) stellt die Ergebnisse der Messungen dar. Hier ist ebenfalls zu erkennen, ob die Messung erfolgreich war und alle Transponder ausgelesen werden konnten. Der Erfolg

<sup>42</sup> Quelle der 3D-Konstruktionszeichnung: Holzbau Hilland, Online im Internet: URL: <http://www.hilland.de/>

der Messung wird dem Anwender über eine entsprechende Farbe verdeutlicht. Grün als Zeichen für einen positiven Funktionsstatus und rot für eine erfolglose Messung. Zur Überwachung der gemessenen Parameter erscheinen diese in den dafür vorgesehenen Feldern. Nach einem Abgleich von Ist- und Soll-Wert wird darunter, mit Hilfe einer einfachen Ampelfunktion, der Bauteilstatus wiedergegeben.

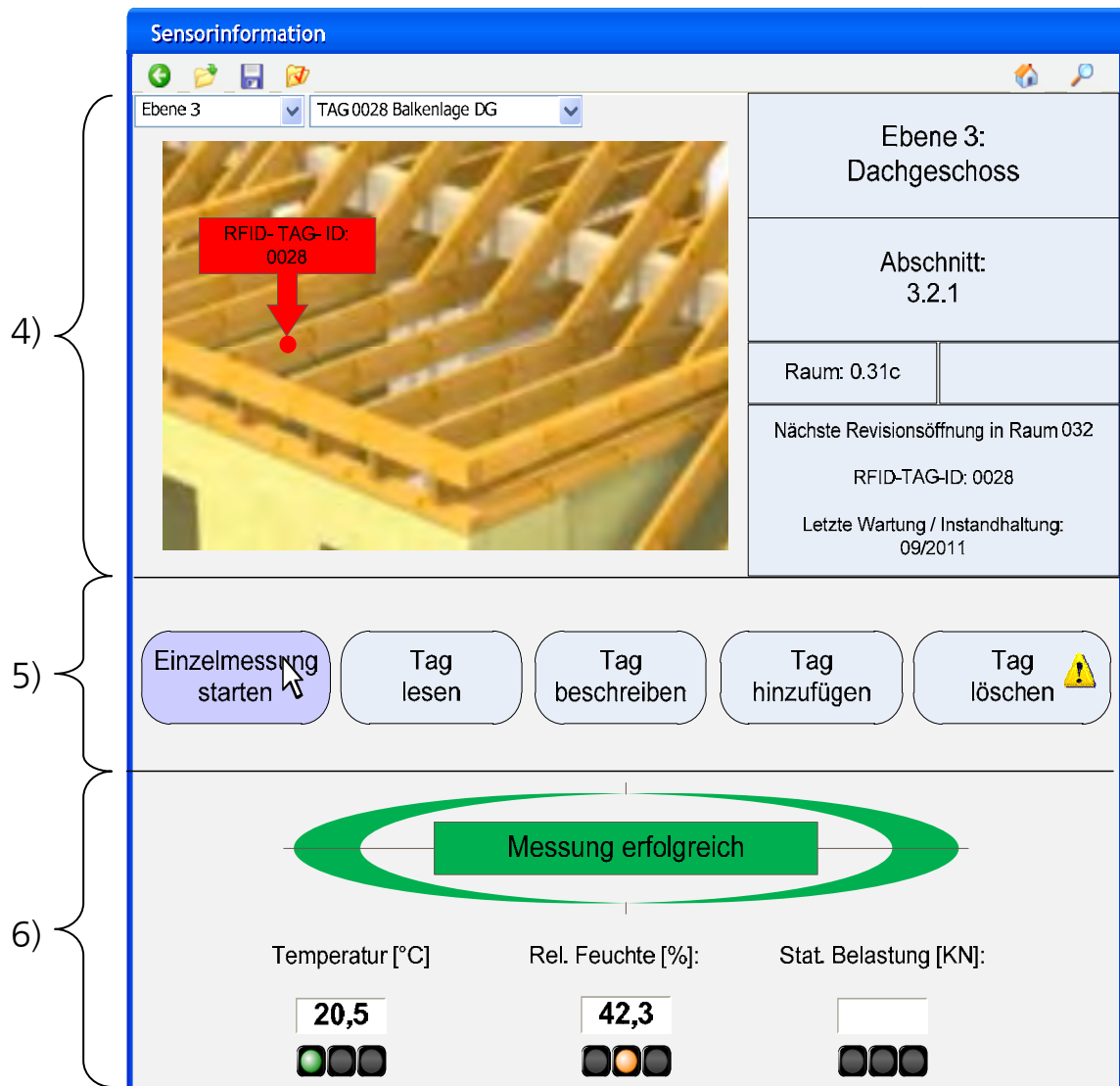


Bild 74: Mögliche Darstellung der RFID-Sensorinformationen für ein Holzdach <sup>43</sup>

Liegen die Werte außerhalb eines vorher definierten Bereiches, so erscheint eine Warnmeldung mit entsprechender Anweisung, wie in Bild 72 dargestellt. Befinden sich die Messwerte innerhalb des Toleranzbereiches, so wird keine Warnmeldung generiert.

<sup>43</sup> Quelle der 3D-Konstruktionszeichnung: Holzbau Hilland, a. a. O.

7)

8)

9)

The screenshot shows the 'Bauteildatenbank' software interface. At the top, there are navigation menus for 'Ebene 3', 'TAG 0028 Balkenlage DG', 'Konstruktionsschnitt', and 'Materialdatenbank'. Below this is a 3D cross-section of a roof structure with yellow insulation and wooden beams. To the right of the 3D view are four buttons: 'Materialkennwerte', 'Textnotiz hinzufügen', 'Sprachnotiz formulieren', and 'Bild hinzufügen'. Below the 3D view is a table with columns for 'Kategorie', 'Soll-Daten', 'Ist-Daten', and 'Status'. The table lists various construction layers like 'Schichtenaufbau', 'Gipsputz', 'Traglaugung', etc. A mouse cursor is pointing at the 'Ist-Daten' column for the 'Kieselschlamm' layer. To the right of the table are three buttons: 'Materialkennwerte', 'Textnotiz hinzufügen', and 'Bild hinzufügen'. A question mark icon is at the bottom right.

Kategorie	Soll-Daten	Ist-Daten	Status
<b>Schichtenaufbau</b>			
Gipsputz	$\rho = 1200 \text{ kg/m}^3; \lambda = 0,51 \text{ W/(m}^2\text{K)}$		
Traglaugung	$\rho = 600 \text{ kg/m}^3; \lambda = 0,13 \text{ W/(m}^2\text{K)}; S10$		
Dampfsperre luftdicht: angeschl.	sd-Wert: 10 m		
Dämmmaterial	$\rho = 8 \text{ kg/m}^3; \lambda = 0,035 \text{ W/(m}^2\text{K)}$		
Balkenlage	$\rho = 600 \text{ kg/m}^3; \lambda = 0,13 \text{ W/(m}^2\text{K)}$		
Diff. offene, wasserd. Abdeckung	sd-Wert: 0,05 m		
Aufzänderung	$\rho = 600 \text{ kg/m}^3; \lambda = 0,13 \text{ W/(m}^2\text{K)}; S10$		
Holzbelag	$\rho = 600 \text{ kg/m}^3; \lambda = 0,13 \text{ W/(m}^2\text{K)}$	$\rho = 900 \text{ kg/m}^3; \lambda = 0,18 \text{ W/(m}^2\text{K)}$	
Bitumendachbahn	$\rho = 1200 \text{ kg/m}^3; \lambda = 0,17 \text{ W/(m}^2\text{K)}$		
Kieselschlamm	$\rho = 2100 \text{ kg/m}^3; \lambda = 2,00 \text{ W/(m}^2\text{K)}$		
Hinzufügen...			
	<b>Einzeldaten</b>	<b>Zusatz</b>	
<b>Einbau/Abnahme</b>			
Gewerk	Zimmerer / Dachdecker / Maler		
Unternehmen	Liste		
Einbauport	Flachdach über DG		
Festgestellte Mängel	----		
Hinzufügen...	Hinzufügen...	Hinzufügen...	Hinzufügen...
<b>Sonstiges</b>			
Anmerkungen	---	---	
Konstruktionszeichnung			
Hinzufügen...	Hinzufügen...	Hinzufügen...	Hinzufügen...

Bild 75: Mögliche Softwareoberfläche der Bauteildatenbank beim Holzdach.

Durch Auswählen der Bauteildatenbank im Fenster „Startbildschirm“ erhält man detaillierte Informationen zu jedem Bauteil, das elektronisch mit einem RFID-Transponder gekennzeichnet ist, siehe Bild 75. Oben im Bildschirm (7) lassen sich wieder die Ebenen (Stockwerke) bestimmen. Im nächsten „Dropdown-Menü“ kann dann zwischen den Bauteiltranspondern der einzelnen Ebenen ausgewählt werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, Konstruktionszeichnungen sowie weitere Informationen der ausgewählten Bauteile darzustellen.

In Abschnitt (8) wird dann bspw. ein genauer Schichtenaufbau des Bauteils wiedergegeben. Diese Tabelle ist bereits während der Bauphase durch die RFID-Produktidentifikation der verwendeten Materialien erstellt worden. In der Tabelle sind alle Materialien des Bauteils laut Ausschreibung (Soll-Daten) festgehalten. Von der Ausschreibung abweichende Produkte werden unter „Ist-Daten“ eingetragen. Dadurch können unterschiedliche Kennwerte oder spätere Schadensursachen besser zurück verfolgt werden. Die Ampelfunktion des Statusfeldes verdeutlicht dies nochmals. Unter „Einbau/Abnahme“ sind alle Gewerke aufgelistet, die zur Erstellung der Gesamtkonstruktion beigetragen haben. Durch klicken auf den Link „Liste“ wird eine detaillierte Gesamtübersicht aufgerufen. Desweiteren können festgestellte Mängel während der Bauphase sowie im Nutzungszustand aufgerufen oder hinzugefügt werden. Unter „Sonstiges“ lassen sich weiterführende Planungsunterlagen

gen einsehen. In dem Abschnitt (9) wird dem Anwender die Möglichkeit geboten, Notizen zum derzeitigen Bauteilzustand hinzuzufügen.

Durch Markieren der Bauteilschicht (z.B. Dachbahn) und Auswahl des Fensters „Materialkennwerte“ erhält der Nutzer in einem separaten Fenster zusätzliche spezifische Daten zu dem jeweils verwendeten Produkt, siehe Bild 76.

10)

Kategorie	Einzeldaten	Zusatz
<b>Basisdaten</b>		
Hersteller	Mustermann GmbH & Co. KG	<a href="#">Kontakt</a>
Handelsname	Dachbahn V13, Bitumendachbahn	
Produktnorm	DIN EN 13707 / DIN EN 13969	
Kennzeichnung	DU / EV 014	
Produktionswerk	Stuttgart	
<a href="#">Hinzufügen...</a>		
<b>Technische Daten</b>		<a href="#">Produktdatenblatt</a>
Länge / Breite / Dicke [m]	5,00 / 1,00 / 0,004	
Flächenbez. Masse [kg/m <sup>2</sup> ]	3,10	
Brandverhalten	DIN EN ISO 11925-2	
Trägerlage	Polysterevlies 250 g/m <sup>2</sup>	
<a href="#">Hinzufügen...</a>		
<b>Einbau/Abnahme</b>		<a href="#">Verarbeitungshinweise</a>
Gewerk	Dachdecker	
Unternehmen	Dachdeckerei Mustermann GmbH	<a href="#">Kontakt</a>
Einbauort	Flechdach über DG / Bauabschnitt 3.2.1	<a href="#">Grundrissplan</a>
Festgestellte Mängel	---	<a href="#">Notizen/Fotos</a>
<a href="#">Hinzufügen...</a>		
<b>Sonstiges</b>		
<a href="#">Hinzufügen...</a>		

11)

Bild 76: Mögliche Softwareoberfläche für Materialkennwerte des Bauteils Holzdach.

Diese werden in Abschnitt (10) ebenfalls tabellarisch dargestellt. Neben den Basisdaten des Herstellers sind ebenfalls technischen Daten des Produktes hinterlegt. Über Verknüpfungen durch die RFID-Identnummer des jeweiligen Produkts gelangt man zu den Produktdatenblättern oder Einbauhinweisen des Herstellers, abgelegt in der digitalen Bauakte oder in einem Internet-Server („Daten-Cloud“).

Weiterführende Informationen aus der Wartung oder einem Gebäuderundgang (Sicherheitsbegehung, Schadensfall) können unter Abschnitt 11) in die Datenbank integriert werden.

## 7 Erfahrungen im Umgang mit RFID-Sensor-Technik und zur Baulauglichkeit

Die bisherigen Untersuchungen zu den Beispielanwendungen der unterschiedlichen RFID-Sensortransponder-Systeme zeigen, dass die geplante Verwendung prinzipiell funktioniert. Besonderheiten im Umgang mit den Sensoren und Geräten sowie bei der Datenauswertung und einige Hinweise zur Baulauglichkeit werden im Folgenden beschrieben.

### 7.1 Erfahrungen im Umgang mit der Hardware

#### LF-Hardware

Ein Ziel der Untersuchungen war es, den Einfluss von verschiedenen Randbedingungen bei der Messung des Innendrucks der VIP mit dem integrierten LF-Sensor-Transponder und dem Prototyp-Lesegerät zu untersuchen. Sowohl die Versuche in der Klimakammer als auch an der Testfassade zeigen die erwartete Abhängigkeit des Drucks von der Temperatur. Allerdings stimmen der gemessene Betrag und die Steigung des Druckverlaufs über der Temperatur nicht bei allen Sensoren mit den erwarteten Werten überein. Daraus war zu schließen, dass die vorhandenen Sensoren in den VIP nicht korrekt kalibriert wurden. Die LF-Sensoren und Lesegeräte aus neueren Produktionsreihen, die 2011/2012 vom IMS Duisburg zur Verfügung gestellt wurden, zeigten in den wiederholten Tests keine diesbezügliche Auffälligkeit. Es wird deshalb davon ausgegangen, dass die Kalibrierung zukünftig kein Problem darstellen wird.

Am Beispiel der VIP-Sensoren wurde die LF-RFID-Technik im Hinblick auf die Handhabbarkeit und Bedienbarkeit untersucht. Der Projektpartner Firma Isover stattete im Rahmen eines Sanierungsprojekts eine Hälfte des Fraunhofer-Demonstrationsgebäudes „inHaus1“-Doppelhauses eine Innendämmung mit VIPs aus dem eigenen Produkt „VACUPAD“<sup>44</sup>. In diesen Dämmplatten sind VIPs als Kernelement mit Schaumstoffstreifen umrandet und Pressspanplatten verklebt (vgl. Bild 77).



Bild 77: Ansicht des VIP-Paneels „VacuPad“ (links) und Auslese von VIP-Drucksensoren mit dem AEG-Reader durch die GK-Innenbekleidung.

<sup>44</sup> „Vacupad“ Dämmstoffe mit VIP von der Fa. isover: <http://www.isover.de/Home/Daemmstoff-Portal/Innovationen/VacuPad/VacuPad.aspx>, zuletzt abgerufen am 30.09.2012

Die Bauplatten in Standardgrößen werden auf eine Lattung (z.B. unter den Sparren oder auf dem Mauerwerk) montiert. PU-Schaumplatten dienen zum Auffüllen etwaiger Lücken. Mit einer Dampfsperffolie und abschließenden Gipskartonplatten erfolgt der innenseitige Abschluss. Die eingebauten VIPs wurden teilweise mit integriertem IMS-RFID-Sensortransponder ausgestattet. Der Fachplaner erstellte für die Montage einen Verlegeplan der „VACUPAD“-Dämmplatten mit Positionierung der Sensoren, um das „Finden“ der verborgenen Sensoren zu erleichtern. Nach Fertigstellung der Trockenbauarbeiten zeigt sich gerade das Finden der Sensoren als Problem. Die Handwerker hatten die geplante Positionierung der Sensoren nicht beachtet und diese wahlfrei verteilt, was zu relativ zeitaufwendigem Suchen führte. Für die Langzeitbetrachtung wurden exemplarisch zwei gut zugängliche VIP-Drucksensoren ausgewählt, in unregelmäßigen Zeitabständen mit verschiedenen Lesegeräten (IMS-Prototyp und AEG-Reader) ausgelesen und die gemessenen Werte des jeweiligen Innendrucks verglichen (Bild 78).

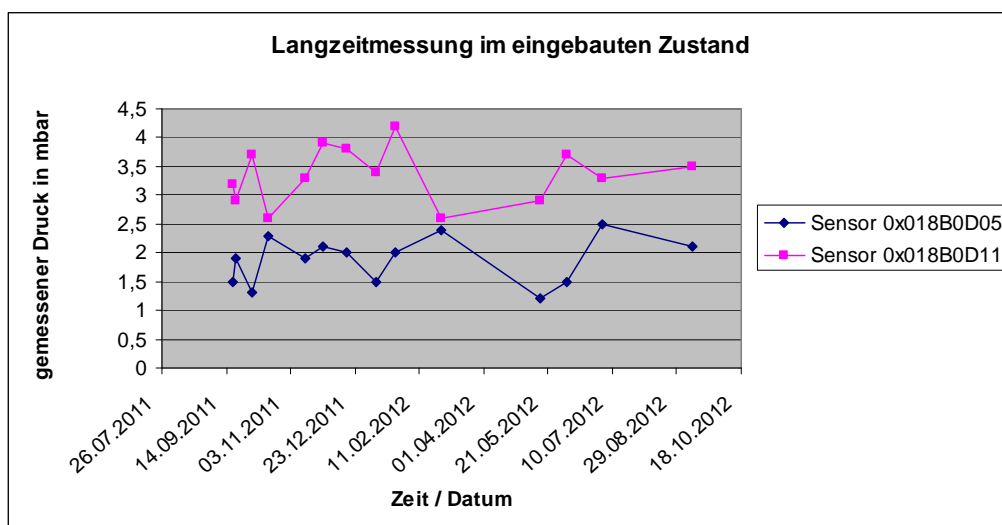


Bild 78: Gemessener Innendruck von eingebauten VIP-RFID-Sensoren über ein Jahr im inHaus-1.

Die gemessenen Gasdrücke in den zwei VIP-Paneelen zeigt einen erwarteten stabilen Verlauf über die Messzeit von ca. 1 Jahr mit einer leichten Schwankung, begründet durch das Digitalisierungsrauschen. Die Unterschiede im Mittelwert ergeben sich aus der Produktion der VIPs; es ist keine Drift zu erkennen. Zu den Produktionsschwankungen: siehe hierzu auch die Messreihe beim anderen Hersteller va-q-tec in Bild 84.

Im Testgebäude inHaus-1 konnten auch an den Wänden die LF-Feuchtesensoren in passiver RFID-Technik weiter erprobt werden. Dazu wurden solche in den Zwischenraum von bisheriger Außenwand und der raumseitigen Lattung für die Innendämmung integriert. In diesem Bereich kann eine kritische Material- oder Luftfeuchte entstehen, wenn raumseitig die Fugen nicht sorgfältig abgedichtet wurden (siehe auch Kap. 9.1.3).

Aus den Untersuchungen mit den Prototyp-Sensortranspondern und den Lesegeräten für die Nahfeld-LF-Technik war zu folgern, dass eine dritte Generation von Lesegeräten mit bautaughlichen Eigenschaften nur in Zusammenarbeit mit kommerziellen Geräteherstellern machbar ist. Dies führte 2011 zur Abstimmung mit den Herstellern der VIP-Bauelemente, um die gewünschte Anzahl an Lesegeräten recherchieren und die Bedarfe an Sensoren, Kalibrierungen etc. zu bestimmen. Die Kooperation mit dem Hersteller des favorisierten Lesegerät ARE-H5, AEG-ID, Ulm gestaltete sich als zeitaufwändig, da die Bereitschaft, das Gerät zu modifizieren, gering war. Dies lag u.a. an den nur spärlich gegebenen Zusa-



gen aus dem Kreis der VIP-Hersteller, größere Mengen der Geräte abzunehmen solange die Tests nicht erfolgreich waren; diese hingen wiederum an der Gerätemodifikation, die erst im Oktober 2012 erfolgreich gelang.



Bild 79: Anwendung der RFID-Feuchtesensor-Transponder an Außenbauteilen im Demonstrationsgebäude inHaus-1 (links) und Messwerte am Display des LF-Readers (rechts).

Mit diesem baustellentauglichen LF-Lesegerät ARE-H5 können nun die LF-Transponder mit IMS-Feuchtesensor und IMS-Drucksensor für VIP ausgelesen werden, siehe Fotos oben. Die Software im Lesegerät in der modifizierten Form lässt es auch zu, dass RFID-Tags ohne Sensorik auslesbar sind wie die Ident-Tags von ASK, siehe Bild 80 und Bild 81.



Bild 80: Lesung des LF-ASK-Tag unter dem bedruckten RFID-Etiketts neben dem VIP-Drucksensor.



Bild 81: Lesung des LF-ASK-Tag unter dem bedruckten RFID-Etiketts mit dem H5-Reader am Beispiel eines Holzpanels vom Dachmodell (links) und eines Balkon-Isokorbs (rechts).

In der Zwischenzeit wurde ein kleineres Lesegerät „Tiny“ im IMS erprobt (Bild 82) und in Duisburg und Stuttgart für die Demonstrationen eingesetzt, das jedoch noch nicht alle Anforderungen an die Robustheit im Baubetrieb befriedigt.



Bild 82: Lesung des LF-Feuchtesensors (links) und des LF-VIP-Drucksensors (rechts) mit dem Tiny-Lesegerät in unterschiedlicher Antennenbauart.

Neuere Untersuchungen zur Messunsicherheit und Reproduzierbarkeit an VIP-Bauteilen beim Hersteller und Kooperationspartner va-Q-tec in Würzburg zum Vergleich der Messmethoden „RFID-LF-Drucksensor-Transponder“ mit der Messmethode „va-Q-Check“ (siehe Kap. 6.1.1) ergaben folgende Erkenntnisse. An VIP-Elementen, in denen beide Sensorensysteme eingebaut waren (siehe Bild 83), lassen sich die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse bestätigen. Im Wertebereich unter 5 mbar ist die Übereinstimmung beider Methoden sehr gut, siehe Grafik in Bild 84. Im Druckbereich oberhalb des Grenzwerts für eine VIP-Qualitätsfreigabe von 5 mbar weichen die Ergebnisse systematisch ab. Die mit der RFID-Funktechnik gemessenen Werte sind um 2 bis 3,5 mbar höher d.h. auf der für den Hersteller ungünstigeren Seite. Die Ursachenermittlung ist noch nicht abgeschlossen.

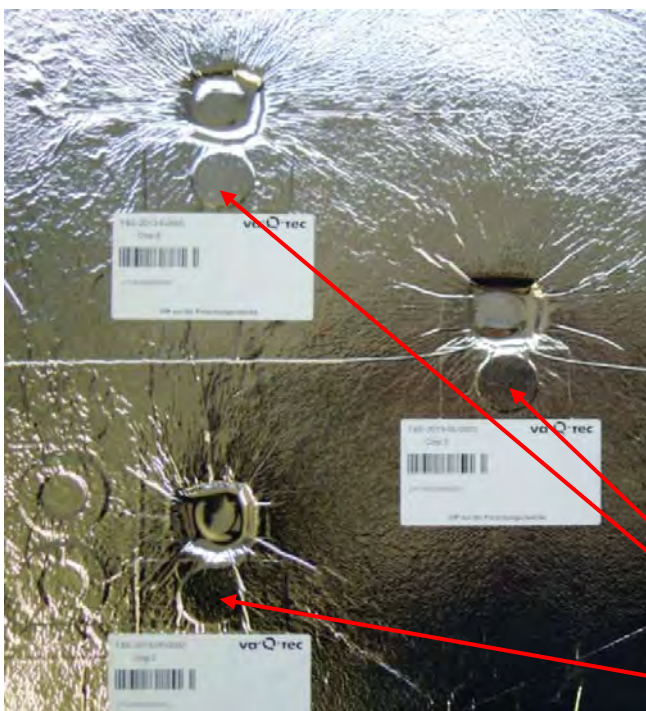


Bild 83: VIP-Testpaneel mit RFID-Drucksensor-Transponder und va-Q-Check-Plättchen.

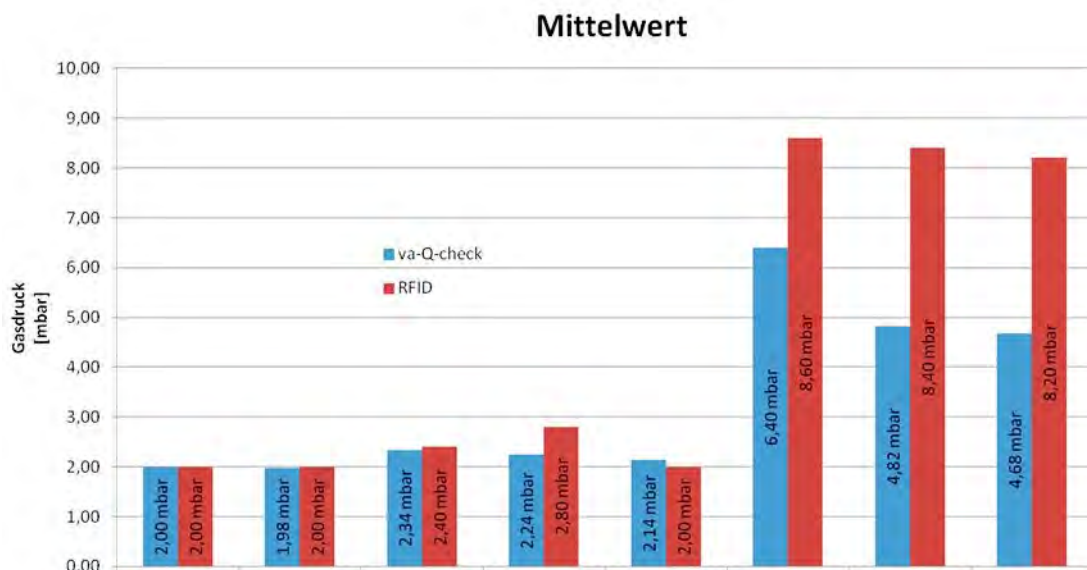


Bild 84: Vergleich des Unterdrucks im VIP nach der Messmethode RFID-Sensor (rot, rechts) und va-Q-Check (blau, links), ermittelt von Fa. va-q-tec, Würzburg.

Der Einfluss, den ein Anwender auf das Auslesen haben kann, wurde durch Tests zum Haltewinkel und der Halterung der Antenne untersucht. Es wurde festgestellt, dass eine optimale Position der Antenne den Auslesebereich erhöht. Ein Auslesen wird aber selbst bei extremen Positionen der Antenne nicht verhindert. Für eine spätere Anwendung sind spezielle Vorrichtungen, wie ein Stativ, somit nicht zwangsläufig erforderlich. Dem bestehenden RFID-Qualitätskontrollsystem für Vakuumisulationspaneele kann durch die Tests eine hohe Praxistauglichkeit nachgewiesen werden, da abgesehen von metallischen Zwischenschichten nichts ein Auslesen der Sensoren verhindert.

Zum weiteren Test der Bautaughkeit ist eine Anwender-Befragung für eine Erprobung der RFID-Systeme durch Studenten, Hausmeister, FM-Experten (u.a. im Bereich des Fraunhofer IZS-Gebäudemanagements) in Vorbereitung. Als Testobjekte dienen die Fraunhofer IBP Testfassade und die diversen Baustellen in der Umgebung des Fraunhofer-Institutszentrums, damit unter rauen Baustellenbedingungen und auf Gerüsten die Handhabung untersucht werden kann. Daraus sollen dann die externen Eindrücke und Meinungen zum Nutzenpotential der RFID-Sensortechnik selbst und weiteres Verbesserungspotential für die Adaption der Geräte in der 3. Generation abgeleitet werden.

### UHF-GHz-Hardware

Die im Projekt mit den GHz-Sensornetzknotten mit externem Feuchtesensor durchgeführten Untersuchungen haben ergeben, dass eine Überwachung von sicherheitsrelevanten Parametern in Holzkonstruktionen mit der RFID-Sensortechnik möglich ist. Für eine Anwendung im praktischen Baubetrieb ist es jedoch erforderlich, die Transponder- und Sensorauswahl je nach Material- und Umgebungsbedingungen objektbezogen auszuwählen. Dies kann derzeit aufgrund der geringen Auswahl noch nicht befriedigend erfolgen. Die Eigenschaften der derzeit getesteten Systeme sind in der folgenden Tabelle aufgelistet, welche für einen Einsatz im Gebäude bedeutend sind.

Tabelle 11: Spezifische Eigenschaften der untersuchten Systeme

Eigenschaften	IMS-Prototyp	XBee-Serienbauteil
Baugröße H x B x T	50 x 125 x 80 mm	68,5 x 63,5 x 33 mm
Gewicht (ohne Batterien)	148 g	91 g
Kosten	---	ca. 90 EUR
Frequenz	2,4 GHz	2,4 GHz
Reichweite (Freifeld)	max. 74 m	max. 65 m
Spritzschutz/ Wasserdicht (IP-Klasse)	Ja/ Nein (-)	Ja/Nein (-)
Batterie-Statusanzeige	Ja	Nein
Batteriefunktionsdauer (30 min. Messintervall)	300 Tage	1100 Tage
Betriebstemperatur (min./max.)	-20 / + 85 °C	-18 / + 55 °C
Messunsicherheit	± 1 °C / ± 5 % r.F.	± 2 °C / ± 3,5 % r.F.
Integrierte Sensoren	Temperatur/ Feuchte/ (Licht)	Temperatur/ Feuchte/ Licht
Erweiterbare Sensoren	Feuchtesensor/ Dehnmessstreifen	Feuchtesensor

Aus der Tabelle 11 wird der Unterschied der IMS-Prototypen zu den XBee-Serienbauteilen besonders anhand der Baugröße, dem Gewicht und der Batterielebensdauer deutlich. Im Praxisbetrieb muss es möglich sein, die Transponder durch verschiedene Werkstoffe hindurch und über größere Entfernungen hinweg zuverlässig auslesen zu können. Mit einer dreifach höheren Batterielebensdauer der XBee-Module gegenüber den IMS-Prototypen und einer daraus resultierenden höheren Zuverlässigkeit, bieten diese für den Nutzer entscheidende Vorteile. Als Kritikpunkt zu den XBee-Bauteilen ist die nicht vorhandene Statusanzeige der Batteriefunktionsdauer zu erwähnen. Hier erscheint eine Warnmeldung oder Anzeige der Batteriespannung im Datenverarbeitungsprogramm am sinnvollsten. So wird der Nutzer frühzeitig auf einen notwendigen Batteriewechsel hingewiesen und kann entsprechend reagieren.

Die Bedienung des Transponders mit der jeweiligen Software spielt an dieser Stelle eine eher untergeordnete Rolle, da es nicht das Ziel ist, die Messwerte direkt abzulesen, sondern sie über Monitoringsysteme zu erfassen und in bestehende Softwareapplikationen einzubinden. Mit Hilfe dieser Applikationen sollen die Daten dann gefiltert und dem Nutzer grafisch aufbereitet zur Verfügung gestellt werden.

Weitere Sensornetz-Systeme mit meist integrierten Sensoren werden seit 2012, z.T. erst seit einigen Monaten kommerziell angeboten, siehe Kap. 4.3. Beispiele aus dem Bereich Energieeffizienz sind für das Privathaus die Systeme RWE-smartHome<sup>45</sup>, somfy-TaHomA<sup>46</sup> und neuerdings auch IQfy<sup>47</sup>. Im Bereich der Nutzgebäude werden Systeme z.B. für den Einsatz in der Gebäudetechnik zur Temperaturüberwachung in Datenzentren, Kühlhäusern etc. angeboten von Digi (XBee-System, getestet im Projekt) und E-Senza (SenzaNET-System).

## 7.2 Erfahrungen im Umgang mit RFID-Software und Auswerteprogrammen

Für die untersuchten Anwendungen standen 3 unterschiedliche Sensordaten-Erfassungs- und Auswerteprogramme zur Verfügung.

Für den LF-Frequenzbereich war bei den VIP-Drucksensor-Transpondern ein Programm im Einsatz, das im IMS-Lesegerät integriert ist und die Messdaten direkt am Display anzeigt sowie auf einer SD-Speicherkarte ablegt. Die Daten aus dem internen Gerätespeicher lassen sich auch direkt über ein USB-Kabel auf einen PC oder Notebook übertragen. Die Erfahrungen mit der Datenweitergabe und anschließender Auswertung in MS-Excel-Programmen war positiv.

Für den UHF/GHz-Frequenzbereich bei den Sensornetz-Transpondern waren zwei Programme im Test. Bei dem IMS-Prototyp-System kam ab Mitte 2010 das Programm **SensornetView** zur Anwendung, siehe Bild 60. Es ist eine Eigenentwicklung des Fraunhofer IMS auf der Basis von frei verfügbarer Hyperterminal-Software und angepasst an die Erfassung von gleichzeitig 3 Sensornetzknoten mit den jeweiligen Sensoren wie Temperatur, Feuchte, Licht etc. (siehe Beschreibung in Kap. 6.4 und Kap. 6.5.3.1).

Mit der ersten Verfügbarkeit des X-Bee-Sensornetzsystems der Fa. Digi<sup>48</sup> in 2011 konnten die Erprobungen eines externen Anschlusses von Feuchtesensoren mit dem Datenerfassungs- und Auswerteprogramm **Digi-X-CTU** gewonnen werden, siehe Bild 22.

Negativ aufgefallen ist die umständliche Auswertung der externen Sensordaten. Anders als bei einem LF-Handlesegerät, welches den Feuchtwert unmittelbar anzeigt, kann der ermittelte ADC-Wert erst im Nachhinein, über einen Export und einer Bearbeitung in einem weiteren Programm, einem Feuchtwert zugeordnet werden. Dieses Verfahren ist derzeit noch sehr aufwändig und, bedingt durch die selbstständige Kalibrierung der Sensoren, auch nicht sehr genau. Am Fraunhofer IMS Duisburg soll zu diesem Thema weitere Projektarbeit geleistet werden, um das Auslesen der UHF-Transponder benutzerfreundlicher zu gestalten und so eine auf den Endnutzer zugeschnittene Softwarevariante präsentieren zu können.

Über die Software aus dem 1. Fraunhofer-Projekt „RFID-Kennzahlen und Bauqualität“ [5] steht das sogenannte „Baustellen-Kiosk-System“ zur Verfügung, mit dem die Bauproduktdatenblätter für die Anwendungen ohne RFID-Sensorik aufgerufen und bearbeitet werden können. Ein Beispiel hierzu für die Glasfassade-Kennwerte zeigt

<sup>45</sup> U.a. RWE-smartHome, siehe in <http://www.rwe-smarthome.de>

<sup>46</sup> U.a. somfy-TaHomA, siehe in [www.somfy-tahoma.de](http://www.somfy-tahoma.de)

<sup>47</sup> U.a. IQfy, siehe in <http://www.iqfy.de/iqfy-loesungen/zuhause>

<sup>48</sup> Siehe <http://www.digi.com/de>, X-CTU-Manual: [http://ftp1.digi.com/support/documentation/90001003\\_A.pdf](http://ftp1.digi.com/support/documentation/90001003_A.pdf)



Microsoft Excel - Kennwerte Glasfassade Kiosk-sw V2

	A	B	C	D	E	F	G
16		Glas 1	Glas 2	Glas 3	Glas 4	Glas 5	Glas 6
17	ID	U2068480246	U206848A2E5	U20681017DF	U206848A6F1	U2068483AF0	U206848A6CF
18	Fläche	1,8204	0	0	0	0	0
19	Ug	1,1	0	0	0	0	0
20							
21							
22		Paneel 1	Paneel 2	Paneel 3	Paneel 4	Paneel 5	Paneel 6
23	ID	U20A8E34E9A	U20A8DD7900	U20A8E3EE1D	U20A8E36E44	U20A8E34E7D	U20A8E3AE15
24	Fläche	...					
25	Up	...					
26							
27		Profil 1	Profil 2	Profil 3	Profil 4	Profil 5	Profil 6
28	ID	U80A0A7C85C	U80A0A7A416	U80A0A798F9	U80A0A7E8BA	U80A0A7F0BF	U80A0A738B5
29	Länge						
30	Bauteilanschluss 1	Glas_1					
31	Bauteilanschluss 2	Glas_2					
32	Psi_1	...					
33	Psi_2	...					
34							
35	...						
36	<b>Kenndaten Gesamtfassade</b>						
37	Gesamtfläche	A_cw	m²	ist	Soll aus LV	Abweichung	Hinweis
38	Gesamt U-Wert FA (=Fassadenabschnitt)	U_cw	W/m²K	100	100	0	
39	Gesamt g-Wert FA	g_cw_total	%	2,1	1,8	0,3	
40	Gesamt Transmissionswärmeverlust FA	H_t	W/K	64	60	4	
41	Gesamt Solare Gewinne FA	Q_s	kWh/a	28	23	5	
42	Gesamtmasse		kg	300	250	50	
43	...			1250	1200	50	
44	Mangel -> ID für Mängelmanagement festhalten, ggf. weitere Dokumentationsmöglichkeiten						
45	Abweichungen von Istwerten zu Sollwerten:						
46	Differenz H_t	delta_H_t	W/m²K				
47	Differenz Q_s	delat_Q_s	kWh/a				

Bild 85: Kennwertevergleich beim Abnahmeprozess der Glasfassade, nach [5]. Über ID-Nummern (Zeilen 17,23, 28) aus den RFID-Tags erfolgt die Kopplung zur EPC-Datenbank.

Als zusätzliches Instrument zur Visualisierung der verschiedenen Anwendungen steht ein bautauglicher Tablet-PC zur Verfügung. Dieser hat die o.g. Auswerteprogramme SensornetView und X-CTU sowie das Kiosk-System installiert und kann die Daten aus den Lesegeräten zu den RFID-Sensortranspondern erfassen. Damit lassen sich dann die untersuchten Beispielprozesse für die automatisierte Erstellung des Energieausweises, die erweiterte Wartung bei Lüftungsanlagen und das Bauteilmonitoring bei Tauwasser in Holzkonstruktionen demonstrieren.



Bild 86: Visualisierung der Daten aus RFID-Feuchtesensoren mit SensornetView



### 7.3 Erfahrungen zur Datensicherheit und Entsorgung

Die Radio-Frequenz-Identifikation ist eine für viele Anwendungen nutzbringende Technologie. Zurzeit bestehen jedoch noch keine generell gültigen Sicherheitskonzepte. Damit die RFID-Technik vor allem als Sensornetzwerk erfolgreich zum Einsatz kommen kann, sind einige Hinweise zur Datensicherheit angebracht. Die Literatur fokussiert sich bisher vorwiegend auf den Datenschutz von Verbrauchern, welche durch die neue Technik den Verlust der Privatsphäre und eine exakte Zuordnung von Objekten zu Personen befürchten. Die Datensicherheit in Unternehmen, wo der Schutz von unternehmensinternen Daten vor dem Ausspähen und der Manipulation im Vordergrund steht, wird bisher eher vernachlässigt. Häufig erfolgen Angriffe auf die Transponder, da diese im Allgemeinen nicht gegen unbefugtes Auslesen geschützt sind. Aber auch die drahtlose Übertragung zwischen Transpondern und Lesegeräten können Ziel von Angreifern sein, da hier kein physischer Eingriff in das System notwendig ist und aus der Ferne agiert werden kann. Angriffe auf Datenbanken werden über Firewalls i.a. verhindert.

#### Sicherheit in Sensornetzwerken

Sensornetzwerke können aus einer Vielzahl von Sensorknoten und Basisstationen bestehen. Unberechtigte Eingriffe können aus verschiedener Motivation heraus entstehen und lassen sich häufig nur schwer erkennen. Hauptziel von Angreifern eines Systems ist der Zugang zu Informationen und Daten oder das Einfügen von unzutreffenden Informationen durch fremde Transponder in Sensornetzwerke oder eine Manipulation der Funktionenverfügbarkeit, um den Nutzer des Systems zu täuschen. Einen Schutz vor widerrechtlichen Eingriffen in Sensornetzwerke bietet bspw. die „TinyOS- Software“<sup>49</sup>. Sie ist bei Betreibern weit verbreitet und stellt einen Quasi-Standard für drahtlose Sensornetzwerke dar.

#### Schutzmechanismen

Um die Datensicherheit auf den Transpondern zu gewährleisten, kommen vorrangig kryptografische Schutzmaßnahmen in Frage. Das bedeutet, Transponder und Lesegerät besitzen einen gleichen kryptografischen Schlüssel. Durch eine gegenseitige Authentifizierung der beiden Bauteile wird überprüft, ob diese einem gleichen System angehören. In Sensornetzwerken stellt diese Methode bereits eine gängige Praxis dar. Allerdings bringen diese Verfahren auch gewisse Nachteile mit sich. So werden kostengünstige, passive Transponder durch kryptografische Schutzmaßnahmen verteuert. Dies ist vor allem bei der Kennzeichnung auf Produktebene eine Herausforderung. Zusätzlich besitzen die Tags heutzutage noch nicht genug Speicherplatz für solche Schutzmaßnahmen. Die Abstimmung solcher Schutzprogramme auf die Anwendung bei bauphysikalischen Anwendungen wie der Erstellung von Energieausweisen wird als nicht vorrangig angesehen und soll später mit der Anpassung der Software erfolgen.

#### Entsorgung

Derzeit werden die Transponder als Teil von Verpackungen oder als Aufkleber auf Produkten mit dem normalen Hausmüll entsorgt. Die Wiederverwertung der RFID-Tags kommt hauptsächlich bei Gegenständen in Frage, die sich bereits in Kreisläufen befinden, wie z.B.

<sup>49</sup> TinyOS Open-Source-Betriebssystem, Online in Internet: [URL: www.tinyos.net](http://www.tinyos.net)

Transportverpackungen und Paletten oder zugänglichen Gebäudemonitoring-Systemen. Sind Transponder hingegen fest in Materialien wie Abdichtungsbahnen oder Dämmstoffen integriert, werden diese zusammen mit dem Trägermedium entsorgt. In diesem Bereich sind für eine breite Nutzung der RFID-Technologie noch erhebliche Fortschritte in der Materialforschung notwendig, um die Einflüsse der anorganischen Störstoffe von den Transpondern auf die Recyclingprozesse so gering wie möglich zu halten.

Zurzeit bestehen die Tags in der Regel aus Stoffen wie Klebstoff, Silizium, Kupfer, Aluminium, Silber, Epoxidharz, Nickel und Kunststoff. Ihre Auswirkungen auf Recyclingprodukte sind vielfältig. Sie reichen von Verunreinigungen bis hin zu Verfärbungen und Qualitätsverschlechterungen. Aktuell wird an der Entwicklung von Materialien wie Polymeren gearbeitet. Diese sollen künftig Metalle und Silizium in dem Datenspeicher-Chip ersetzen<sup>50</sup> und würden eine Entsorgung der Transponder weit aus unproblematischer gestalten.

Doch auch die Batterieentsorgung aktiver Transponder sollte in der Recyclingkette der RFID-Tags nicht unerachtet bleiben. Je nach Hersteller und eingestelltem Messintervall unterscheidet sich deren Lebensdauer. Bei einem großen Gebäude kann daher eine Vielzahl leerer Batterien anfallen. Auch bei wiederaufladbaren Batterien reduziert sich über einen langen Zeitraum die Akkuleistung.

Als Lösung bietet hier die EnOcean GmbH<sup>51</sup>, als bisher einziges Unternehmen, batterielose Funksensoren an. Mit Hilfe von miniaturisierten Energiewandlern nutzen diese Module die Energie aus der Umgebung. Somit arbeitet die EnOcean-Funktechnologie umweltfreundlich und schont wichtige Ressourcen.

## 8 Qualitätsmanagement, Kosten-Nutzen-Relation

### 8.1 Qualitätssteigerung durch Bauwerksmonitoring

Das größte Potenzial der RFID-Sensortechnik wird der Nutzungsphase und allen damit verbundenen technischen Leistungen wie Wartung und Instandhaltung beigemessen. Angesichts immer wieder auftretender tragischer Ereignisse wie Einstürze, Brände oder andere Versagensfälle wird deutlich, dass eine Gefährdung der öffentlichen Sicherheit und Ordnung durch Bauwerke mit Einsparungen bei der Qualitätsüberwachung vor allem bei der Wartung zunimmt. Eine solche Gefahr geht insbesondere von weit gespannten Dachtragwerken aus. Häufig ist dies auf folgende Entwicklungstendenzen zurückzuführen:

- Immer komplexer werdende Bauteile und Bauweisen,
- Ausnutzung aller gestalterischen Möglichkeiten führen zu immer schlankeren Tragkonstruktionen,
- Extreme Auslastung der Baustoffe durch Kostenminimierung,
- Qualitätsverlust durch hohen Termin- und Kostendruck sowie durch Einsatz von unqualifiziertem Personal,

<sup>50</sup> Vgl.: André Wuttig, RFID-Chips aus dem Drucker – Herstellung von Tags mittels Nanopartikeln, Technische Universität Dresden, Dresden 2010, Online im Internet: URL: [http://tu-dresden.de/die\\_tu\\_dresden/fakultaeten/fakultaet\\_informatik/tei/vlsi/lehre/votr\\_pro\\_haupt/folder.2010-04-30.7782863372/Nanoimprint.pdf](http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_informatik/tei/vlsi/lehre/votr_pro_haupt/folder.2010-04-30.7782863372/Nanoimprint.pdf) [22.06.2012]

<sup>51</sup> Vgl.: EnOcean - Hersteller für batterielose Funksensoren, a. a. O.

- Fehlendes Fachwissen und unterlassene Fachaufsicht während der Bauzeit und bei der Abnahme durch Preisdumping bei Ingenieurhonoraren,
- Reduzierung der Prüfung von Standsicherheits- und Brandschutznachweisen durch Kostendruck auf die öffentliche Verwaltung,
- Unterlassen regelmäßiger Überwachungen bei Bauwerken mit gewissem Gefährdungspotenzial aus Kostengründen.

Da Dachtragwerke Unikate sind und somit eine Typisierung kaum möglich ist, sollten bei Gebäuden mit Gefährdungspotenzial auch in der Nutzungsphase unabhängige Prüfungen oder Überwachungen durchgeführt werden, um Gefahren für den Menschen abzuwenden. Auch die Auswirkungen von baulichen Änderungen oder Nutzungsänderungen auf die Bausubstanz sollten untersucht werden.

Anders als beim Brückenbau, bei dem eine regelmäßige Überwachung und Prüfung der Bauwerke durch die DIN 1076<sup>52</sup> bundesweit einheitlich geregelt ist, gibt es für weit gespannte Tragwerke zur Beherbergung großer Menschenansammlungen, die nicht zur Bundesebene zählen, noch keine Vorschriften in welchen Abständen Wartungen und Kontrollen durchgeführt werden müssen. Die Bauministerkonferenz hat im Jahr 2006 zu diesem Zwecke nochmals die Eigenverantwortung der öffentlichen und privaten Eigentümer betont, Gebäude stets in einem verkehrssicheren Zustand zu halten. Daraufhin wurden „Hinweise für die Überprüfung der Standsicherheit von baulichen Anlagen durch den Eigentümer / Verfügungsberechtigten“<sup>53</sup> erarbeitet. Auf dieser Basis wurde vom BMVBS<sup>54</sup> eine „Richtlinie für die Überwachung der Verkehrssicherheit von baulichen Anlagen des Bundes“ (RÜV, [41]) eingeführt. Für Gebäude des Bundes schreibt die RVÜ eine in der Regel jährliche Begehung durch die Bauverwaltung und der hausverwaltenden Dienststelle vor.

Eine wesentliche Grundlage für die Kontrolle von Flachdächern und Bauwerken aller Art, ist das Vorhalten der wichtigsten Daten und Konstruktionszeichnungen sowie die Dokumentation aller bisherigen Bauwerksprüfungen. Mit Hilfe der RFID-Technik können beispielsweise Informationen und Dokumente zu Wartungsarbeiten, besonderen Ereignissen, aber auch zu Verantwortlichkeiten der Gewerke als eine Art digitales Bautagebuch ohne Informationsverlust gespeichert und abgelegt werden. Dazu werden das bisherige Vorgehen und ein mögliches Vorgehen mit LF-Transpondern im Nahfeld sowie die fortlaufende Bauwerksüberwachung mit UHF-Sensortranspondern (Fernfeld) nachfolgend vorgestellt.

### Konventionelle Überprüfung

Die Überprüfung des Gebäudezustands erfolgt zunächst durch eine Begehung von sachkundigen Fachkräften ohne größere Hilfsmittel. Hierbei werden der Zustand der tragenden Konstruktion und der Dachabdichtung, die Funktionstüchtigkeit der Dachentwässerung und die bauphysikalischen Bedingungen sowie bauliche Veränderungen augenscheinlich untersucht. Werden gefahrenrelevante Schäden festgestellt, so ist eine „handnahe Untersuchung“ mit maximal einer Armlänge Abstand zum gefährdeten Bauteil vorzunehmen

<sup>52</sup> DIN 1076: Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen - Überwachung und Prüfung, November 1999

<sup>53</sup> Konferenz der für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister und Senatoren der Länder, September 2006

<sup>54</sup> Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung

[41]. Das bedeutet häufig einen hohen technischen und organisatorischen Aufwand. Bei Bauwerken mit weit gespannten Tragkonstruktionen und großen Raumhöhen werden oftmals Hebebühnen oder Gerüste benötigt, um die handnahen Untersuchungen durchführen zu können. Außerdem sind die Gebäude vielfach in der Nutzung eingeschränkt, was einen Erwerbsverlust für den Eigentümer darstellt. Je nach Ausmaß des Schadens ist dann eine weiterführende Prüfung durch entsprechende Sachverständige sowie die Behebung des Schadens zu veranlassen.

#### Konventionelle Dokumentation

Um Informationen über das betroffene Bauteil zu erhalten und ggf. Berechnungen durchzuführen, müssen die analogen Daten vom Sachverständigen mühsam aus der Bauwerksakte ausgewertet und in digitale Systeme übertragen werden. Die Ergebnisse der Untersuchungen werden dann üblicherweise in einer Überwachungsliste<sup>55</sup> festgehalten. Diese enthält Angaben zu Befund, Art und Umfang der Überprüfung und wird dem Eigentümer als Anlage des Bauwerksbuches übergeben. Häufig gehen jedoch bei einem Besitzerwechsel die analogen Objektdaten verloren, was dazu führt, dass die Dokumentation unvollständig und so im Schadensfall keine genaue Rückverfolgung möglich ist.

#### Überprüfung mit RFID-Technik

Um bei den Prüfarbeiten einen durchgängigen Informationsfluss und eine eindeutige Verknüpfung von Prüfinformationen und Bauteil zu ermöglichen, wird jedes Prüfteil durch passive RFID-Transponder individuell gekennzeichnet. Wegen der eingeschränkten Auslesereichweite der LF-Tags kann die Einhaltung der „handnahen“ Prüfung dennoch sichergestellt werden. Durch integrierte Sensoren in den Transpondern lässt sich zusätzlich der aktuelle Ist-Wert der Bauteile darstellen. Eine Arbeitsplattform wie beim bisherigen Prüfverfahren wird in diesem Fall jedoch weiterhin benötigt.

#### Dokumentation mit RFID-Technik

Die Identifikation und Datenerfassung kann mit Hilfe eines mobilen Handlesegerätes und einer speziell dafür entwickelten Anwendung stattfinden. Sämtliche Bauteildaten können so vom Prüfer direkt am Bauteil abgelesen und auch hinterlegt werden. Durch die Sensortechnik lassen sich zudem Soll-Werte in Echtzeit mit bauspezifischen Ist-Daten vergleichen. Diese Form der Anwendung stellt bereits eine erhebliche Prozessvereinfachung gegenüber der bisherigen Überprüfung dar. Dennoch sind das Auslesen der einzelnen Sensortransponder und die damit verbundenen Arbeitsschritte, sowie eine manuelle Synchronisation mit einer historischen Datenbank, sehr zeitaufwändig. Ist es dann bei einem Bauteil zur Überschreitung eines Grenzparameters gekommen, lässt sich dies erst später bei der Auswertung feststellen und beheben. Kommerzielle Systeme zur mobilen Wartung und Instandhaltung mit RFID-Technik werden seit einigen Jahren von verschiedenen Firmen angeboten<sup>56</sup>

#### Monitoring mit RFID-Sensornetzen

Mit Hilfe konventioneller Sensorik lassen sich charakteristische Kennwerte wie Luft- und Bauteiltemperatur, Feuchtigkeit im Bauwerk, Dehnung und Schwingungen erfassen, die es

<sup>55</sup> Beispiele sind in RÜV des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung

<sup>56</sup> Z.B. Fa. TAGnology mit System TAGpilot, siehe

[http://www.tagpilot.de/uploads/media/Flyer\\_TAGpilot\\_Mobile\\_Instandhaltung\\_-\\_kurz.pdf](http://www.tagpilot.de/uploads/media/Flyer_TAGpilot_Mobile_Instandhaltung_-_kurz.pdf)

dann auszuwerten gilt. Nachteilig an den bisher eingesetzten Überwachungssystemen sind der hohe Zeitaufwand für Installation und Verkabelung der Sensoren und Steuerelemente, sowie die daraus resultierenden hohen Kosten. Daher werden Systeme zur dauerhaften Bauwerksüberwachung nur selten eingesetzt. Durch die Verwendung von mobilen, drahtlosen RFID-Sensornetzwerken kann zukünftig ein breites Anwendungsfeld erschlossen werden, da derartige Monitoringsysteme leicht, einfach zu installieren und somit deutlich kostengünstiger sind, siehe Kap. 4.3. Doch die Anforderungen an das Personal für die Ersteinrichtung solcher Systeme und an die Schulung der Mitarbeiter sind hoch. So sollten möglichst viele Sensoren integrierbar und auch wieder heraus lösbar sein, ohne einen störenden Einfluss auf das Sensornetzwerk und die Datenbank zu verursachen. Zusätzlich sind eine hohe Ausfallsicherheit sowie eine geringe Fehlertoleranz nötig. Des Weiteren sollte der Energieverbrauch der Sensoren möglichst gering und die Lebensdauer der Bauteile möglichst hoch sein. Die Einbindung der RFID-Kennzeichnung aller notwendigen Teile ist bei heutigen Gebäuden nicht vorhanden, was ein schlechtes Kosten-Nutzen-Potenzial verursacht.

## **8.2 Qualitätsbewertung der RFID-Technik durch QFD**

Eine Möglichkeit zur Bewertung von Kosten-Nutzen-Potentialen der RFID-Technik nach kundenorientierten, qualitätsgerechten Produkt- und Prozesskriterien bietet die Methode Quality Function Deployment (QFD). Basis der einzelnen Bewertungsschritte bilden Tabellen, die das gewichtete Ziel (Was) und die Umsetzung (Wie) zueinander in Beziehung setzen. Die Denk- und Planungsschritte werden für den Anwender gut nachvollziehbar im sogenannten „House of Quality“ (HoQ) dokumentiert [42]. Die Arbeitsschritte, die im HoQ durchgeführt werden, können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Ermittlung der Kundenanforderungen
- Vergleich zum Wettbewerb
- Ableitung der Qualitätsmerkmale
- Festlegung von Zielwerten
- Beziehungsmatrix erstellen
- Prüfen auf Wechselwirkungen
- Bewertung der technischen Bedeutung.

Der Aufbau eines House of Quality ist dem folgenden Bild 87 zu entnehmen.

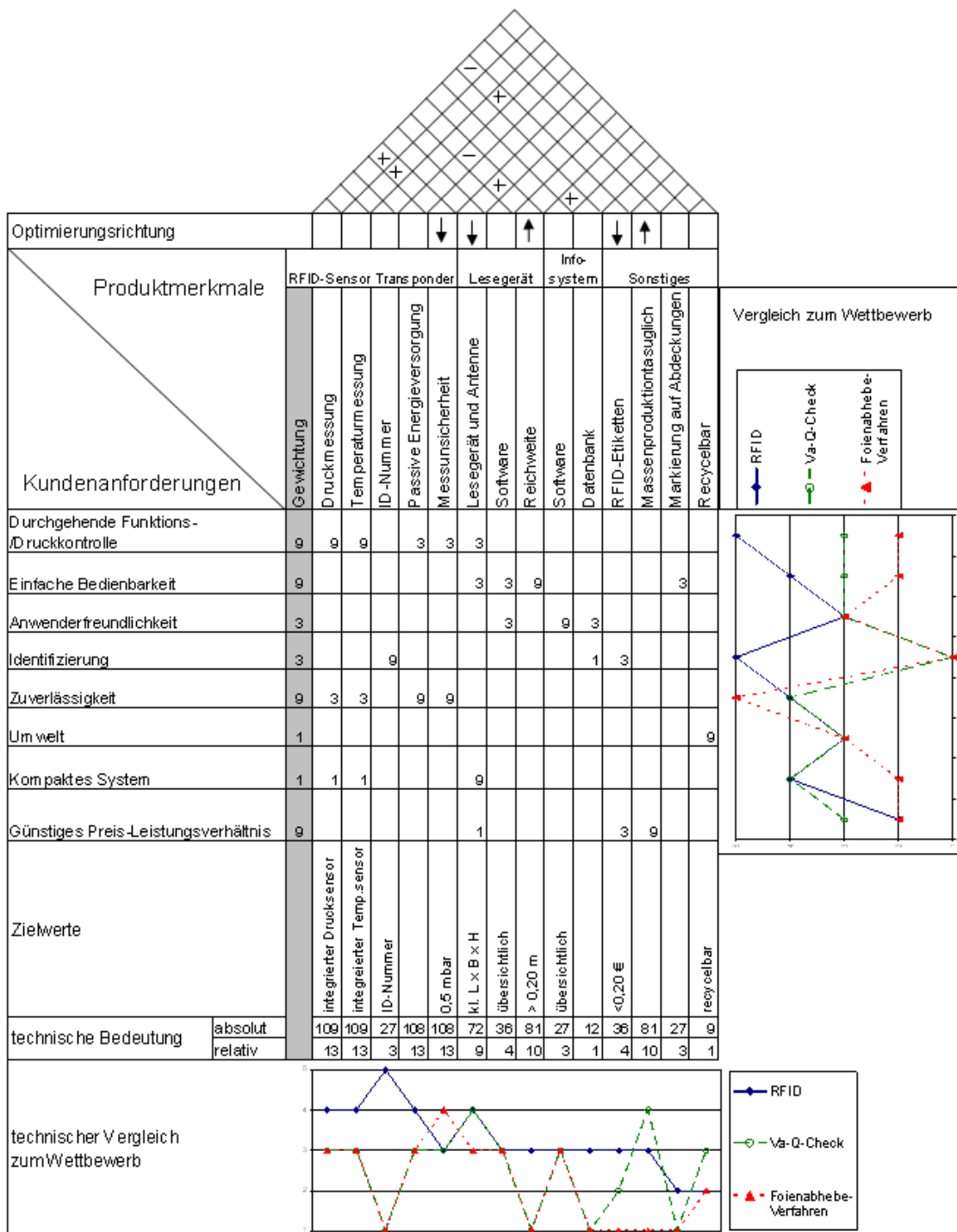


Bild 87: Aufbau des „House of Quality“ für den Vergleich der Druck-Kontrollmethoden bei VIP

Für die Produktplanung eines Kontrollsystems für VIP mittels RFID-Technik wurden diese Arbeitsschritte durchgeführt und das House of Quality erstellt. Betrachtet wird das vorhandene Kontrollsystem mit der Möglichkeit eines Anschlusses an den PC<sup>57</sup>, um auf diese Weise eine Funktionskontrolle mit „Ampelanzeige“ durchzuführen. Im Folgenden werden

<sup>57</sup> Oder ähnliches, wie beispielsweise ein Smartphone.



für das VIP-Kontrollsystem die einzelnen Schritte zur Erstellung des House of Quality aufgeführt, erklärt und mit einer exemplarischen Bewertung versehen.

### **Ermittlung der Kundenanforderungen**

Für die Ermittlung der Kundenanforderung ist die Kenntnis der Kunden wesentlich. Im Falle des VIP-Kontrollsystems sind das zum einen die Hersteller und zum anderen die Facility Manager, da diese Personen das Kontrollsystem anwenden werden. Durch die beiden unterschiedlichen Kundentypen sind auch die Kundenanforderungen teilweise etwas unterschiedlich und setzen dadurch eine gewisse Variabilität des Systems voraus.

Die Anforderungen, die diese Kunden an das System stellen, sind im Folgenden aufgelistet und kurz erklärt. Zusätzlich erfolgt eine Gewichtung der Anforderungen (1: relativ unwichtig, 3: wichtig, 9: sehr wichtig).

#### Durchgehende Funktions-/Druckkontrolle (9)

Die wohl wichtigste Kundenanforderung des Systems ist die Funktions- bzw. Druckkontrolle des VIP. Nach Möglichkeit soll die Kontrolle zu jedem Zeitpunkt ab der Herstellung möglich sein. Hierbei muss zwischen den verschiedenen Kundentypen unterschieden werden. Für den Hersteller der VIP ist die Kenntnis des Druckmesswerts wichtig. Dem Anwender des Kontrollsystems im verbauten Zustand genügt die reine Funktionskontrolle, ob das VIP in Ordnung ist oder nicht. Die Gewichtung dieser Kundenanforderung wird als sehr wichtig (9) eingestuft.

#### Einfache Bedienbarkeit (9)

Für den Kunden ist eine einfache Bedienbarkeit ein weiteres wichtiges Kriterium, das über Erfolg oder Misserfolg des Systems entscheidet. Folgenden Anforderungen bestehen:

- einfaches und schnelles Auslesen der Sensormesswerte
- einfaches Auffinden des Sensors im verbauten Zustand und
- übersichtliche Menüführung des Lesegeräts und der Auswertesoftware

Die Wichtigkeit dieser Anforderung wird als sehr bedeutsam (9) angesehen.

#### Anwenderfreundlichkeit (3)

Eine weitere Anforderung aus Sicht des Kunden ist eine hohe Anwenderfreundlichkeit des Systems. In diesem Zusammenhang ist die Überwachung der zeitlichen Druckänderung im VIP zu nennen, die leicht und übersichtlich dargestellt werden können sollen.

Die Gewichtung dieser Anforderung wird als wichtig (3) eingestuft.

#### Identifizierung (3)

Besonders bei der Herstellung kann eine zusätzliche Identifizierungsmöglichkeit der VIP durch das RFID-System sehr nützlich sein. Bestehende Barcode-System können ersetzt werden und auf diese Weise finanzielle Mittel eingespart werden. Diese Anwendung wird als wichtig (3) eingestuft.

#### Zuverlässigkeit (9)

Eine wesentliche Anforderung der Kunden ist die Zuverlässigkeit des Systems. Es soll ein Messergebnis mit einer geringen Messunsicherheit vorliegen. Das System soll ebenfalls (besonders für die Anwendung im Bausektor) eine hohe Lebensdauer bei einem gleichzeitig geringen Wartungsaufwand aufweisen. Dies sind entscheidende Anforderungen, weswegen diese als sehr wichtig (9) eingeordnet werden.

#### Umwelt (1)

Ein weiterer Punkt, den Kunden fordern, ist die Umweltverträglichkeit des Systems. Hierbei interessiert zum einen die Entsorgung des Systems nach dessen Einsatz, zum anderen aber auch die Auswirkungen des Systems auf die Gesundheit des Menschen.

Die Paneele und somit auch die Sensoren sind für einen langen Einsatzzeitraum geplant, weswegen der Entsorgung eine untergeordnete Wichtigkeit zugesprochen wird. Die gesundheitlichen Risiken werden ebenfalls nicht als Hauptanforderungen gesehen (vorausgesetzt es besteht keine massive Gesundheitsgefährdung, womit nicht gerechnet wird). Die Wichtigkeit dieser Kundenanforderung wird deshalb als relativ gering (1) eingestuft.

#### Kompaktes System (1)

Das Kontrollsystem soll aus praktischen Gründen recht kompakt sein, da es neben der Anwendung beim Hersteller ebenfalls auf der Baustelle eingesetzt werden soll. Dies bedeutet, dass die Sensoren eine bestimmte Größe nicht überschreiten sollen, das Lesegerät handlich und auch das Informationsverarbeitungssystem kompakt ausgeführt sein soll. Diese Anforderung wird als relativ unwichtig (1) angesehen, da die Größe der verschiedenen Bestandteile nicht als entscheidendes Verwendungskriterium gesehen wird.

#### Günstiges Preis-Leistungsverhältnis (9)

Ein wesentliches Kaufkriterium für den Kunden ist immer das Preis-Leistungsverhältnis. Stimmt dieses nicht, ist die Investition für den Kunden nicht lohnenswert. Deshalb wird die Bedeutsamkeit dieser Anforderung als sehr wichtig (9) angesehen.

### **Vergleich zum Wettbewerb**

Im nächsten Schritt wird ein Vergleich zu Mitbewerbern aus Sicht der Kunden durchgeführt. Die Bewertung wird mit einer Bewertungsskala von 1 bis 5 vorgenommen. Als Kontrollsysteme, die mit dem RFID-System verglichen werden, werden das Folienabhebe-Verfahren und der Va-Q-Check ausgewählt. Im Folgenden wird die Bewertung der drei Verfahren für die verschiedenen Kundenanforderungen kurz erklärt.

#### **Durchgehende Funktions-/Druckkontrolle**

Eine durchgehende Funktionskontrolle bietet nur das RFID-System, weshalb es die volle Punktzahl (5 Punkte) erreicht. Wie bereits in Kapitel 6.1.1 erklärt wurde, ist mit dem Va-Q-Check eine Kontrolle bis kurz vor dem Einbau möglich (3 Punkte). Das Folienabhebe-Verfahren kann hingegen nur nach der Herstellung verwendet werden (2 Punkte).

#### **Einfache Bedienbarkeit**

Ein Unterschied bei der Bedienbarkeit der drei Systeme besteht bei der Durchführung der Funktionskontrolle. Sowohl die Druckbestimmung durch das RFID-System als auch der Va-Q-Check sind relativ schnell und einfach durchführbar. Das RFID-System hat den Vorteil, dass kein direkter Kontakt nötig ist, was eine Fließbandkontrolle (nach der Herstellung) ermöglicht. Dadurch erreicht das RFID-System einen Punkt mehr (4 Punkte) als der Va-Q-Check (3 Punkte). Das Folienabhebe-Verfahren ist relativ aufwendig, da das VIP erst in eine Vakuumkammer gelegt werden muss und die Bestimmung des Vakuums einige Minuten in Anspruch nimmt (2 Punkte).

#### **Anwenderfreundlichkeit**

Prinzipiell kann bei jedem System mit einer geeigneten Software der Druckverlauf nach mehreren Messungen erstellt werden. Beim Folienabhebe-Verfahren ist dies zwar nicht sehr sinnvoll, da eine Kontrolle nur zum Zeitpunkt der Herstellung durchgeführt werden kann, doch dies wurde bereits im Punkt *durchgehende Funktions-/Druckkontrolle* berücksichtigt. Deshalb kommen alle drei Verfahren auf die gleiche Punktzahl (3 Punkte).

## **Identifizierung**

Die Identifizierung des Produkts ist nur mit dem RFID-System möglich, weswegen dieses die Höchstpunktzahl (5 Punkte) erhält und die beiden anderen Systeme die niedrigste Punktzahl erhalten (1 Punkt).

## **Zuverlässigkeit**

Die Wartung und Lebensdauer der Systeme sind sehr ähnlich bzw. können beim Folienabhebe-Verfahren nicht verglichen werden. Deshalb wurde sich auf den Vergleich der Messunsicherheit beschränkt. Das Folienabhebe-Verfahren weist die geringste Messunsicherheit auf und erreicht deshalb die höchste Bewertung (5 Punkte). Die Messunsicherheit der beiden anderen Systeme ist ungefähr gleich und liegt ein wenig über der Messunsicherheit des Folienabhebe-Verfahrens, weswegen diese einen Punkt weniger (4 Punkte) erhalten.

## **Umwelt**

Weder bei der Entsorgung der Systeme noch bei Einflüssen auf die Gesundheit der Menschen lassen sich bei den drei Systemen gravierende Unterschiede feststellen. Deshalb erhalten alle Systeme die gleiche Wertung (3 Punkte).

## **Kompaktes System**

Die Kompaktheit des Va-Q-Checks und des RFID-Systems zeigen keine nennenswerten Unterschiede, da beide Systeme aus einem Lesegerät und Sensoren einer ähnlichen Größe bestehen (4 Punkte). Durch die benötigte Vakuumkammer ist das Folienabhebe-Verfahren hingegen wesentlich weniger kompakt (2 Punkte).

## **Günstiges Preis-Leistungsverhältnis**

Der Preis des RFID-Systems ist mit momentan 30 Euro pro Sensor relativ kostenintensiv (2 Punkte). Auch das Folienabhebe-Verfahren ist durch den hohen apparativen Aufwand und den hohen zeitlichen Aufwand recht kostspielig (2 Punkte). Der Va-Q-Check ist hingegen etwas kostengünstiger realisierbar und erhält deshalb einen Punkt mehr als die anderen beiden Systeme (3 Punkte).

## **Ableitung der Qualitätsmerkmale**

In diesem Schritt werden Produktmerkmale festgelegt, mit denen die Kundenanforderungen erfüllt werden sollen. Die Produktmerkmale werden zunächst in Oberbegriffe und Zugehörigkeitsbereiche eingeteilt, bevor die Produkteigenschaften näher spezifiziert werden. Wenn möglich, werden den Eigenschaften konkrete Zielwerte zugeordnet und die Optimierungsrichtung für eine künftige Weiterentwicklung der RFID-Sensorsysteme mit den folgenden Systemkomponenten festgelegt.

### a) RFID-Sensor-Transponder

*Druckmessung:* Mit einem Drucksensor, der an den RFID-Transponder gekoppelt ist soll der Innendruck des Panels gemessen werden.

*Temperaturmessung:* Da der Innendruck der VIP auch von der Temperatur abhängt, ist eine korrekte Beurteilung des Innendrucks nur unter der Berücksichtigung der Temperatur im Panel möglich. Deshalb soll der RFID-Transponder ebenfalls mit einem Temperatursensor ausgestattet werden.

*ID-Nummer:* Eine Funktion jedes RFID-Sensors ist die Speicherung einer Identifikationsnummer, die zur Wiedererkennung des Produkts dienen kann.

*Passive Energieversorgung:* Die Energieversorgung des Transponders soll passiv erfolgen, um so eine lange Lebensdauer und einen geringen Wartungsaufwand zu ermöglichen.

*Messunsicherheit:* Die Messunsicherheit der Sensoren sollte möglichst gering ausfallen. Ein Zielwert, der hierbei ausgegeben werden kann, ist eine Messunsicherheit von  $>0,5$  mbar.

#### b) Lesegerät

*Lesegerät und Antenne:* Das Lesegerät mit Antenne sollte sowohl funktionell als auch eine kompakte Größe haben.

*Software:* Das Lesegerät soll mit einer Software ausgestattet sein, die die Verarbeitung und Anzeige der Daten ermöglicht.

*Reichweite:* Die Auslesereichweite betrifft die Kombination aus Lesegerät und RFID-Sensor-Transponder. Sie sollte möglichst groß sein, um so den Auslesevorgang zu erleichtern. Als Zielwert können 0,20 m angegeben werden.

#### c) Informationssystem

*Software:* Das Informationssystem, das die Daten auswertet und verarbeitet, benötigt ebenfalls eine Software. Mit dieser sollen die Messergebnisse und sonstigen Daten übersichtlich für den Nutzer zur Verfügung gestellt werden.

*Datenbank:* Zur Verarbeitung einiger durch den RFID-Transponder gewonnenen Daten, werden zusätzliche Daten benötigt, die in einer Datenbank abgespeichert werden sollen.

#### d) Sonstiges

*RFID-Etiketten:* RFID-Etiketten bieten die Möglichkeit, die Kosten des RFID-Systems zu senken. In Anhang D wird eine Möglichkeit der genauen Verwendung der Etiketten beschrieben.

*Massenproduktionstauglich:* Eine Möglichkeit, ein neues Produkt kostengünstiger zu gestalten, ist die Massenproduktion. Materialkosten und Produktionskosten werden dabei reduziert.

*Markierung auf Abdeckungen:* Der Auslesevorgang kann durch eine Markierung auf der Abdeckung erleichtert werden.

*Recyclebar:* Die verwendeten Produkte sollen leicht entsorgbar und wenn möglich recyclebar sein.

### **Auswertung des House of Quality HoQ**

Ein wichtiger Punkt nach der Erstellung ist die Auswertung des HoQ. In den nachfolgenden Abschnitten wird dies für die verschiedenen Felder beschrieben.

Der **Vergleich zum Wettbewerb** aus Kundensicht zeigt, dass das RFID-System in den meisten Kundenanforderungen die Konkurrenzprodukte übertrifft oder zumindest gleichauf mit ihnen liegt. Eine Ausnahme stellt die Zuverlässigkeit aufgrund der etwas höheren Messunsicherheit im Vergleich zum Folienabhebe-Verfahren dar. Allerdings liegt die Messunsicherheit bereits auf einem ausreichend hohen Niveau, so dass hier kein Verbesserungspotential gesehen wird. Eine Kundenanforderung, an der hingegen etwas gearbeitet werden sollte, ist das Preis-Leistungsverhältnis. Zwar kann das RFID-System durch seine durchgehende Funktionskontrolle eine höhere Leistung als der Va-Q-Check erzielen, ist aber im Vergleich deutlich teurer als dieses Verfahren.

In der **Beziehungsmatrix** kann erkannt werden, dass jede Kundenanforderung mindestens einem Produktmerkmal zugeordnet werden kann. Auch umgekehrt kann jedes Produktmerkmal mindestens einer Kundenanforderung zugeordnet werden. Dies zeigt, dass in der Matrix weder unnötigen Produktmerkmale noch unwichtige Kundenanforderung aufgeführt wurden. Eine nähere Betrachtung der stark gewichteten Kundenanforderungen zeigt, dass diese von den Produktmerkmalen besonders stark erfüllt werden. Die wesentlichen Forderungen werden somit ausreichend wiedergegeben. Die Wechselbeziehun-

gen im „Dach“ des HoQ widersprechen sich kaum. Nur zweimal gibt es einen Zielkonflikt. Zum einen ist das bei der Reichweite des RFID-Systems der Fall, die durch eine Komprimierung der Antenne eventuell reduziert werden könnte. Hier gilt es einen Kompromiss zu finden, wobei die Funktionstüchtigkeit wichtiger eingestuft wird als der Komfort eines besonders handlichen Systems. Zum anderen ist mit dem in Anhang D beschriebenen Einsatz von RFID-Etiketten keine durchgehende Funktionskontrolle bei allen Paneelen möglich bzw. keine Druckmessung bei diesen Paneelen möglich. Vor dem Einsatz des Systems (in Kombination mit den RFID-Etiketten) muss über den genauen Einsatzzweck und die damit verbundenen Erwartungen an das System entschieden werden.

Der **technische Produktvergleich** zeigt, dass die Produktmerkmale des RFID-Systems, die eine Kundenanforderung mit hoher Gewichtung widerspiegeln, in den meisten Fällen den Konkurrenzprodukten überlegen sind. Ein Produktmerkmal, bei dem dies nicht der Fall ist, ist die Messunsicherheit. Wie oben bereits erwähnt, ist die Messunsicherheit schon auf einem sehr hohen Niveau und für die Anwendung bei VIP ausreichend. Allerdings kann sie eventuell durch genauere Sensoren noch verbessert werden. Ein weiteres Produktmerkmal bei dem ein Konkurrenzprodukt über dem RFID-System liegt, ist die **Massenproduktions-tauglichkeit**. Sowohl das RFID-System als auch der Va-Q-Check sind massenproduktions-tauglich. Die Berücksichtigung der **Kosten** zeigt aber, dass der Va-Q-Check kostengünstiger herzustellen ist. Beim Kostenfaktor des RFID-Systems besteht somit noch Verbesserungsbedarf. Die restlichen Produktmerkmale liegen aber entweder über den Konkurrenzprodukten oder zumindest gleichauf. Hervorzuheben ist, dass das RFID-System das einzige System ist, mit dem eine durchgehende **Funktionskontrolle** möglich ist. In diesem Punkt würde das System eine momentane Monopolstellung einnehmen.

Die Auswertung der **technischen Bedeutung** hebt die Wichtigkeit der Sensoren, die an den RFID-Transponder angeschlossen sind hervor. Die Energieversorgung des Sensors und die Messunsicherheit spielen ebenfalls eine wichtige Rolle. Danach folgen Produktmerkmale, die den Komfort (Kompaktheit und Reichweite) sowie einen Einfluss auf den Preis des Systems widerspiegeln.

Die QFD-Untersuchung zeigt, dass das bestehende RFID-Kontrollsystem bereits sehr gut auf die Kundenansprüche abgestimmt ist. Die wesentlichen Kundenanforderungen werden durch das RFID-System aber besonders gut erfüllt. Außerdem zeigt das QFD die kritischen Punkte des Systems, an denen noch Verbesserungspotential besteht. Vor allem der Kostenaspekt stellte sich als Schwachstelle heraus. Allerdings muss hierbei der Mehrnutzen des Systems entgegengesetzt werden, der durch die durchgehende Funktionskontrolle der VIP nachgewiesen werden kann. Der Produktvergleich zeigt, dass kein anderes System eine Funktionskontrolle der VIP im verbauten Zustand gewährleisten kann, dieser Bedarf beim Kunden aber durchaus vorhanden ist.

### 8.3 Kosten der RFID-Sensor-Transponder

Die Preise eines einzelnen RFID-Transponders sind derzeit abhängig von der Bauart des Transponders und der Art, Speichergröße und Integration des verwendeten Mikrochips. Diese liegen derzeit im Bereich von wenigen Cents für einen einfachen passiven HF-Transponder bis hin zu 50 €/Stück für einen Sensortransponder mit Batterie, siehe Tabelle 12. Auch bei den Lesegeräten variieren die Kosten zwischen 50 € und 5.000 € pro Stück. Es wird zwar erwartet, dass bei steigender Stückzahl und Massenbestellungen auch die Preise sinken, dennoch sollte beachtet werden, dass weitere, kaum kalkulierbare Kosten für die Einrichtung einer Infrastruktur hinzukommen. Dazu gehören vor allem Investitionskosten

in Datenbanken, Software, Implementierung, Standardisierung, Instandhaltung und Schulungen. Im Fall des Pilotprojektes am Frankfurter Flughafen<sup>58</sup> betrug der Aufwand für die Implementierung ca. 200.000 € und zwei Mannjahre für Analyse und Projektleitung der Umstellung auf die RFID-Funktechnik. All dem gegenüber steht natürlich der Mehrnutzen der Technik. Ob sich eine Implementierung eines RFID-Systems wirtschaftlich bezahlt macht, muss projektbezogen im Rahmen einer Kosten-Nutzen-Analyse entschieden werden. Denn die Anforderungen und Voraussetzungen und somit auch die notwendige RFID-Technologie sind je nach Branche und Verwendung sehr unterschiedlich.

Ein weiteres wichtiges Kriterium für die Preise der RFID-Transponder sind der Erfolg und die Durchsetzung der Standardisierung in der RFID-Technologie. Zwar schreitet diese stetig voran [13], auch durch die Arbeit des internationalen Konsortiums GS1 in Normungsgremien und der Schaffung von Konzepten wie EPCglobal [14], dennoch fehlt in vielen Teilbereichen noch ein frequenzübergreifender, international geschaffener Standard zur Lösung von Schnittstellenproblemen und zur sicheren Implementierung von Soft- und Hardware. Das Beispiel der Bündelung von Frequenzen im sog. Quad-Band bei Mobiltelefon hat vor Jahren die Möglichkeit eröffnet, weltweit mit denselben Geräten Kommunikation zu betreiben; dadurch stiegen die Nutzungsmöglichkeiten und die Absatzzahlen und die Preise sanken deutlich. Ein ähnlicher Effekt wäre kurzfristig bei den Lesegeräten zu erwarten, wenn die Universalität der heutigen Smartphones mit den Readern für unterschiedliche Anwendungen einfach gekoppelt würde (siehe auch Kap. 4.2). Denn nur in Kombination mit den vom Nutzer sowieso zu pflegenden Geräte (wie Mobiltelefon oder Tablet-PC) kommen RFID-Anwendungen für die Logistik heute schon auf günstige Kosten-Nutzen-Relationen. Für die untersuchten RFID-Drucksensor-Transponder in den VIP-Dämmelementen sind die Stückkosten durch eine Großserienfertigung nur dann auf kleiner 5 € zu bekommen, wenn sich überregional die Hersteller von VIP auf eine solche RFID-Sensortechnik einigen können. Hierzu gehören auch die Zusatzaufwendungen für die Kalibrierung vor Ort in den VIP-Herstellanlagen und das Handling von mobilen Readern. Ein erster Ansatz für eine Abstimmung innerhalb der VIP-Hersteller ist durch eine Interessensgemeinschaft „IG-VIP-Sens“ und Normungsaktivitäten in CEN TC 88 WG 21 gemacht. Aus den möglichen „Sammelbestellungen“ leiten sich auch Reduzierungen der Kosten für die LF-Lesegeräte ab (siehe Kap. 9.3).

<sup>58</sup> Siehe [36] und Umstellung auf RFID-Ausweis-Sicherheitssystem unter [http://www.primion.de/fileadmin/primion/Downloads/Presse/Pressemitteilungen\\_2011/Frankfurt\\_Flughafen\\_Sicherheitsystem\\_102011.pdf](http://www.primion.de/fileadmin/primion/Downloads/Presse/Pressemitteilungen_2011/Frankfurt_Flughafen_Sicherheitsystem_102011.pdf)



Tabelle 12: Übersicht zu Kosten/ Preise für RFID-Sensor-Transpondersysteme (Beispiele) Stand: September 2012

Anbieter	Bezeichnung	Sensor	Typ / Frequenz / Standard	Tag-Preis bei 100 Stück 1) (EUR)	Tag-Preis bei 1000 Stück 1) (EUR)	Tag-Preis bei 100.000 Stück 1) (EUR)	Reader: Typ / ca.-Preis (EUR)
microsensys, Erfurt	Telid®211	Temperatur	Passiv / HF/ ISO 14443	18,00	12,39	k.A.	iID-3000 / k.A. 2), 3)
microsensys, Erfurt	Telid®257	Feuchte, Temperatur	Passiv / HF/ ISO 14443	7,20	6,10	k.A.	iID-3000 / k.A. 3)
microsensys, Erfurt	Telid®242	Druck, Temperatur	Passiv / HF/ ISO 14443	39,00	k.A.	k.A.	iID-3000 / k.A. 3)
microsensys, Erfurt	Telid®354	Feuchte, Temperatur	Semi-passiv / HF/ ISO 14443	103,08	84,70	k.A.	iID-3000 / k.A. 3)
microsensys, Erfurt	Telid®412	Temperatur	Passiv / UHF/ ISO 18000-6	9,90	8,39	k.A.	iID-4000 / k.A. 3)
Fraunhofer IMS	Query-p-VIP	Druck, Temperatur	Passiv / LF / proprietär	42,00	19,50	5,00	IMS-Tiny/ 480 3) AEG-H5/ 1200 4)
Fraunhofer IMS	Query-p-H	Feuchte, Temperatur	Passiv / LF / proprietär	45,00	19,50	k.A.	IMS-Tiny/ 480 3) AEG-H5/ 1200 4)
Fraunhofer IMS	Query-s-T	Temperatur	Semi-passiv/ HF / ISO 15693	25,00	k.A.	k.A.	Scemtec/ 800 4)
Fraunhofer IMS	Query-s-BV	Beschleunigung, Temperatur	Semi-passiv/ LF / Tiris	98,00	k.A.	k.A.	Query-R-BV/ 300 3)
Fraunhofer IMS	Query-a-XB	Feuchte, Licht, Temperatur	Aktiv/ LF / ZigBee	78,00	k.A.	k.A.	Query-R-XB / 300 3)
Fraunhofer IMS	Query-p-UT	Temperatur	Passiv / UHF / ISO 18000-6	12,00	7,50	k.A.	Feig/ 450 4)

Fußnote: 1) bei Abnahme von x Stück in einem Auftrag 2) Typ iID von Fa. microsensys, Erfurt. 3) Short-Range 4) Mid-Range (gemäß Tabelle 1)

## 9 Umsetzung und Integration in künftige Projekte

Die technischen Grundlagen für eine Anwendung der RFID-Sensor-Technik zur Überwachung von Bauteilen an Gebäuden oder technischen Anlagen wie Lüftungsleitungen sind verfügbar. Für die Umsetzung in die Baupraxis bedarf es noch weiterer Entwicklungsarbeiten zu:

- Funkübertragung und Steigerung der Reichweite,
- Verbindung von RFID- und Sensortechnologie,
- Speichergröße und Energieversorgung,
- Anbindung an die GLT und Visualisierung,
- Reduzierung der Kosten für die Hardware, Software und die Implementierung in eine vorhandene, meist konservative Prozessumgebung.

### 9.1 Integration in weiterführende Fraunhofer-Projekte

Die Erprobung und Umsetzung der RFID-Drucksensor-Transponder in Vakuum-Dämmpaneelen geht in der o.g. Interessensgemeinschaft IG-VIP-Sens weiter. Die Erfahrungen und Erkenntnisse aus den Kalibrier- und Praxisuntersuchungen lassen sich auch in weiteren Projekten umsetzen; die folgenden Beispiele zeigen dies.

#### 9.1.1 Betonsensor

Im Rahmen eines Fraunhofer-F+E-Projekts wird ein passiver Sensortransponder zur Früherkennung von Korrosion an Stahlbetonbauteilen einwickelt und erprobt. In Bauwerken wie Brücken, Parkhäuser, Kühltürme und Kaimauern treten verstärkt frühzeitige Schädigung der Stahlbetonteile durch eindringende Salze auf. Diese korrodieren die Stahlbewehrung und erfordern kostenintensive Reparaturen. Das hier entwickelte System basiert auf dem Prinzip der „Stellvertreterkorrosion“ und erkennt frühzeitig das Eindringen einer Salzionenfront. Der Sensortransponder arbeitet passiv und ermittelt bei der Auslesung die Impedanz der Messdrähte, siehe Bild 88. Die Impedanz lässt auf die Lage der eindringenden Ionenfront rückschließen. In einem Bauwerk werden die Sensortransponder an neuralgischen Stellen an der Bewehrung angebracht und können in der Betriebsphase bei den periodisch durchzuführenden Wartungsarbeiten mit einem mobilen RFID-Lesegerät drahtlos erfasst und ausgewertet werden, bei Brücken beispielsweise jährlich.

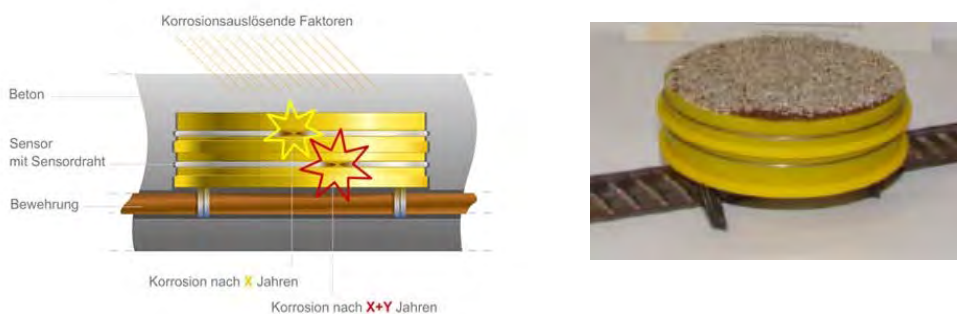


Bild 88: Funktionsprinzip und Ansicht des Betonsensors auf einem Stahlstab (Quelle: <sup>59</sup>).

<sup>59</sup> Industriepartner der Betonsensorentwicklung <http://www.bs2-sicherheitssysteme.de/>, zuletzt aufgerufen am 30.09.2012.

Im Mai 2013 erfolgt der erste Pilotversuch in einem Parkhaus in Koblenz und im Oktober 2013 in einer Kaimauer im Hafen vom Rotterdam. Dort werden etwa je 100 Sensoren eingebaut, die zu Teil auch unter der Wasseroberfläche auslesbar sein müssen. Die Erfahrungen aus dem Projekt RFID-Sensor bilden hierbei die solide Grundlage für die Entwicklung des Betonsensor-Systems und helfen eine schnelle und risikominimierte Umsetzung des Konzepts in einen Sensortransponder durchzuführen.

### **9.1.2 Wärmespeicher mit Dämmung mittels VIP**

In einem Forschungsprojekt der FH Nürnberg werden Vakuum-Isolationspaneele (VIP) für Energie-effizientere Warmwasser-Wärmespeicher eingesetzt und die Tauglichkeit der VIPs untersucht. Neben der Wärmedämmwirkung sind auch weitere Faktoren wie Wasserdruck auf das Paneel und die deutlich höheren Umgebungstemperaturen wesentlich für die Langzeitfunktion des Energiespeichers. Hier wird mit Hilfe der im Projekt RFID-Sensor weiterentwickelten VIP-Sensoren das Monitoring der VIPs deutlich vereinfacht. In dem Projekt wurde im Frühjahr 2012 der erste Aufbau eines Wärmespeichers mit den VIPs und eingebauten Sensoren realisiert. Die Bauelemente sollen bis in Temperaturbereiche von 85 °C belastet werden; weitere Untersuchungen laufen<sup>60</sup>.

### **9.1.3 Feuchtekontrolle bei Sanierungen mit Innendämmung**

Durch Bauteilfeuchte kommt es oft in Zusammenhang mit handwerklich nicht korrekt ausgeführter Dämmung oder Abdichtung zu immensen Schäden in Gebäuden. Wenn Bauteile mit RFID-Sensortransponder ausgestattet sind, kann dies dazu beitragen einen Teil dieser Schäden zu verhindern. Das Einsatzgebiet der in Kap. 6.2 beschriebenen passiven RFID-Feuchtesensor-Transponder ist vor allem bei Dämmsystemen interessant, bei denen die Transponder im Nachhinein i. a. nicht mehr zugänglich sind. Für die Anwendung einer raumseitigen Innendämmung mit VIPs laufen mit Herstellern weitere Praxisuntersuchungen zum Langzeitverhalten der Feuchte- und Temperatursensor-Transponder im Fraunhofer-Demonstrationsgebäude InHaus-1, Duisburg.

Die Untersuchungen an Testfassaden im Fraunhofer IBP, Stuttgart sollen sowohl mit den passiven LF- als auch mit den aktiven GHz-Feuchtetranspondern fortgeführt werden. Hierbei stehen vor allem baupraktische Fragen wie die repräsentative Auswahl des Montageorts oder der Datenauslesung über einen langen Zeitraum im Fokus. Dies wird in enger Zusammenarbeit mit Hardwareanbietern zu lösen sein. Wenn die Bauteile gut zugänglich sind oder die Sensordaten nur in einem kürzeren Zeitraum von z.B. 2 bis 5 Jahren zur Verfügung stehen sollen, ist der Einsatz von aktiven RFID-Sensor-Transpondern sinnvoll. Der Vorteil dieser RFID-Sensornetz-Technik ist die hohe Flexibilität für eine nachträgliche Aufrüstung von Gebäuden mit der einfachen Vernetzung anderer Funktionen wie in Kapitel 6.3.3 beschriebene Anbindung an die Gebäudeautomation. Hierzu laufen Kooperationen mit Anbietern von modularer GA-Software<sup>61</sup> zur Integration der bauphysikalischen Bewertung von RFID-Daten aus Fassaden in die Haustechnik.

<sup>60</sup> Georg-Simon-Ohm-Hochschule Nürnberg, [http://www.ohm-hochschule.de/fileadmin/Kompetenzzentren/Energietechnik/PDFs/110500\\_OTTI\\_Solarthermie\\_21\\_Fuchs\\_Final.pdf](http://www.ohm-hochschule.de/fileadmin/Kompetenzzentren/Energietechnik/PDFs/110500_OTTI_Solarthermie_21_Fuchs_Final.pdf)

<sup>61</sup> U.a. Fa. Eberle, Eltal-Auerbach, <http://www.fe-tronic.de/img/download/Innovationen.pdf> und <http://www.fe-tronic.de/img/download/Fenster-Tueren-digitalSTROM.pdf>

## 9.2 Umsetzung in der ARGE RFIDimBau

In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern der ARGE RFIDimBau ist geplant, die gesamte Nutzenkette in der RFID-Anwendung von der Ausschreibung über die Baulogistik, Rohbaustellenerstellung bis zum Gebäudebetrieb/FM und zur Wiederverwendung von Bauprodukten oder Recycling auch mit den Ergebnissen aus dem Projekt „RFID-Sensor - Energie, Hygiene, Sicherheit“ zu spiegeln. Das 2011 beim BMVBS/BBSR beantragte sog. „Schnittstellen“-Projekt soll in 2012 begonnen werden<sup>62</sup>. Das wesentliche Element zur Kopplung der bisherigen Teilprojekte als Insellösungen stellt darin die RFID-Bau-Datenbank dar. Dort sind die Kennwerte aus der Standard-Bausoftware über die BIM-Programme mit denen aus dem Digitalen Bautagebuch (DEBt) und weiteren Datenbanken der Bauproduktanbieter zu verbinden. Über kommerzielle Standards zum Datenaustausch soll die Kommunikation als Webservice den Baubeteiligten eingerichtet sein (Bild 89). Für den Bereich des bauphysikalischen Bauteil-Monitorings mit Hilfe von RFID-Sensor-Transpondern in der LF- und UHF-/GHz-Technik stehen die Fraunhofer-Institute IBP und IMS bereit, die vorliegenden Ergebnisse und Erfahrungen in das ARGE-Schnittstellen-Projekt zu integrieren.

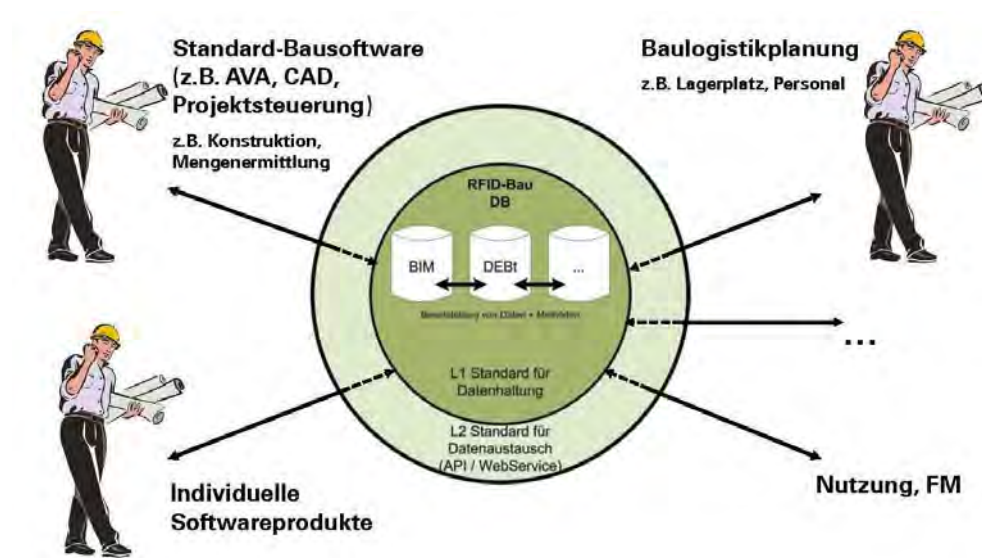


Bild 89: Schematische Darstellung der Datenvernetzung bei Bau-Prozessen, aus Wagner [8].

## 9.3 Umsetzung mit Hardware- und Software-Herstellern

Aus den Untersuchungen mit den Prototyp-Sensor-Transpondern und den Lesegeräten für die Nahfeld-LF-Technik war zu folgern, dass eine 2. Generation von Geräten mit bautaughlichen Eigenschaften nur in Zusammenarbeit mit kommerziellen Geräteherstellern machbar ist. Dies führte 2011 zur Abstimmung mit den Herstellern der VIP-Bauelemente, um die gewünschte Anzahl an Lesegeräten zu recherchieren und die Bedarfe an Sensoren, Kalibriereinrichtungen etc. zu bestimmen. Die Kooperation mit dem Hersteller des favorisierten Lesegerät ARE-H5, AEG-ID, Ulm gestaltete sich als zeitaufwändig, da die Bereitschaft, das Gerät zu mo-

<sup>62</sup> Nach telefonischem Hinweis von G. Hagel, 20.08.2012 und Prof. M. Helmus, 02.10.2012

difizieren, gering war. Dies lag u.a. an den nur spärlich gegebenen Zusagen aus dem Kreis der VIP-Hersteller, größere Mengen der Geräte abzunehmen solange die Tests nicht erfolgreich waren; diese hingen wiederum an der Gerätemodifikation, die erst im Oktober 2012 erfolgreich gelang. In der Zwischenzeit wurde ein kleineres Lesegerät „Tiny“ im IMS erprobt und in Duisburg und Stuttgart für die Demonstrationen eingesetzt, das für Demonstrationszwecke gut geeignet ist jedoch noch nicht alle Anforderungen an die Robustheit im Baubetrieb befriedigt.

Seit einigen Monaten gibt es ein kommerzielles Lesegerät als bautaughches Smartphone mit aufsteckbarer HF-/UHF-Antenne, das angeblich den EPC-Standard und die Geräteschutzklasse IP65 befriedigt „CILICo cm380“<sup>63</sup>. Eine Geräterprobung steht noch aus. Weitere Hinweise auf neue Messgeräte wie das System „FensterCheck/ Ug-lass“<sup>64</sup> zur Bestimmung des U-Wertes von Verglasungen am Gebäude oder der Prüfung des Gasfüllgrads mittels chemischem Licht-Sensor zur Vorort-Prüfung von Fenstern, Fassaden etc. zeigen Potentiale für die Kombination mit RFID-Sensor-Tags zu einem bautaughchen Monitoring-System.

#### **9.4 Umsetzung zur Marktkontrolle in der Bauprodukt-Kennzeichnung**

Die elektronische Kennzeichnung und ein Bauteil-Monitoring mit Hilfe der RFID-Sensortechnik könnten helfen, die Gebäude über die Jahrzehnte der Nutzung auf einem hohen technischen Stand zu halten. Die Chance dazu besteht, wenn dem Planer und Investor vor Ort und aktuell an seinem PC oder Smartphone aufgezeigt wird, in welchem Zustand die Bauteile sind. Dieses transparente und objektbezogene Darstellen des Vorteils, den man durch qualitativ höherwertige Bauprodukte erreichen kann (beim Neubau als auch bei der Sanierung und Austausch von Bauteilen beim Altbau), ist ein wesentlicher Aspekt zum nachhaltigen Bauen d.h. im Wärme- und Klimaschutz. Somit ist ein Bedarf für neue, andere Kennwerte zur Datenqualität gegeben, nämlich für die Nachvollziehbarkeit zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Für eine Investitionsentscheidung zu Baubeginn liegen i. a. ganz andere Daten und Definitionen zum Wärmeschutz vor („Passivhausniveau“ oder „KfW-40-Standard“) als zur Werkplanung und Bauvergabe. Doch der Investor will sein Zertifikat zum Passivhaus oder zur Nachhaltigkeit vorab (für die Finanzierung/ Banken) und erst später bei der Bauausführung an den Details entscheidet sich, ob die in der Vorplanung angesetzten Kennwerte auch eingehalten sind. Die elektronische, digitale Gebäudeakte kann mit Hilfe der RFID-Technik entstehen und dann bei der Bauübergabe dem Investor aber auch der Bauaufsicht als CD-ROM zusammen mit der „goldenen Nachhaltigkeitsplakette“ übergeben werden.

Die RFID- Technik enthält in der verknüpften Datenbank mit der qualitativen Beschreibung der Bauprodukte und deren Eigenschaften zu Wechselwirkungen wie Korrosion, Materialunverträglichkeit oder Schadstoffhinweisen Chancen in der Anwendung zur Qualitätssicherung komplexer Bauteile und ganzer Bausysteme. Einmal zur CE-Kennzeichnung nach den europäisch harmonisierten Anforderungs- und Leistungsklassen der Einzelbauteile zum Nachweis der Gleichwertigkeit von Produkten. Zweitens zur Verknüpfung der Kennzahlen der gelieferten Bauteile in der Baukonstruktionsebene und somit zur Bauüberprüfung z.B. nach der Richtlinie des Bundes für die Überwachung der Verkehrssicherheit [41]. Die Möglichkeiten eines automatisierten Gebäudemonitorings (vgl. Kap. 8.1) das alle wesentlichen Bauprodukte eines Bausystems nachvollziehbar beschreibt trägt somit auch zur Marktüberwachung und Stär-

<sup>63</sup> Anbieter CILICo cm380, siehe in <http://www.cilico.us/product/ultra-distance-uhf-rfid-tablet.html>

<sup>64</sup> Siehe unter <http://www.fenstercheck.info/infos.htm>, Hersteller Fa. Netzsch.

kung der CE-Kennzeichnung bei. Dies fordert die EU-Kommission aktuell im Mandat M-480 zur Vereinfachung des Warenverkehrs bei Bauprodukten und bei der Novellierung der Regeln zur Bestimmung der Gebäude-Energieeffizienz nach EPBD.

## **9.5 Umsetzung mit der Bauwirtschaft**

Die ARGE RFIDimBau hat frühzeitig mit der Bauwirtschaft und den Bauverbänden Kontakt aufgenommen, um die Chancen und Risiken der Einführung von RFID-Techniken in den Bauprozessen zu hören und zu verstehen. Durch die Teilnahme wesentlicher Vertreter in der projektbegleitenden Arbeitsgruppe (siehe Liste Kap. 1) sind im Lenkungsausschuss der ARGE viele Diskussionen geführt und Möglichkeiten zur Vermeidung der „gläsernen Baustelle“ erörtert worden. Die Umsetzungen in den Demonstratoren und in Feldversuchen zusammen mit den Baubeteiligten sind in den Teilberichte der ARGE-Partner nachzulesen. Viele dieser Inselösungen sind mit den jeweiligen Partnerfirmen realisiert und stützen sich auf RFID-Hardware aus anderen Branchen. Im Bereich der Software werden Weiter- und Neuentwicklungen vorgestellt. Bei den RFID-Sensortranspondern und Lesegeräte waren zum Projektbeginn keine baugerechten Bauteile bekannt (siehe Kap. 4 und 9.3), weshalb die Erprobung der angepassten Prototypen zusammen mit den Partnerfirmen erst in 2012 begann. Eine Demonstration in den Schulungszentren, bei Energieberatungsstellen und in Fachschulen zum Kennenlernen und Interessewecken ist für 2013 vorgesehen.

Die Ideen zur verknüpften Präsentation einer ganzheitlichen Lösung für den Datentransport aus der Planung bis zum Gebäudebetrieb und zum Recycling sind im geplanten Schnittstellenprojekt der ARGE dargestellt (Kap.9.2). Wir erwarten, dass erst mit dem Abschluss des Schnittstellenprojekts ein wesentlich günstigeres Kosten-Nutzen-Verhältnis des Einsatzes von RFID-Techniken im durchgängigen Bauprozess aufgezeigt werden kann. Dann werden auch durch die derzeit zunehmenden RFID-Anwendungen in anderen Branchen die Vorbehalte geringer und die Chancen für die Bauwirtschaft gestärkt wahrgenommen werden.

## **9.6 Publikationen, Internet, Seminare, Messen**

Ein wesentlicher Anstoß zum Projekt RFID-Sensor – Energie, Hygiene, Sicherheit kam aus der im Fraunhofer IMS vorhandenen Kompetenz zur Integration von Druck- und Feuchtesensoren in RFID-Transpondern. Diese Erfahrung wurde seit 2007 dort weiterentwickelt und als 2008 umsetzungsreife Prototypen zur Verfügung standen, konnte das Projekt zur bauphysikalischen Erprobung in VIP-Fassaden starten. Die bis 2012 erschienenen Publikationen der Projektpartner zum Thema RFID-Sensor sind in Kap. 10.6 gelistet.

Bei den Messe-Veranstaltungen wie BAU in München, DEUBAU in Essen, EuroID in Berlin und Köln waren die Projektbeteiligte am ARGE RFIDimBau-Gemeinschaftsstand mit vertreten oder engagierten sich zusammen mit anderen Fraunhofer-Instituten, um die Anwendungen zur RFID-Sensortechnik zu zeigen. Am 17.03.2011 veranstaltete in Berlin das BBR ein eigenes Seminar zum Thema Anwendung der Vakuumdämmung im Bauwesen, bei dem auch die RFID-Sensortechnik mit Prototypen demonstriert wurde. Weitere Veranstaltungen mit Fraunhofer-Beiträgen zum Thema waren der BMVBS-Bauforschungskongress 2010 in Berlin, Baubetrieb-BBB-Kongress 2011 in Dresden, Bauphysik-Kongress 2011 in Weimar, Smart-Sys-Tech-Kongress 2012 in München u.a.

Die ständige Präsentation der Projektziele und Ergebnisse zum Fraunhofer-Teilprojekt RFID-Sensor ist auf der gemeinsamen Internetseite der ARGE RFIDimBau für Jedermann abrufbar unter [http://www.rfidimbau.de/index.php/de/forschungsvorhaben\\_fraunhofer/vorhaben](http://www.rfidimbau.de/index.php/de/forschungsvorhaben_fraunhofer/vorhaben).



## 10 Weiterführende Hinweise und Dokumente

### 10.1 Übersicht zu den verwendeten RFID-Systemen

Übersicht zu den verwendeten Komponenten der RFID-Systeme als Prototypen, der Messgeräte und deren IP-Klassifizierung.

RFID – Druck-/ Feuchtesensoren: IMS Duisburg	IP-Klasse 65
RFID – Lesegeräte:	
LF-Reader IMS-V2.0 mit Antenne HG	IP-Klasse 65
Seriennummer: VIP-Lg Hw4.1-2 + V3.2-6	
Seriennummer: VIP-Lg Hw4.1-3 + V3.2-12	
GHz-Reader IMS-CS-Basis V2	IP-Klasse 63
LF-Reader AEG ARE H5, siehe Anhang E1	IP-Klasse 54
GHz-Reader X-Bee-USB + Wall-Router	IP-Klasse 40
Labor-Kalibriergerät IMS-Calibra DS V3.2	
Messdatenerfassungs-/Schaltssystem, Hewlett Packard, Agilent HP34970A	
Thermoelemente, Typ T und Typ U	
Klimakammer, Vötsch Industrietechnik, Typ VCZ 70004-2/S	
Hinweise zur Bautaughkeit, IP-Schutzklassen (Bild 90)	

Code Buchstaben (International Protection)			Erste Kennziffer (Schutz gegen feste Fremdkörper)			Zweite Kennziffer (Schutz gegen Wasser)		
IP			6			5		
Kennziffer	Schutzumfang		Kennziffer	Schutzumfang				
0	Kein Schutz		0	Kein Berührungsschutz, kein Schutz gegen feste Fremdkörper	Kein Wasserschutz			
1	Schutz gegen große Fremdkörper		1	Schutz gegen großflächige Berührung mit der Hand Schutz gegen Fremdkörper $\varnothing > 50 \text{ mm}$	Schutz gegen senkrecht fallende Wassertropfen			
2	Schutz gegen mittelgroße Fremdkörper		2	Schutz gegen Berührung mit den Fingern Schutz gegen Fremdkörper $\varnothing > 12 \text{ mm}$	Schutz gegen schräg fallende Wassertropfen (beliebiger Winkel bis zu 15° zur Senkrechten)			
3	Schutz gegen kleine Fremdkörper		3	Schutz gegen Berührung mit Werkzeug, Drähten o. ä. mit $\varnothing > 2,5 \text{ mm}$ Schutz gegen Fremdkörper $\varnothing > 2,5 \text{ mm}$	Schutz gegen Wasser aus beliebigem Winkel bis zu 60° aus der Senkrechten			
4	Schutz gegen kornförmige Fremdkörper		4	wie 3, jedoch $\varnothing > 1 \text{ mm}$	Schutz gegen Spritzwasser aus allen Richtungen			
5	Schutz gegen Staubablagerungen		5	Schutz gegen Berührung Schutz gegen Staubablagerung im Inneren	Schutz gegen Wasserstrahl (Düse) aus beliebigem Winkel			
6	Schutz gegen Staubeintritt		6	Vollständiger Schutz gegen Berührung Schutz gegen Eindringen von Staub	Schutz gegen vorübergehende Überflutung			
			7	Schutz gegen Eintauchen	Schutz gegen Wassereindringung bei zeitweisem Eintauchen			
			8	Schutz gegen Untertauchen	Schutz gegen Druckwasser bei dauerndem Untertauchen			

Darstellung in Anlehnung an DIN EN 60529, IEC 60529

Bild 90: IP-Schutzklassen bei Elektrogeräten

## 10.2 Messungen mit unterschiedlichen Abdeckmaterialien

Tabelle 13: Beispiele für Leseabstände des IMS-Readers mit der Antenne IMS-V2.0 bis zum VIP-Drucksensor für verschiedene Deckmaterialien über dem Bauteil VIP-B.

Hinweis: „nicht möglich“ = es war kein Ausleseversuch erfolgreich,  
 „-“ = Messung wurde nicht durchgeführt.

Variante	VIP B (verbaut)									
	2B; Stativ		1A; Stativ		1A; handgehalten		2B; handgehalten			
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
	Abstand [mm]									
ohne	26	114	19	100	9	76	29	126		
10 mm EPS (vorne EPS)	36	68	40	64	44	49	42	52		
10 mm EPS (vorne Alu)	nicht möglich		nicht möglich		nicht möglich		nicht möglich		nicht möglich	
15 mm XPS	37	99	34	101	19	68	42	87		
21 mm XPS	35	75	40	92	25	70	30	97		
20 mm Holz	32	119	24	79	-	-	-	-		
13 mm GK	32	119	17	79	-	-	-	-		
1 mm Metall	nicht möglich		nicht möglich		-	-	-	-		
0,5 mm Alufolie	nicht möglich		nicht möglich		-	-	-	-		

### 10.3 Messwerte aus RFID-Drucksensoren im Saugheber-Versuch

Tabelle 14: Messwerte von VIP-Drucksensoren 1, 2, 3.

Sensor	Umgebungsdruck	Zwischenzustand	minimaler Unterdruck
	[mbar]		
<b>Sensor 1 (0188112c)</b>	968.28	277.87	198.70
	968.13	276.55	195.01
	967.90	277.71	196.68
	967.21	277.71	198.69
	967.99	276.13	196.43
	967.33	526.64	194.97
	967.69	530.00	196.92
	968.63	532.64	198.48
	968.06	533.61	198.92
	968.47	533.68	200.04
	967.69	296.48	189.64
	967.75	297.03	192.06
	968.87	296.73	194.52
	968.78	296.58	192.39
	967.89	298.13	194.71
<b>Sensor 2 (0188050e)</b>	967.93	671.74	198.59
	967.89	667.57	199.59
	968.34	666.45	199.07
	967.37	666.51	199.11
	967.81	667.62	199.98
	967.43	267.71	196.90
	967.31	269.10	198.36
	968.17	268.58	196.40
	968.28	269.57	193.99
	967.79	268.24	194.77
	967.86	311.46	197.67
	967.20	311.53	198.61
	967.47	311.09	200.74
	968.06	311.20	198.60
	968.06	311.37	196.22
<b>Sensor 3 (1880418)</b>	967.09	276.06	189.38
	967.74	278.35	193.29
	967.64	278.05	195.51
	966.82	279.99	197.31
	967.49	282.10	195.05
	968.03	369.48	193.70
	967.93	369.81	196.52
	967.60	371.44	193.29
	968.03	371.34	194.33
	966.94	372.66	192.63
	967.86	248.43	187.52
	967.69	246.79	189.72
	967.37	248.27	187.13
	967.21	247.40	188.91
	967.72	248.63	189.23

## 10.4 Beispiele für RFID-Etiketten

Die hier vorgestellten RFID-Transponder mit Druck- und Temperatursensoren zur Qualitätskontrolle von Vakuuminisationspaneelen oder mit Feuchte- und Temperatursensoren zur Material- und Bauteilüberwachung sind durch den Stückpreis der Sensor-Tags mit integriertem Mikrocontroller in Kleinserien von ca. 10 bis 104 € momentan noch relativ teuer (siehe Tabelle in Kap. 8.3). Eine Möglichkeit die Kosten der elektronischen Kennzeichnung von Bauteilen mit Monitoring-Funktion zu reduzieren, ist die Ergänzung mit anderen Etiketten, die sowieso vorgeschrieben sind und/oder mit einfachen RFID-Ident-Etiketten. Diese Ident-Transponder, wie in Kapitel 3.4 beschrieben, können als bedruckte Klebeetiketten ausgeführt werden und lassen sich mit üblichen CE-Etiketten kombinieren.

Das dargestellte Etikett (Bild 91) wurde anhand eines bestehenden Etiketts von einem verwendeten VIP der Firma va-Q-tec bedruckt. Es wird in dieser Form bisher nicht kommerziell eingesetzt. Der ebenfalls auf das Etikett gedruckte Barcode ist für die Übergangszeit der Umstellung auf das RFID-System gedacht. Als Kennzeichnung der RFID-Technik wurde zum einen das Siegerlogo des Wettbewerbs „RFID zeigt Gesicht“ verwendet<sup>65</sup>, zum anderen das seit 2010 nach ISO/IEC 29160 genormte Emblem.



Bild 91: Beispiel für ein RFID-Etikett auf einem VIP der Firma va-q-tec (links) und RFID-Emblem nach ISO-IEC 29160 für das LF-Frequenzband (rechts).

Die je nach Frequenz und Anwendung im ISO-RFID-Emblem unterschiedliche zweistelligen Kennungen sind in der nachfolgenden Tabelle (nach Oehlmann, aus [13]) dargestellt.

<sup>65</sup> Kennzeichnung der RFID-Technik nach dem Siegerlogo des Wettbewerbs „RFID zeigt Gesicht“. Vgl. Sonderpublikation des Informationsforums RFID e.V.: RFID zeigt Gesicht, 2008, [http://www.info-rfid.de/info-rfid/content/e107/e127/e230/rfid\\_beileger\\_logowettbewerb\\_ger.pdf](http://www.info-rfid.de/info-rfid/content/e107/e127/e230/rfid_beileger_logowettbewerb_ger.pdf), letzter Zugriff: 20.06.2011.

Tabelle 15: Kenn-Nummern für RFID-Emblem, aus Oehlmann, ident-Jahrbuch 2012, Seite 112-114 [13]

Zweistellige Kennungen für das RFID-Emblem und deren Bedeutung (Auszug aus: AIM Global Standard for the use of the AIM RFID Emblem™)				
2-Character Printed Code	Transponder Frequency	Air Interface Protocol	Data Structure Defining Agency	Data Structure
RFID	Mutually agreed	Mutually agreed	Mutually agreed	Indicates transponders and readers/encoders
A*	433 MHz	ISO 18000-7	ISO JWG	Indicates compatible readers/encoders
A0	433 MHz	ISO 18000-7	(RFU)	Reserved for future use
A1	433 MHz	ISO 18000-7	ISO 17363	License plate ID plus optional application data
A2	433 MHz	ISO 18000-7	(RFU)	Reserved for future use
B*	860-960 MHz	ISO 18000-6 C	ISO JWG	Indicates compatible readers/encoders
B0	860-960 MHz	ISO 18000-6 C	(RFU)	Reserved for future use
B1	860-960 MHz	ISO 18000-6 C	ISO 17364	License plate ID plus optional application data
B2	860-960 MHz	ISO 18000-6 C	(RFU)	Reserved for future use
B3	860-960 MHz	ISO 18000-6 C	ISO 17365	License plate ID plus optional application data
B4	860-960 MHz	ISO 18000-6 C	(RFU)	Reserved for future use
B5	860-960 MHz	ISO 18000-6 C	ISO 17366	License plate ID plus optional application data
B6	860-960 MHz	ISO 18000-6 C	(RFU)	Reserved for future use
B7	860-960 MHz	ISO 18000-6 C	ISO 17367	License plate ID plus optional application data
B8	860-960 MHz	ISO 18000-6 C	ISO 17363	License plate ID plus optional application data
E*	860-960 MHz	ISO 18000-6 C	EPCglobal †	Indicates compatible readers/encoders
E0	860-960 MHz	ISO 18000-6 C	EPCglobal †	GID General Identifier
E1	860-960 MHz	ISO 18000-6 C	EPCglobal †	SGTIN Serialized GTIN
E2	860-960 MHz	ISO 18000-6 C	EPCglobal †	SSCC Serial Shipping Container Code
E3	860-960 MHz	ISO 18000-6 C	EPCglobal †	SGLN Serialized Global Location Number
E4	860-960 MHz	ISO 18000-6 C	EPCglobal †	GRAI Global Returnable Asset Identifier
E5	860-960 MHz	ISO 18000-6 C	EPCglobal †	GIAI Global Individual Asset Identifier
E6	860-960 MHz	ISO 18000-6 C	EPCglobal †	Reserved for future use
H*	13.56 MHz	18000-3 M3	ISO JWG	Indicates compatible readers/encoders
H0	13.56 MHz	18000-3 M3	ISO 17364	License plate ID plus optional application data
H1	13.56 MHz	18000-3 M3	ISO 17365	License plate ID plus optional application data
H2	13.56 MHz	18000-3 M3	ISO 17366	License plate ID plus optional application data
H3	13.56 MHz	18000-3 M3	ISO 17367	License plate ID plus optional application data
L*	<135 kHz	ISO 18000-2	ISO JWG	Indicates compatible readers/encoders
L0	<135 kHz	ISO 18000-2	ISO 17364	License plate identification only
L1	<135 kHz	ISO 18000-2	(RFU)	Reserved for future use
L2	<135 kHz	ISO 18000-2	ISO 17367	License plate identification only
L3	<135 kHz	ISO 18000-2	(RFU)	Reserved for future use
M*	860-960 MHz	ISO 18000-6 C	US DoD	Indicates compatible readers/encoders
M0	860-960 MHz	ISO 18000-6 C	(RFU)	Reserved for future use
M1	860-960 MHz	ISO 18000-6 C	US DoD	CAGE plus serial number
M2	860-960 MHz	ISO 18000-6 C	(RFU)	Reserved for future use
N*	13.56 MHz	ISO 14443-2,3,4	ISO 7816-5	Indicates compatible readers/encoders
N0	13.56 MHz	ISO 14443-2,3,4	ISO 7816-5	Application Specific
N1	13.56 MHz	ISO 14443-2 Type A	ISO 7816-5	Application Specific
N2	13.56 MHz	ISO 14443-2 Type B	ISO 7816-5	Application Specific
P*	13.56 MHz	ISO 15693	ISO 7816-5	Indicates compatible readers/encoders
P0	13.56 MHz	ISO 15693-2	ISO 7816-5	Application Specific

Quelle: ISO/IEC CD 29160 und AIM Global



## 10.5 Datenblätter verwendeter Geräte und Sensoren

### 10.5.1 Datenblatt AEG-Lesegerät ARE H5<sup>66</sup>



#### Elektrische Daten | electrical characteristics

Lesesystem   reading systems	alle Transponder nach DIN/ISO 11784/11785 mit Annex A (FDX-B, HDX, Destron, Datamars, Trovan) und Transponder mit EM IC H4002 oder äquivalent all transponders in compliance to DIN/ISO 11784/11785 with annex A (FDX-B, HDX, Destron, Datamars, Trovan) and with EM IC H4002 or equivalent
Betriebsfrequenz   operational frequency	134,2 kHz
Zertifizierung   certification	Getestet nach IDEA Richtlinien, Zertifikat # 121 IDEA Project Test Procedure, certificate # 121
Anzeige   display	LCD: 2-Zellen mit 16 Zeichen LCD: 2-lines by 16 characters
Schnittstelle   interface	RS 232, Bluetooth ( opt. ), USB ( opt. )
Datenspeicher   user memory	2000 Datensätze, optional 3964 Datensätze. 2000 records, optional 3964 records
Software   software	PC- Steuerungssoftware PC control software
Stromversorgung   power supply	7,2V Li-Ion Akku / Accu

#### Umweltbedingungen | environment

Lagertemperatur   storage temperature	-20°C bis   up to +70°C
Betriebstemperatur   operating temperature	0°C bis   up to +50°C
Gehäuse Schutzklasse   housing protection class	IP 54

#### Abmessungen | dimension

Gewicht   weight	Ca. 500 g
Länge   length	23 cm
Breite   width	14 cm
Höhe   height	13 cm
Material   material	ABS

Technische Änderungen vorbehalten | Subject to change without notice

0107021

AEG Identifikationssysteme GmbH

Hörvelinger Weg 47, D-89081 Ulm | P: +49 (0)731 140088-0 | T: +49 (0)731 140088-9000 | E-mail: info@aegid.de | www.aegid.de

DATENBLATT DATA SHEET

<sup>66</sup> Datenblatt: [http://www.aegid.de/fileadmin/user\\_upload/Datenblaetter/reader/ARE\\_H5.pdf](http://www.aegid.de/fileadmin/user_upload/Datenblaetter/reader/ARE_H5.pdf), letzter Zugriff: 20.06.2011.



## 10.5.2 Datenblatt Betauungssensor HygroSENS SHS-A3

### BETAUUNGSSENSOR SHS-A3



Best. Nr. 18 75 94

#### Leistungsmerkmale

- ▶ Erkennung von hoher Luftfeuchte, Betauung oder Kondensation
- ▶ Einsatzbereich von 0% bis 100 rF, 0 bis 60° C
- ▶ Ausführung mit SIL-Kontakten für PCB

#### Typische Anwendungsgebiete

- ▶ Gebäudeleittechnik, Kühldeckenschalter, Klimaanlage
- ▶ Feuchteschutz in Schaltschränken und elektrischen Anlagen
- ▶ Kondensaterkennung an Außenwänden
- ▶ Lüftungsregelung in Sanitärräumen
- ▶ Leckgewächter für wasserdichte Gehäuse
- ▶ Braune Ware, CAMCORDER und Kameras



#### Eigenschaften

Der Feuchtesensor SHS A3 ist ein resistiver Betauungssensor zur Detektion von einsetzender Kondensation. Die im oberen Feuchtebereich exponentiell ansteigende, resistive Kennlinie gewährleistet einfache Signalauswertung und ein stabiles Schaltverhalten an der Betauungsgrenze. Die großflächige Ausführung ermöglicht optimierte, thermischen Kontaktierung um die Oberflächenfeuchte an gekühlten Objekten zu erfassen. Das Bauteil kann dazu z.B. auf metallische Werkstoffe aufgeklebt werden.

Durch die SIL-Kontakte lässt sich das Bauteil direkt auf Platinen bestücken.

Andere Ausführungen, z.B. mit Anschlusleitung und Stecker, sind auf Anfrage ebenfalls lieferbar.

#### Weitere Informationen im Internet:

[www.hygroSENS.com](http://www.hygroSENS.com)

#### Technische Daten

Resistiver Betauungssensor SHS-A3	
Messprinzip	resistiver Feuchtesensor
Feuchte Einsatzbereich	0...100% relative Feuchte
Temperatur Einsatzbereich	0...60 °C
Impedanz bei rF<75%	< 20 kOhm
Impedanz bei rF<93%	< 100 kOhm
Impedanz bei rF>97%	> 150 kOhm
max. Auswertespannung	< 0,8 Vpp ~f=
Trägersubstrat	Keramik, 10 x 20 x 0,6 mm
Anschluss	SIL-Kontakte RM 5,08 mm x 20 mm
Bestell Nr.	SHS-A3
Änderungen der technischen Daten, die dem technologischen Fortschritt dienen, bleiben vorbehalten!	
Beispielschaltungen, Evaluation-Kits und komplette Module auf Anfrage!	

HygroSENS INSTITUT FÜR UMWELT, ENERGIE UND ENERGIEEFFIZIENZ, Fraunhofer IPT, D-91058 Erlangen, Tel. +49 (0)51 80303-0, Fax +49 (0)51 80303-10

Anzeige 01/2008 Technische Änderungen vorbehalten!



### 10.5.3 Datenblatt Feuchte-Temperatursensor Sensirion SHT-7

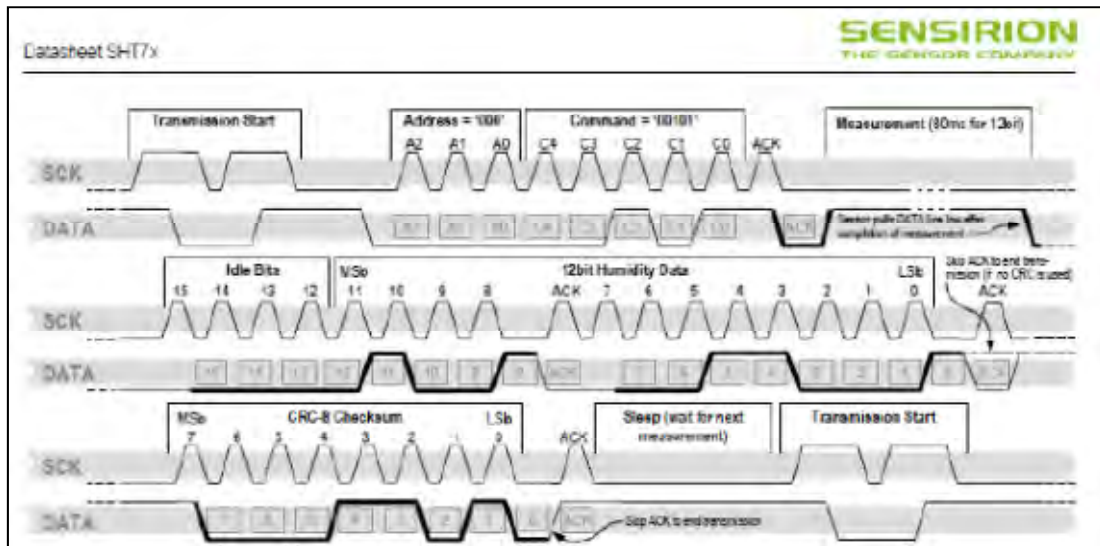


Figure 12: Example RH measurement sequence for value "0000100100110001" = 2353 = 75.79 %RH (without temperature compensation). DATA valid times are given and referenced in boxes on DATA line. Bold DATA lines are controlled by sensor while plain lines are controlled by the micro-controller.

Bit	Type	Description	Default
7		reserved	0
6	R	End of Battery (low voltage detection) 0 for VDD > 2.47 1 for VDD < 2.47	X No default value, bit is only updated after a measurement
5		reserved	0
4		reserved	0
3		For Testing only, do not use	0
2	R/W	Heater	0 off
1	R/W	no reload from OTP	0 reload
0	R/W	1 = 8bit RH / 12bit Temp resolution 0 = 12bit RH / 14bit Temp resolution	0 12bit RH 14bit Temp

Table 5: Status Register Bits

**Measurement resolution:** The default measurement resolution of 14bit (temperature) and 12bit (humidity) can be reduced to 12 and 8bit. This is especially useful in high speed or extreme low power applications.

**End of Battery function** detects and notifies VDD voltages below 2.47 V. Accuracy is ±0.05 V.

**Heater:** An on chip heating element can be addressed by writing a command into status register. The heater may increase the temperature of the sensor by 5 – 10°C<sup>12</sup> beyond ambient temperature. The heater draws roughly 8mA @ 5V supply voltage.

<sup>12</sup> Corresponds to 9 – 18°F

For example the heater can be helpful for functionality analysis: Humidity and temperature readings before and after applying the heater are compared. Temperature shall increase while relative humidity decreases at the same time. Dew point shall remain the same.

Please note: The temperature reading will display the temperature of the heated sensor element and not ambient temperature. Furthermore, the sensor is not qualified for continuous application of the heater.

## 4 Conversion of Signal Output

### 4.1 Relative Humidity

For compensating non-linearity of the humidity sensor – see Figure 13 – and for obtaining the full accuracy of the sensor it is recommended to convert the humidity readout (SC<sub>RH</sub>) with the following formula with coefficients given in Table 6:

$$RH_{\text{read}} = c_1 + c_2 \cdot SC_{RH} + c_3 \cdot SC_{RH}^2 \quad (\%RH)$$

SC <sub>RH</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>3</sub>
12 bit	-2.0468	0.0367	-1.5955E-6
8 bit	-2.0468	0.5872	-4.0845E-4

Table 6: Optimized V4 humidity conversion coefficients

The values given in Table 6 are newly introduced and provide optimized accuracy for V4 sensors along the full measurement range. The parameter set c<sub>3</sub><sup>12</sup>, which has been proposed in earlier datasheets, which was optimized

for V3 sensors, still applies to V4 sensors and is given in Table 7 for reference

SO <sub>RH</sub>	c <sub>1</sub> '	c <sub>2</sub> '	c <sub>3</sub> '
12 bit	-4.0000	0.0405	-2.6000E-6
8 bit	-4.0000	0.5480	-7.2000E-4

Table 7: V3 humidity conversion coefficients, which also apply to V4.

For simplified, less computation intense conversion formulas see Application Note "RH and Temperature Non-Linearity Compensation". Values higher than 99% RH indicate fully saturated air and must be processed and displayed as 100%RH<sup>13</sup>. Please note that the humidity sensor has no significant voltage dependency.

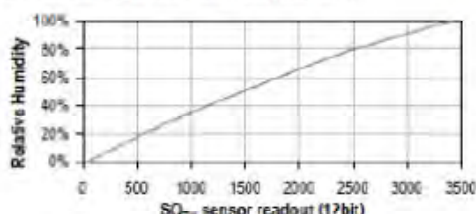


Figure 13: Conversion from SO<sub>RH</sub> to relative humidity

#### 4.2 Temperature compensation of Humidity Signal

For temperatures significantly different from 25°C (-77°F) the humidity signal requires a temperature compensation. The temperature correction corresponds roughly to 0.12%RH/°C @ 50%RH. Coefficients for the temperature compensation are given in Table 8.

$$RH_{true} = (T_c - 25) \cdot (t_1 + t_2 \cdot SO_{RH}) + RH_{linear}$$

SO <sub>RH</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>
12 bit	0.01	0.00038
8 bit	0.01	0.00128

Table 8: Temperature compensation coefficients<sup>14</sup>

#### 4.3 Temperature

The band-gap PTAT (Proportional To Absolute Temperature) temperature sensor is very linear by design. Use the following formula to convert digital readout (SO<sub>T</sub>) to temperature value, with coefficients given in Table 9.

$$T = d_1 + d_2 \cdot SO_T$$

<sup>13</sup> If wetted excessively (strong condensation of water on sensor surface), sensor output signal can drop below 100%RH (even below 0%RH in some cases), but the sensor will recover completely when water droplets evaporate. The sensor is not damaged by water immersion or condensation.  
<sup>14</sup> Coefficients apply both to V3 as well as to V4 sensors.

VDD	d <sub>1</sub> (°C)	d <sub>1</sub> (°F)	SO <sub>T</sub>	d <sub>2</sub> (°C)	d <sub>2</sub> (°F)
5V	-40.1	-40.2	14bit	0.01	0.018
4V	-39.8	-39.6	12bit	0.04	0.072
3.5V	-39.7	-39.5			
3V	-39.6	-39.3			
2.5V	-39.4	-38.9			

Table 9: Temperature conversion coefficients<sup>15</sup>

#### 4.4 Dew Point

SHT7x is not measuring dew point directly, however dew point can be derived from humidity and temperature readings. Since humidity and temperature are both measured on the same monolithic chip, the SHT7x allows superb dew point measurements.

For dew point (T<sub>d</sub>) calculations there are various formulas to be applied, most of them quite complicated. For the temperature range of -40 - 50°C the following approximation provides good accuracy with parameters given in Table 10:

$$T_d(RH, T) = T_n \cdot \frac{\ln\left(\frac{RH}{100\%}\right) + \frac{m \cdot T}{T_n + T}}{m - \ln\left(\frac{RH}{100\%}\right) - \frac{m \cdot T}{T_n + T}}$$

Temperature Range	T <sub>n</sub> (°C)	m
Above water, 0 - 50°C	243.12	17.62
Above ice, -40 - 0°C	272.62	22.46

Table 10: Parameters for dew point (T<sub>d</sub>) calculation.

Please note that "ln( . )" denotes the natural logarithm. For RH and T the linearized and compensated values for relative humidity and temperature shall be applied.

For more information on dew point calculation see Application Note "Dew point calculation".

### 5 Environmental Stability

If sensors are qualified for assemblies or devices, please make sure that they experience same conditions as the reference sensor. It should be taken into account that response times in assemblies may be longer, hence enough dwell time for the measurement shall be granted. For detailed information please consult Application Note "Qualification Guide".

<sup>15</sup> Temperature coefficients have slightly been adjusted compared to datasheet SHT7x version 3.01. Coefficients apply to V3 as well as V4 sensors.



## 10.5.4 Datenblatt Sensortransponder Digi - XBee®

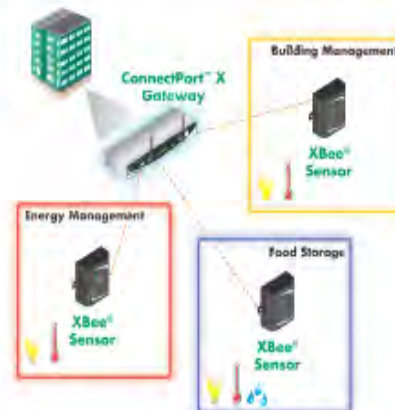
### Product Datasheet



## XBee® Sensors

Compact Battery Powered Sensors with Integrated ZigBee®

XBee sensors easily integrate into ZigBee networks, featuring long battery life and small size for unobtrusive installation anywhere.



### Features/Benefits

- ZigBee wireless sensors
  - Temperature, humidity, light
- Small form factor can be mounted anywhere
- Long-life battery
- Easy to install/configure
- Easy to integrate with Digi's Drop-in Networking family of gateways, adapters and modules on a ZigBee network
  - Integrate with custom Python® development environment for events, triggers and data logging
- Applications include building automation and security, energy management, food management, freight/vehicle monitoring

### Overview

ZigBee technology enables low-cost, low-power networking of sensors, controllers and other devices in self-configuring, self-healing wireless mesh networks. Part of Digi's Drop-in Networking solutions, XBee sensors offer the ability to provide real-time data from a variety of sensors (e.g., temperature, humidity, light) in a single solution for wireless communication across a ZigBee infrastructure.

Their small form factor and long-life battery power make XBee sensors easy to integrate with Digi's Drop-in Networking solutions to provide reliable, unobtrusive communications. Applications include building automation and security, energy management, food management, freight/vehicle monitoring and many more.

Installation is a snap. Simply insert batteries, add the XBee sensor to the ZigBee network, and configure the update interval. Next, mount the device in an out-of-the way location and start communicating.

XBee sensors can be used with ConnectPort™ X gateways, XBee embedded modules, XBee adapters or XBee wall routers to drop-in end-to-end device networks – without the need for a wired network infrastructure.



[www.digi.com](http://www.digi.com)



## Features/Specifications

### FEATURES

#### General

- Frequency: 2.4 GHz (ISM)
- Internal antenna

#### Performance

- Indoor/Urban range: 133 ft (40 m)
- Outdoor RF line-of-sight range: 400 ft (120 m)
- Transmit power output: 1.25 mW (+1 dBm) / 2 mW (+3 dBm) boost mode
- RF data rate: 250,000 bps
- Receive sensitivity (1% PER): -97 dBm (-98 dBm boost mode)

#### Networking and Security

- Networking topologies: Point-to-Point, Point-to-Multipoint, Peer-to-Peer, Mesh
- Number of channels: 16 - 5 MHz channels (Direct Sequence Spread Spectrum)
- Filtration options: PAN ID, Channel, 2/64 (64-bit) addresses

#### LEDs

- Power: Solid when powered and not associated to network
- Associate: Blinks when unit is associated to network

#### Push Button

- Device reset
- Configuration reset to factory defaults
- Identification/Commissioning mode

### INTERFACES

- ZigBee - compatible with:
  - Digi XBee ZNet 2.5 (formerly Series 2) module
  - EmberZNet 2.5x mesh stack

### MODEL

### PART NUMBERS

Model	Worldwide
XBee Sensor - Battery powered temperature and light	XS-Z14-CB1RB
XBee Sensor - Battery powered temperature, humidity and light	XS-Z14-CB2RB

### INTEGRATED SENSORS

#### Temperature Sensor

- Range: -18° C to +55° C (-0.4° F to +131° F)
- Accuracy:  $\pm 2^{\circ}$  C

#### Ambient Light Sensor

- Range of spectral bandwidth: 360 to 970 nm (similar to human eye)
- Wavelength of peak sensitivity: 570 nm

#### Humidity Sensor

- Range: 0 to 100% RH
- Interchangeability:
  - $\pm 5\%$  RH (0% RH to 50% RH)
  - $\pm 8\%$  RH (60% RH to 100% RH)
- Accuracy:  $\pm 3.5\%$  RH

### ENVIRONMENTAL

- Operating Temperature: -18° C to 55° C (-0.4° F to 131° F)
- Power requirements: 3 x AA alkaline 1.5V batteries (batteries not included)

### BATTERY LIFE

Duty Cycle	Battery Life Estimate
1 read per 30 sec	7.5 years
1 read per minute	2.5 years
1 read per hour (or less frequent)	6 years

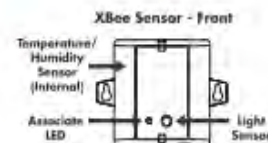
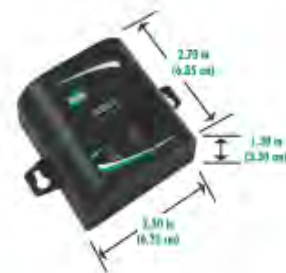
- Assumptions based on:
  - Cyclic sleep enabled with single transmit per wake cycle
  - At 21° C

### REGULATORY APPROVALS (pending)

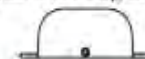
- FCC Part 15, Class B
- EN55022 Class B, EN 55024
- RoHS Compliant

### DIMENSIONS

- Length: 2.70 in (6.85 cm)
- Width: 2.50 in (6.35 cm)
- Height: 1.30 in (3.30 cm)
- Weight: 0.35 lb (0.158 kg) w/batteries; 0.20 lb (0.091 kg) without batteries



XBee Sensor - Top/Bottom



**DIGI SERVICE AND SUPPORT** - You can purchase with confidence knowing that Digi is here to support you with expert technical support and a strong five-year warranty. [www.digi.com/support](http://www.digi.com/support)

**WHEN RELIABILITY MATTERS™**

#### Digi International

11001 Burn Road E.  
Minnetonka, MN 55343  
U.S.A.  
PH: 877-912-3444  
952-912-3444  
FX: 952-912-4952  
www: info@digi.com

#### Digi International

31 rue des Poissonniers  
92200 Nanterre sur Seine  
FR: +33-1-35-61-98-98  
FX: +33-1-35-61-98-99  
www: digi.fr

#### Digi International

NES Building South B/F  
22-14 Sakuragaoka-cho,  
Shibuya-ku  
Tokyo 150-0031, Japan  
PH: +81-3-5428-0261  
FX: +81-3-5428-0262  
www: digi-intl.co.jp

#### Digi International

(HK) Limited  
Unit 3206 - 06A, 32/F,  
ADA Tower  
183 Eglinton Road  
North Point, Hong Kong  
PH: +852-2833-1008  
FX: +852-2572-9988  
www: digi.cn

Digi International, the leader in device networking for business, develops reliable products and technologies to connect and secure strategic local or remote wireless devices over the network or via the web. With over 20 million ports shipped worldwide since 1983, Digi offers the highest levels of performance, flexibility and quality.

[www.digi.com](http://www.digi.com)

© 2008 Digi International, Inc.

All rights reserved. Digi, Digi International, the Digi logo, the When Reliability Matters logo, Connected and XBee are either trademarks or registered trademarks of Digi International, Inc. in the United States and other countries worldwide. All other trademarks are the property of their respective holders.

91001457  
81/908



## 10.6 Publikationen aus Fraunhofer IMS und IBP zu RFID-Sensor-Technik

Publikationen im Projektzeitraum 2007 bis 2012:

Vom Bögel, Gerd ; Meyer, Frederic ; Kemmerling, Martin:

Batteryless Sensors in Building Automation by use of wireless Energy Harvesting

In: The 1st IEEE International Symposium on Wireless Systems within the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems. Offenburg/Germany, September 2012

Vom Bögel, Gerd ; Meyer, Frederic ; Kemmerling, Martin ; Grabmaier, Anton:

Radio frequency powering of microelectronic sensor modules.

In: Hollstein, Thomas (Hrsg.) ; Wissendheit, Uwe (Hrsg.): RFID SysTech 2011 : 7th European Workshop on Smart Objects: Systems, Technologies and Applications. Berlin [u.a.] : VDE-Verl., 2011, without pagination. (ITG-Fachbericht 229).

Vom Bögel, Gerd:

Self-sustaining sensor-transponders: a technology for cost-efficient realization for a multitude of applications. In: ID World 2011 : International Congress. Milano : Wise Media, 2011, without pagination.

König, Norbert ; Philipp, Christian ; Vom Bögel, Gerd ; Hennig, Andreas:

Sensor-Transponder (RFID) für die Druck- und Temperaturüberwachung in Vakuum-Isolations-Paneeelen (VIP) - Stand und Ausblick. In: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung <Bonn>: Fachtagung Anwendung der Vakuumdämmung im Bauwesen : 17. März 2011, Berlin. Berlin, 2011,

Vom Bögel, Gerd ; Trieu, Hoc-Khiem ; Görtz, Michael ; Grabmaier, Anton:

Wireless integrated pressure sensor for quality control of vacuum insulation panel.

In: Mukhopadhyaya, Phalguni (Hrsg.): Vacuum insulation panels: advances in applications : Proceedings. Ottawa, 2011, pp. 22 - 26.

Vom Bögel, Gerd ; Scherer, Klaus:

Ambient Intelligence in Räumen und Gebäuden der nächsten Generation. In: Leibniz-Institut für Interdisziplinäre Studien (LIFIS): Sensorsysteme 2010 : Abstracts. Lichtenwalde, 2010, p. 2.

Vom Bögel, Gerd ; Meyer, Frederic ; Kemmerling, Martin:

Energieversorgung von mikroelektronischen Sensormodulen über Funk.

In: Klein, Manfred ; VDI-VDE Innovation + Technik GmbH, Berlin: Energieautarke Sensorik 2010 : Mikrosensorik mit autarker Energieversorgung und drahtloser Signalübertragung. Berlin [u.a.] : VDE-Verl., 2010, Paper 11 [Bl. 1- 6]. (GMM-Fachbericht 67).

Hennig, Andreas ; Vom Bögel, Gerd ; Grabmaier, Anton:

A reader antenna with carrier suppression for wireless sensor systems.

In: Hollstein, Thomas (Hrsg.) ; Wissendheit, Uwe (Hrsg.): RFID SysTech 2010 : European Workshop on Smart Objects: Systems, Technologies and Applications. Berlin [u.a.] : VDE-Verl., 2010, without pagination. (ITG-Fachbericht 224).

Vom Bögel, Gerd ; Meyer, Frederic:

RFID in Wartung und Instandhaltung <2>. In: ISIS-AutoID, RFID special. (2010), 3, p. 121.

Vom Bögel, Gerd ; Meyer, Frederic:

RFID in Wartung und Instandhaltung <1>. In: ISIS-AutoID, RFID special. (2009), 3, p. 169.



Meyer, Frederic ; Vom Bögel, Gerd ; van Ackeren, Martin ; Lörcks, Martin ; Vasilev, Kosta:  
RFID- und Sensortranspondersysteme in Wartung und Instandhaltung.  
In: Hollstein, Thomas (Hrsg.) ; Wissendheit, Uwe (Hrsg.): RFID SysTech 2009 : 5th European Workshop  
on RFID Systems and Technologies. Berlin [u.a.] : VDE-Verl., 2009, without pagination. (ITG-  
Fachbericht 216).

Vom Bögel, Gerd:  
Grundlagen der RFID-Technologie und anwendungsspezifische Eigenschaften im Bauwesen.  
In: RFID im Bau : Tagungsband; Kongress am 22. + 23. Februar 2008 auf der bautec / Build IT. Dresden  
: ARGE RFID, 2008, without pagination.

Meyer, Frederic ; Vom Bögel, Gerd ; Ressel, Christian ; Dimitrov, Todor:  
inHaus2 - Intelligent construction site logistics.  
In: Hollstein, Thomas (Hrsg.) ; Wissendheit, Uwe (Hrsg.): RFID SysTech 2008 : 4th European Workshop  
on RFID Systems and Technologies. Berlin [u.a.] : VDE-Verl., 2008, without pagination [pp. 21-7]. (ITG-  
Fachbericht 209).

Vom Bögel, Gerd:  
Moderne Baustellenlogistik durch Einsatz neuer Informations- und Kommunikations-Technologien.  
In: Beton. 58 (2008), 9, Sonderteil Fachtagung, p. 9.

Vom Bögel, Gerd ; Meyer, Frederic:  
RFOL - Radio Frequency Object Localisation.  
In: Euro ID 2007 : 8th to 10th May 2007, EXPO XXI, Expocentre, Cologne, Germany. Düsseldorf : IBC  
Euroforum GmbH, 2007, without pagination.

Vom Bögel, Gerd:  
Technologische Trends bei RFID-Systemen für den Einsatz im Internet der Dinge.  
In: Bullinger, Hans-Jörg (Hrsg.) ; Hompel, Michael ten (Hrsg.): Internet der Dinge : www.internet-der-  
dinge.de. Berlin [u.a.] : Springer, 2007, pp. 157 - 177.

## 11 Literaturverzeichnis

- [1] Arbeitsgemeinschaft ARGE RFIDimBau: Forschungscluster im BMVBS-Förderprogramm „Forschungsinitiative Zukunft Bau“ mit gemeinsamer Internetseite unter [www.RFIDimBau.de](http://www.RFIDimBau.de), seit Januar 2007.
- [2] Helmus, M., Meins-Becker, A., Laußat, L.: „InWeMo“, Integriertes Wertschöpfungsmodell mit Radio Frequency Identification in der Bau- und Immobilienwirtschaft mit dem Fokus Baulogistik, Forschungsbericht Lehr- und Forschungsgebiet Baubetrieb und Bauwirtschaft, BU Wuppertal, 2008, siehe in [www.baufachinformation.de/artikel.jsp?v=229833](http://www.baufachinformation.de/artikel.jsp?v=229833) und in „RFID in der Baulogistik“, 748 S., Vieweg+Teubner 2009.
- [3] Jehle, P., Seyffert, S., Wagner, S., Netzker, M.: „RFID-IntelliBau“, Optimierungspotenziale im Lebenszyklus einer Bauwerks durch den Einsatz der Radio Frequency Identification Technologie, Forschungsbericht Fakultät Bauingenieurwesen, Professur Bauverfahrenstechnik, TU Dresden, 2008, siehe in <http://www.baufachinformation.de/literatur.jsp?bu=2009119005687>
- [4] Rüppel, U., Stübbe, M., Zwinger, U.: Kontextsensitives RFID-Leitsystem zur Navigation und Ortung von Einsatzkräften in Gebäuden, Forschungsbericht, TU Darmstadt, Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen, 2010, siehe Seite 46-47 in [http://www.forschungsinitiative.de/PDF/Broschuere\\_Zukunft\\_Bau\\_2.pdf](http://www.forschungsinitiative.de/PDF/Broschuere_Zukunft_Bau_2.pdf) und RFID-Wartungs-Leitsystem Brandschutz, IRB-Bericht F 2804 (2012) in <http://www.irbnet.de/daten/rswb/12029020336.pdf>
- [5] König, N., Würth, M., vom Bögel, G.: „RFID-Kennzahlen“, Potenziale von RFID-Technologien im Bauwesen - Kennzahlen und Bauqualität, Forschungsbericht GB 183/2008, Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Stuttgart und Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme IMS, Duisburg, 2008, IRB-Bericht F 2743 siehe in <http://www.irbnet.de/daten/rswb/09119019866.pdf>
- [6] Finkenzeller, Klaus: RFID Handbuch - Grundlagen und praktische Anwendungen von Transpondern, kontaktlosen Chipkarten und NFC, Carl Hanser Verlag, München, 2008 und 2012.
- [7] Helmus, M., Kelm, A., Laußat, L., Meins-Becker, A.: RFID-Baulogistikeitstand , RFID-unterstütztes Steuerungs- und Dokumentationssystem für die erweiterte Baulogistik am Beispiel RFID-Baulogistikeitstand für die Baustelle, Forschungsbericht Lehr- und Forschungsgebiet Baubetrieb und Bauwirtschaft, BU Wuppertal, 2010, 156 S., Vieweg+Teubner, 2011. Siehe in <http://www.baufachinformation.de/forschungsbericht/RFID-Baulogistikeitstand/236349>
- [8] Jehle, P., Michailenko N., Seyffert, S., Wagner, S.: IntelliBau-2, Das intelligente Bauteil im integrierten Gebäudemodell, Schriften zur Bauverfahrenstechnik, Vieweg+Teubner, 2013, und in

[http://www.rfid-saxony.de/logic/downloads/207\\_Wagner\\_Bauen%20mit%20RFID%20Technik.pdf](http://www.rfid-saxony.de/logic/downloads/207_Wagner_Bauen%20mit%20RFID%20Technik.pdf)

- [9] Michelin, TPMS-Reifendruck-Messsystem, siehe in [http://news.michelin.de/de/news/news\\_detail\\_popup.jsp?id=29404&codeRubrique=1080](http://news.michelin.de/de/news/news_detail_popup.jsp?id=29404&codeRubrique=1080) und <http://www.krafthand.de/aktuell/details/article/mehr-infos-vom-reife.html>
- [10] König, N.: Festlegung von Bemessungswerten für die Wärmeleitfähigkeit, Bericht GB 116/1994 für DIBt, Berlin, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, 1994. Siehe [www.baufachinformation.de/artikel.jsp?v=5591](http://www.baufachinformation.de/artikel.jsp?v=5591)
- [11] König, N.: Sicherheitsbeiwerte im Wärmeschutz nach EnEV/BRL und EN-Standards (SiWaS), IBP- Bericht GB 185/2012, mit Förderung durch DIBt, Berlin, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart, 2012. Siehe [http://www.dibt.de/de/data/Newsletter/01\\_2013.pdf](http://www.dibt.de/de/data/Newsletter/01_2013.pdf), S. 8.
- [12] Siemens: Das Internet der Dinge als wichtiger Wachstumsmarkt, Picture of the Future, Herbst 2012, in <http://www.siemens.com/innovation/pool/de/2012/pdf/PoF-2-2012-D-doppel.pdf>
- [13] Walk, E., Büth, D.: RFID-Standards 2012, ident-Jahrbuch 2012, S. 98-111, ident-Verlag, Dortmund 2012, siehe [www.ident.de/uploads/media/ident\\_2012\\_Jahrbuch\\_Web.pdf](http://www.ident.de/uploads/media/ident_2012_Jahrbuch_Web.pdf)
- [14] EPCglobal: Die Zukunft hat begonnen, Elektronischer Produkt Code, in <http://www.gs1-germany.de/gs1-standards/barcodesrfid/epcrfid/>
- [15] Wiebking, L. et alii: A Roadmap for RFID Applications and Technologies. Final Report, 2008, CE RFID, in [http://www.iot-visitthefuture.eu/fileadmin/documents/researchforeurope/Roadmap\\_RFID\\_Applications\\_Technologies.pdf](http://www.iot-visitthefuture.eu/fileadmin/documents/researchforeurope/Roadmap_RFID_Applications_Technologies.pdf)
- [16] UWB, Zigbee und Z-Wave in der Automatisierungstechnik; Elektronik 2/2007 und in <http://www.zigbee.org>
- [17] <http://www.bluetooth.org>
- [18] IEEE 802.15.4-Standard: Übertragungsprotokoll für Wireless Personal Area Networks (WPAN), in [http://de.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_802.15.4](http://de.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.15.4).
- [19] Mess-Funk statt Mess-Draht, Drahtlose Sensornetzwerke nach dem Zigbee- Standard, Funkschau, H. 18, 2010.
- [20] <http://www.knx.org>
- [21] <http://www.dect.org>

- [22] ISO/IEC 14543, Teil 3-10: Informationstechnik - Heim-Elektronik-Systeme (HES), Drahtlosprotokoll für kurze Datenpakete (WSP), optimiert für Energy Harvesting, Beuth, 2012 und <http://www.enocean.com/de/radio-technology/>
- [23] <http://www.z-wavealliance.org>
- [24] Langhammer, N., Kays, R.: Drahtlose Übertragung von Steuerinformationen im Vergleich; ntz H. 6, 2010; S. 18-21.
- [25] Benutzerhandbuch, RWE-SmartHome, in <http://www.rwe-smarthome.de/web/cms/mediablob/de/584306/data/496046/4/smarthome/hilfe/Benutzerhandbuch.pdf>.
- [26] Ratzel, U., et alii: Elektromagnetische Felder im Alltag, LU-BW und LfU Bayern, AZ-Kempton, 2010, in [www.bestellen.bayern.de](http://www.bestellen.bayern.de) „Elektrosmog“ und Informationen in <http://www.bfs.de/de/elektro/oekolabel.html>
- [27] Tamm, G., Tribowski, C.: RFID, Springer Verlag Berlin/ Heidelberg 2010, siehe in <http://inethub.olvi.net.ua/ftp/library/share/rfid/informatik%20im%20fokus.%20rfid,%202010,%20p.157.pdf>
- [28] Groß, M.: RFID-Systeme - Zentrale Drehscheibe „Middleware“, in [http://www.isis-specials.de/profile\\_pdf/editorial\\_dabac\\_rfid0206.pdf](http://www.isis-specials.de/profile_pdf/editorial_dabac_rfid0206.pdf).
- [29] Melski, A., Schumann, M.: Konzeptuelles Modell zu objektbegleitenden Datenspeicherung in RFID-gestützten Logistiknetzwerken, Arbeitsbericht des Institutes für Wirtschaftsinformatik Nr. 3/2008, S. 5.
- [30] Klaubert, C.: Entwicklung eines RFID-basierten Informations- und Kommunikationssystems für die Baulogistik, Dissertation, 2011, TU München und in [www.forbau.de](http://www.forbau.de)
- [31] DIN EN 1946-2: Wärmetechnisches Verhalten von Bauprodukten und Bauteilen: Technische Kriterien zur Begutachtung von Laboratorien bei der Durchführung der Messungen von Wärmeübertragungseigenschaften, Teil 2: Messung nach Verfahren mit dem Plattengerät, 04-1999, Beuth-Verlag.
- [32] DIN EN 12667: Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät - Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand, Deutsche Fassung EN 12667: 05-2001, Beuth-Verlag.
- [33] DIN 1319-3, Grundlagen der Meßtechnik, Auswertung von Messungen einer einzelnen Meßgröße, Meßunsicherheit, 1996-05, Beuth-Verlag.

- [34] Building Information Modeling BIM, siehe in <http://www.buildingsmart.de/> und Anwenderhandbuch Datenaustausch BIM/IFC, 2006, in [http://ddsv.de/files/web1.ddsv.de/downloads/PDF-Dateien/IFC\\_Anwenderhandbuch\\_4MB.pdf](http://ddsv.de/files/web1.ddsv.de/downloads/PDF-Dateien/IFC_Anwenderhandbuch_4MB.pdf)
- [35] Merz, H.: Gebäudeautomation - Kommunikationssysteme mit EIB/KNX, LON und BACnet, 2007, Carl Hanser Verlag, München und in <http://www.big-eu.org/bacnet/>
- [36] Rüdiger, M., Dorochevsky, R.: RFID-basiertes Service-Management System, TÜV-Süd Industrie Service, euro-ID 2011, in [http://www.smart-tec.com/uploads/tx\\_rathgeberdownloads/2011\\_01\\_26\\_TUEV-Sued\\_01.pdf](http://www.smart-tec.com/uploads/tx_rathgeberdownloads/2011_01_26_TUEV-Sued_01.pdf) und in [http://www.smart-tec.com/uploads/tx\\_rathgeberdownloads/2012\\_10\\_29\\_Texxmo\\_Feuerwehr.pdf](http://www.smart-tec.com/uploads/tx_rathgeberdownloads/2012_10_29_Texxmo_Feuerwehr.pdf)
- [37] Haufe-Lexware: Energieausweis – Zahlen, Daten, Fakten, Auswirkungen auf Vermietung, Verwaltung und Verkauf von Immobilien, Rechtliche und technische Grundlagen, Haufe Verlag, Planegg 2010, S. 4.
- [38] DIN V 18599: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwasser und Beleuchtung, 02-2007, Beuth-Verlag.
- [39] Erhorn, H. (Hrsg): Elektronische Checkliste zur Aufnahme von Bestandsgebäuden für die Berechnung nach DIN V 18599, Fraunhofer IBP Stuttgart, 2011, in <http://www.checkliste18599.de/>
- [40] hercon-Gebäudeautomation: OPC-M-Bus oder siehe in <http://www.herrmann-leittechnik.com/produkte> und [http://www.herrmann-leittechnik.com/sites/default/files/hercon OPC M-BUS\\_0.pdf](http://www.herrmann-leittechnik.com/sites/default/files/hercon OPC M-BUS_0.pdf)
- [41] Richtlinie Überwachung der Verkehrssicherheit RÜV, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 1. Auflage, Berlin 2008, Online im Internet unter <http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/28346/publicationFile/150/richtlinie-fuer-die-ueberwachung-der-verkehrssicherheit.pdf>
- [42] Quality Function Deployment, QFD, Steinbeis-Transferzentrum Managementsysteme, Ulm, siehe [www.tms-ulm.de](http://www.tms-ulm.de) und in [http://www.emagister.de/uploads\\_courses\\_de/Folienauszuege\\_QFD.pdf](http://www.emagister.de/uploads_courses_de/Folienauszuege_QFD.pdf)