

**Untersuchung von Transport-, Umschlag- und  
Lagerprozessen bezüglich ihres Potenzials zur  
autarken Energieversorgung semi-aktiver  
multisensorischer RFID-Transponder**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Dr.-Ing.**

von der Fakultät Maschinenbau  
der Technischen Universität Dortmund  
genehmigte Dissertation

**Dipl.-Logist. Tim Siebels**

aus

Oldenburg

Tag der mündlichen Prüfung: 14.02.2018

1. Gutachter/-in: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Rolf Jansen
2. Gutachter/-in: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Künne

**Dortmund, 2018**



## Kurzfassung

Innerhalb der vorliegenden Arbeit wird die Realisierung einer autarken Energieversorgung bei semi-aktiven multisensorischen RFID-Transpondern angestrebt. Hierbei liegt der Fokus auf der Erarbeitung neuer Erkenntnisse bezüglich der bei der Durchführung von Transport-, Umschlag- und Lagerprozessen (TUL-Prozessen) an einer Ladeeinheit verfügbaren Umgebungsenergien, die mittels entsprechender Energy-Harvesting-Technologien wie z. B. Solarzellen, thermoelektrischen Generatoren oder Vibrationsgeneratoren in elektrische Energie umgewandelt und damit für einen Sensortransponder nutzbar gemacht werden können.

Diesbezüglich erfolgen zunächst Praxismessungen hinsichtlich der im Zusammenhang mit TUL-Prozessen der Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasser in Form von Lichtstrahlung, Temperaturdifferenzen und Vibrationen auf Ladeeinheitenebene zur Verfügung stehenden potenziellen Energiemengen. Des Weiteren werden die im Rahmen der Praxistests aufgezeichneten Beschleunigungsmesswerte mithilfe einer Fast Fourier Transformation (FFT) im Hinblick auf die Frequenzbereiche ausgewertet, innerhalb derer die höchsten Amplituden der Beschleunigung zu erwarten sind, da diese Information bei der Auswahl bzw. Optimierung vibrationsbasierter Energiewandler von entscheidender Bedeutung ist.

Auf der Grundlage der im Zusammenhang mit den Praxisuntersuchungen neu gewonnenen Erkenntnisse wird im weiteren Verlauf ein Funktionsmuster eines energieautarken multisensorischen RFID-Transponders angefertigt, welches im Wesentlichen aus den als am besten zur Energieumwandlung innerhalb logistischer Prozesse eingestuften Energy-Harvesting-Modulen, einem Energiemanagement-Modul sowie einem RFID-Sensortransponder zur beispielhaften Überwachung der Parameter Feuchte und Temperatur besteht und dessen grundsätzliche Funktionsfähigkeit im Rahmen umfangreicher Laborversuche nachgewiesen wird. Darüber hinaus erfolgt eine ausführliche Wirtschaftlichkeitsanalyse, die komprimierte Aussagen in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes energieautarker multisensorischer RFID-Transponder zur qualitativen Überwachung einzelner Ladeeinheiten in der Distributionslogistik beinhaltet.



## Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b> .....	<b>I</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>III</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>VI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>X</b>
<b>Formelverzeichnis</b> .....	<b>XII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>XIII</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Problemstellung.....	2
1.2 Zielsetzung der Arbeit.....	5
1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit .....	6
<b>2 Zustandsüberwachung in der Distributionslogistik – Stand der Technik</b> .....	<b>9</b>
2.1 Definition von Kriterien zur Bewertung von Technologien für die qualitative Überwachung logistischer Prozesse .....	9
2.2 Bewertung vorhandener Lösungen zur Zustandsüberwachung in der Distributionslogistik.....	14
2.2.1 Indikator-Klebeetiketten .....	14
2.2.2 Elektronische Datenlogger .....	16
2.2.3 Telematik-Systeme .....	18
2.2.4 Drahtlose Sensornetzwerke .....	20
2.2.5 RFID-Sensortransponder .....	23
2.3 Zusammenfassende Bewertung sowie Ableitung des Forschungsbedarfes.....	25
<b>3 Technische Grundlagen bei der Entwicklung energieautarker multisensorischer RFID-Transponder</b> .....	<b>29</b>
3.1 Energy-Harvesting.....	30
3.1.1 Photovoltaik .....	33
3.1.2 Thermoelektrische Generatoren .....	35
3.1.3 Vibrationsgeneratoren.....	36
3.2 Energiemanagement .....	40
3.2.1 Spannungswandler .....	40
3.2.2 Energiespeicher .....	43
3.3 Integration von Sensoren in RFID-Transponder.....	46
3.4 Mikrocontroller in RFID-Sensortranspondern .....	47
3.5 Datenübertragung bei semi-aktiven RFID-Sensortranspondern.....	50

<b>4</b>	<b>Untersuchung von TUL-Prozessen hinsichtlich potenziell vorhandener Umgebungsenergien auf Ladeeinheitenebene .....</b>	<b>52</b>
4.1	Theoretisch vorhandene Umgebungsenergien im Rahmen von TUL-Prozessen .....	52
4.2	Durchführung von Praxismessungen .....	54
4.2.1	Transportprozesse.....	56
4.2.1.1	Verkehrsträger Straße.....	56
4.2.1.2	Verkehrsträger Schiene.....	69
4.2.1.3	Verkehrsträger Wasser .....	76
4.2.2	Umschlagprozesse .....	82
4.2.3	Lagerprozesse.....	84
4.3	Praxismessungen – Wesentliche Erkenntnisse .....	88
<b>5</b>	<b>Entwicklung eines energieautarken multisensorischen RFID-Transponders als Funktionsmuster .....</b>	<b>90</b>
5.1	Auswahl geeigneter Hardwarekomponenten .....	90
5.1.1	Energiemanagement-Modul .....	91
5.1.2	Elektromagnetischer Vibrationsgenerator.....	93
5.1.3	Solarzellen.....	101
5.1.4	Multisensorischer RFID-Transponder.....	102
5.2	Anfertigung eines energieautarken RFID-Sensortransponders in Form eines Funktionsmusters .....	104
5.3	Bereitstellung einer anwendungsgerechten Smartphone-Applikation ....	109
<b>6</b>	<b>Validierung des entwickelten Funktionsmusters im Prüflabor.....</b>	<b>112</b>
6.1	Leistungsaufnahme des ausgewählten RFID-Sensortransponders .....	112
6.2	Leistungsabgabe der ausgewählten Energy-Harvesting-Module .....	114
6.3	Laboruntersuchungen – Ableitung grundlegender Erkenntnisse bezüglich der Funktionsfähigkeit energieautarker RFID-Sensortransponder .....	118
<b>7</b>	<b>Wirtschaftlichkeitsanalyse.....</b>	<b>123</b>
7.1	Kosten-Nutzenbewertung von RFID-Systemen in der Logistik – Allgemeine Vorgehensweise.....	123
7.1.1	Zieldefinition .....	124
7.1.2	Prozess- und Potenzialanalyse .....	126
7.1.3	Systemdimensionierung .....	128
7.1.4	Auswirkungsanalyse und Business Case .....	130
7.1.5	Ergebnisbewertung.....	131
7.2	Bestehende Ansätze der Wirtschaftlichkeitsanalyse.....	133
7.2.1	Methoden zur Kosten- und Nutzenbewertung .....	134
7.2.1.1	Total Cost of Ownership.....	134

7.2.1.2	Prozesskostenrechnung .....	135
7.2.1.3	Nutzwertanalyse .....	138
7.2.1.4	Key Performance Indicators.....	139
7.2.1.5	Netzwerk-Balanced Scorecard .....	140
7.2.2	Klassische Instrumente der betriebswirtschaftlichen Investitionsrechnung .....	143
7.2.2.1	Kapitalwertmethode .....	143
7.2.2.2	Amortisationsrechnung .....	144
7.2.2.3	Kostenvergleichsrechnung.....	145
7.2.3	Verfahren der Sensitivitätsanalyse.....	146
7.2.3.1	Kritische-Werte-Rechnung.....	146
7.2.3.2	Dreifachrechnung .....	146
7.2.3.3	Zielgrößenänderungsrechnung.....	147
7.2.4	Identifikation geeigneter Instrumente zur speziellen Wirtschaftlichkeitsbewertung des Einsatzes von RFID-Sensortranspondern .....	147
7.3	Durchführung einer exemplarischen Wirtschaftlichkeitsanalyse bezüglich der Verwendung energieautarker multisensorischer RFID- Transponder zur qualitativen Überwachung logistischer Prozesse .....	149
7.3.1	Vergleich zu batteriebetriebenen RFID-Sensortranspondern.....	149
7.3.2	Vergleich mit der Nullalternative .....	156
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>167</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>171</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Mögliche Belastungen im Rahmen von TUL-Prozessen (i. A. a. [DIN15a]).....	1
Abbildung 2: Schwachstellen der Laderaumüberwachung innerhalb einer Distributionskette mit Vor-, Haupt- und Nachlauf ([JE11], S. 109).....	3
Abbildung 3: Zustandsüberwachung auf der Ebene der Ladeeinheit innerhalb einer Distributionskette mit Vor-, Haupt- und Nachlauf ([JE11], S. 109).....	4
Abbildung 4: Aufbau der Arbeit.....	8
Abbildung 5: Wesentliche Kriterien zur Bewertung von Technologien für die qualitative Überwachung von TUL-Prozessen.....	13
Abbildung 6: Indikator-Klebeetikett zur Überwachung der Beschleunigung [Sho16b].....	15
Abbildung 7: Typische Leistungsaufnahme von Komponenten eines batteriebetriebenen Transponders ([Rei14], S. 1336).....	28
Abbildung 8: Schematische Darstellung der grundlegenden Komponenten sowie des Energieflusses des geplanten energieautarken RFID-Sensortransponders (i. A. a. [Sie13], S. 80).....	29
Abbildung 9: Prinzipien zur wechselseitigen Umwandlung von Energieformen (i. A. a. [Wal07], S. 22).....	30
Abbildung 10: Kontinuierliche Leistungsdichten von ausgewählten chemischen Energiespeichern und Energy-Harvesting-Generatoren (i. A. a. [Mey09]) .....	32
Abbildung 11: Schematischer Aufbau einer Solarzelle (i. A. a. [Mar14], S. 351) .....	33
Abbildung 12: Schematischer Aufbau eines thermoelektrischen Generators (i. A. a. [Rei14], S. 1359) .....	36
Abbildung 13: Funktionsprinzip eines elektromagnetischen Energiewandlers (i. A. a. [Rei14], S. 1366) .....	37
Abbildung 14: Klassischer Aufbau eines piezoelektrischen Energiewandlers (i. A. a. [Sch13], S. 56).....	39
Abbildung 15: Prinzipschaltbild eines Brückengleichrichters (i. A. a. [Ros16], S. 232) .....	41
Abbildung 16: Funktionsprinzip eines Aufwärtswandlers (i. A. a. [Dem11], S. 68) ...	42
Abbildung 17: Funktionsprinzip eines Abwärtswandlers (i. A. a. [Dem11], S. 73) ....	43
Abbildung 18: Vergleichende Darstellung unterschiedlicher Energiespeichertechnologien im Ragone-Diagramm (i. A. a. [KD15], S. 27).....	45
Abbildung 19: Messsystem zur Erfassung von Temperaturgradienten, Beschleunigungen und Beleuchtungsstärken an einer Ladeeinheit ..	54
Abbildung 20: Applikation des Messsystems innerhalb der exemplarisch ausgewählten Ladeeinheit .....	55



Abbildung 21: Externe Sensoren zur Messung der Beleuchtungsstärke und der Temperatur.....	56
Abbildung 22: Nutzbare Temperaturdifferenzen im Zusammenhang mit beispielhaften Straßentransporten ([Sie14a], S. 30) .....	58
Abbildung 23: Lichteinstrahlung im Verlaufe beispielhafter Straßentransporte ([Sie14a], S. 31) .....	59
Abbildung 24: Beispielhafter Straßentransport von Osnabrück nach Genk – Position des Prüflings im Fahrzeug ([Sie14a], S. 29) .....	60
Abbildung 25: Lkw-Transport von Osnabrück nach Genk – Beschleunigungen über die Längsachse .....	61
Abbildung 26: Lkw-Transport von Osnabrück nach Genk – Beschleunigungen über die Querachse.....	62
Abbildung 27: Lkw-Transport von Osnabrück nach Genk – Beschleunigungen über die vertikale Schwingachse.....	63
Abbildung 28: Beispielhafter Straßentransport von Genk nach Osnabrück – Position des Prüflings im Fahrzeug ([Sie14a], S. 30) .....	64
Abbildung 29: Lkw-Transport von Genk nach Osnabrück – Beschleunigungen über die Längsachse .....	64
Abbildung 30: Lkw-Transport von Genk nach Osnabrück – Beschleunigungen über die Querachse.....	65
Abbildung 31: Lkw-Transport von Genk nach Osnabrück – Beschleunigungen über die vertikale Schwingachse.....	66
Abbildung 32: Einfluss der Beladung auf die Intensität der Fahrzeugschwingungen ([DIN13], S. 46) .....	68
Abbildung 33: Schwingintensitäten an verschiedenen Orten eines Sattelschleppers ([DIN13], S. 47).....	68
Abbildung 34: Schienentransport – Eingesetzte Wechselbrücke ([Sie14a], S. 35) ...	70
Abbildung 35: Schienentransport – Eingesetzter Gelenk-Containertragwagen ([Sie14a], S. 36) .....	70
Abbildung 36: Nutzbare Temperaturdifferenzen während eines beispielhaften Schienentransportes ([Sie14a], S. 37) .....	71
Abbildung 37: Lichteinstrahlung während eines beispielhaften Schienentransportes ([Sie14a], S. 38) .....	72
Abbildung 38: Beispielhafter Schienentransport – Beschleunigungen über die Längsachse.....	73
Abbildung 39: Beispielhafter Schienentransport – Beschleunigungen über die Querachse.....	74
Abbildung 40: Beispielhafter Schienentransport – Beschleunigungen über die vertikale Schwingachse.....	75
Abbildung 41: Nutzbare Temperaturdifferenzen im Verlaufe eines beispielhaften Seetransportes ([Sie14a], S. 41) .....	77

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 42: Beispielhafter Seetransport – Beschleunigungen über die Längsachse .....	79
Abbildung 43: Beispielhafter Seetransport – Beschleunigungen über die Querachse .....	80
Abbildung 44: Beispielhafter Seetransport – Beschleunigungen über die vertikale Schwingachse .....	81
Abbildung 45: Lagerprozess – Temperaturverlauf im Rahmen des optimistischen Szenarios.....	84
Abbildung 46: Lagerprozess – Temperaturverlauf im Rahmen des neutralen Szenarios.....	86
Abbildung 47: Lagerprozess – Temperaturverlauf im Rahmen des pessimistischen Szenarios .....	87
Abbildung 48: Unabhängige Schaltkreise des Energiemanagement-Moduls „DC2080A“.....	91
Abbildung 49: Ermitteltes Linienspektrum für beispielhafte Straßentransporte im Frequenzbereich von 0 Hertz bis 400 Hertz ([Sie14a], S. 45).....	96
Abbildung 50: Ermitteltes Linienspektrum für einen beispielhaften Schienentransport im Frequenzbereich von 0 Hertz bis 400 Hertz ([Sie14a], S. 46).....	97
Abbildung 51: Ermitteltes Linienspektrum für einen beispielhaften Seetransport im Frequenzbereich von 0 Hertz bis 200 Hertz ([Sie14a], S. 47).....	98
Abbildung 52: Ermitteltes Linienspektrum für einen beispielhaften Seetransport im Frequenzbereich von 0 Hertz bis 2,148 Hertz ([Sie14a], S. 47) ....	98
Abbildung 53: Elektromagnetischer Vibrationsgenerator des Typs „EHE-V1-1012“ .....	101
Abbildung 54: Semi-aktiver RFID-Sensortransponder des Typs „TELID®332.nfc“ [Mic17].....	103
Abbildung 55: Anwendungsgerechter NFC-kompatibler Sensortransponder .....	105
Abbildung 56: Erweiterung des Energiemanagement-Moduls um passende Gleichrichterioden und einen anwendungsgerechten Energiespeicher.....	107
Abbildung 57: Verbindungsstück zur Fixierung der Einzelkomponenten des Zustandsüberwachungssystems innerhalb des Industriegehäuses.	108
Abbildung 58: Funktionsmuster eines energieautarken multisensorischen RFID-Transponders zur Überwachung der Parameter Feuchte und Temperatur .....	109
Abbildung 59: Smartphone-Applikation – Menü zur Konfiguration einer Messung.	110
Abbildung 60: Smartphone-Applikation – Statusanzeige.....	110
Abbildung 61: Smartphone-Applikation – Grafische Darstellung von Sensormesswerten.....	111
Abbildung 62: Smartphone-Applikation – Tabellarische Darstellung von Sensormesswerten.....	111

---

Abbildung 63: Stromaufnahme des „TELID <sup>®</sup> 332.nfc“ im Rahmen einer beispielhaften Messung der Parameter Feuchte und Temperatur ...	113
Abbildung 64: Vorgehensmodell zur Bewertung des RFID-Einsatzes ([VDI09], S. 20) .....	124
Abbildung 65: Exemplarische Zielhierarchie eines RFID-Einsatzes (i. A. a. [Man06], S. 118) .....	125
Abbildung 66: Elemente der Prozesskettenmethodik (i. A. a. [Alt09], S. 94 f.).....	127
Abbildung 67: Ursache-Wirkungskette des RFID-Einsatzes in der Logistik ([VDI09], S. 5) .....	128
Abbildung 68: Grundlegende Struktur der Prozesskostenrechnung (i. A. a. [Pul09], S. 129) .....	136
Abbildung 69: Beispielhafte Betrachtung eines logistischen Prozesses (i. A. a. [HHU11], S. 48) .....	136
Abbildung 70: Verrechnung der leistungsmengeninduzierten und leistungsmengenneutralen Kosten (i. A. a. [HHU11], S. 50) .....	138
Abbildung 71: Einteilung von Mehrwegsystemen ([VDI03], S. 17) .....	153
Abbildung 72: Aufbauelemente und Ablauforganisation beim „Depot-Verbuchungs-System“ ([VDI03], S. 24) .....	153

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Bewertung von Indikator-Klebeetiketten bezüglich ihrer Eignung zur qualitativen Überwachung logistischer Prozesse.....	16
Tabelle 2:	Bewertung elektronischer Datenlogger hinsichtlich ihrer Eignung zur qualitativen Überwachung von Distributionsprozessen.....	18
Tabelle 3:	Bewertung von Telematik-Systemen im Hinblick auf ihre Eignung zur qualitativen Überwachung logistischer Prozesse.....	20
Tabelle 4:	Bewertung der Eignung drahtloser Sensornetzwerke zur qualitativen Überwachung von Distributionsprozessen .....	22
Tabelle 5:	Bewertung von semi-aktiven RFID-Sensortranspondern in Bezug auf ihre Eignung zur qualitativen Überwachung von Distributionsprozessen .....	25
Tabelle 6:	Zusammenfassende Bewertung vorhandener Technologien zur qualitativen Überwachung von Distributionsprozessen .....	26
Tabelle 7:	Anwendungsbeispiele verschiedener Energy-Harvesting-Technologien (i. A. a. [ITW16a]; [Sch13]; [Sum09]).....	31
Tabelle 8:	Verluste in Silizium-Solarzellen (i. A. a. [Mar14], S. 355).....	34
Tabelle 9:	Wirkungsgrade verschiedener Solarzellen (i. A. a. [Mar14], S. 357).....	34
Tabelle 10:	Erzielbare Energiespeicherdichte bei Vibrationsgeneratoren – Vergleich zwischen piezoelektrischem und elektromagnetischem Verfahren (i. A. a. [Ou14], S. 10) .....	39
Tabelle 11:	Verwendbarkeit von Sensoren für RFID-Transponder (i. A. a. [Fin15], S. 483).....	47
Tabelle 12:	Relevante Frequenzbereiche und zu erwartende spektrale Leistungsdichten bei Straßen-, Schienen- und Seetransporten (i. A. a. [DIN15b], S. 9; [ASTM12], S. 4; [DIN13], S. 59) .....	53
Tabelle 13:	Vorhandene Beschleunigungen im Rahmen beispielhafter Straßentransporte.....	67
Tabelle 14:	Vorhandene Beschleunigungen während eines beispielhaften Schienentransportes.....	75
Tabelle 15:	Vorhandene Beschleunigungen im Rahmen eines beispielhaften Seetransportes .....	81
Tabelle 16:	Maximale Belastungen im Zusammenhang mit Umschlagprozessen .....	83
Tabelle 17:	Verfügbare Umgebungsenergien im Rahmen der Lagerung .....	87
Tabelle 18:	Relevante Frequenzbereiche zur Energieumwandlung mittels eines an einem Transporthilfsmittel applizierten Vibrationsgenerators bei Straßen-, Schienen- und Seetransporten (i. A. a. [Sie14a], S. 48).....	99

Tabelle 19:	Leistungsaufnahme des ausgewählten multisensorischen RFID-Transponders .....	114
Tabelle 20:	Leistungsabgabe des ausgewählten elektromagnetischen Vibrationsgenerators (i. A. a. ([Sie14a], S. 51) .....	116
Tabelle 21:	Leistungsabgabe der beschafften Photovoltaikzellen .....	118
Tabelle 22:	Leistungsfähigkeit des entwickelten Funktionsmusters .....	118
Tabelle 23:	Gewerbliche Mitarbeiter – Personalkostensätze pro Zeiteinheit.....	152
Tabelle 24:	Prozesskosten im Rahmen eines notwendigen Transponderaustausches.....	155
Tabelle 25:	Maximale Mehrkosten der energieautarken gegenüber der batteriebetriebenen Lösung bei einer maximalen Amortisationszeit von drei Jahren .....	156
Tabelle 26:	Erreichbare Reduzierung der Entsorgungsquote durch eine auf Ladeeinheitenebene erfolgende Zustandsüberwachung im Rahmen der Distribution leicht verderblicher Lebensmittel (Abschätzung) .....	158
Tabelle 27:	Voraussichtlich erzielbare Kosteneinsparungen pro Behälter und Jahr .....	159
Tabelle 28:	Auf tretende Kosten bei der Einführung einer qualitativen Überwachung einzelner Ladeeinheiten mittels energieautarker NFC-Sensortransponder .....	159
Tabelle 29:	Mitarbeiter des mittleren Managements – Personalkostensätze pro Zeiteinheit .....	160
Tabelle 30:	Prozesskosten im Rahmen der Initialisierung einer Sensormessung .....	163
Tabelle 31:	Prozesskosten im Zusammenhang mit der Datenerfassung beim Umschlag .....	163
Tabelle 32:	Einordnung der quantifizierten Kosten im Kontext der Kapitalwertmethode .....	165
Tabelle 33:	NFC-Sensortransponder zur qualitativen Überwachung einzelner Ladeeinheiten in der Distributionslogistik – Kapitalwertberechnung.	166

## Formelverzeichnis

Formel 1:	Berechnung der elektrischen Spannung eines thermoelektrischen Generators.....	35
Formel 2:	Carnot-Wirkungsgrad.....	35
Formel 3:	Induktionsgesetz.....	37
Formel 4:	Berechnung der Standardabweichung der Beschleunigung ([DIN08b], S. 8).....	60
Formel 5:	Berechnung des Mittelwertes der Beschleunigung ([DIN08b], S. 8) ..	60
Formel 6:	Endliche Fourier-Transformierte eines gemessenen Signals ([DIN08b], S. 18).....	93
Formel 7:	Endliche Fourier-Transformierte für digitale Berechnungen ([DIN08b], S. 18).....	94
Formel 8:	Bestimmung eines Spektrums im Rahmen digitaler Berechnungen ([DIN08b], S. 21).....	95
Formel 9:	Berechnung des Kapitalwertes einer Zahlungsreihe im Zeitpunkt $t_0$ (i. A. a. [BLW15], S. 56) .....	143
Formel 10:	Berechnung der Amortisationszeit mittels der Durchschnittsmethode ([Göt14], S. 71) .....	144
Formel 11:	Berechnung der Entsorgungsquote in Prozent .....	158

---

## Abkürzungsverzeichnis

AD-Wandler	Analog-Digital-Wandler
BLE	Bluetooth Low Energy
BSC	Balanced Scorecard
BU	Behälterumlauf
BYOD	Bring Your Own Device
DFT	Diskrete Fourier-Transformation
DU	Datenerfassung beim Umschlag
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
FFT	Fast-Fourier-Transformation
GPS	Global Positioning System
HF	High Frequency
IES	Initialisierung einer Sensormessung
I <sup>2</sup> C	Inter Integrated Circuit
KPI	Key Performance Indicators
LE	Ladeeinheit
LF	Low Frequency
Li-Ion	Lithium-Ionen
NBSC	Netzwerk-Balanced Scorecard
NFC	Near Field Communication
NiMH	Nickel-Metallhydrid
NWA	Nutzwertanalyse
PKR	Prozesskostenrechnung
RFID	Radio Frequency Identification
RMS	Root Mean Square
SPI	Serial Peripheral Interface
TCO	Total Cost of Ownership
TUL-Prozesse	Transport-, Umschlag- und Lagerprozesse
UHF	Ultra High Frequency
USB	Universal Serial Bus





## 1 Einleitung

Im Zusammenhang mit Transport-, Umschlag- und Lagerprozessen (TUL-Prozessen) treten Belastungen auf, die eine Qualitätsminderung bei den zu handhabenden Gütern hervorrufen können (vgl. [DIN15a], S. 5 ff.). In der folgenden **Abbildung 1** sind in Anlehnung an die Norm DIN 30786-1 ausgewählte Belastungen aufgeführt, die mit dem Transport, der Lagerung und dem Umschlag von Waren einhergehen:

<b>Mechanische Belastungen</b>	<b>Klimatische Belastungen</b>	<b>Sonstige Belastungen</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stapeldruck</li> <li>• Fallen</li> <li>• Kippen</li> <li>• Stöße</li> <li>• Periodische Schwingungen</li> <li>• Stochastische Schwingungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sonnenstrahlung</li> <li>• Temperatur</li> <li>• Luftfeuchte</li> <li>• Umgebungsdruck</li> <li>• Niederschlag</li> <li>• Luftströmung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Akustische Belastungen</li> <li>• Biologische Belastungen</li> <li>• Chemische Belastungen</li> </ul>

**Abbildung 1: Mögliche Belastungen im Rahmen von TUL-Prozessen (i. A. a. [DIN15a])**

Die Intensität und Häufigkeit, mit der diese Belastungen auftreten, werden innerhalb von Normen – wie zum Beispiel in der ASTM D4169-14, der ASTM D4728-06 oder der DIN 30786-2 (vgl. [ASTM14]; [ASTM12]; [DIN13]) – beschrieben. Die an den TUL-Prozessen beteiligten Unternehmen stehen in der Verantwortung, die zu handhabenden Güter anhand von Ladungssicherungsmaßnahmen sowie geeigneten Produkt- und Transportverpackungen zu schützen und sicherzustellen, dass das in den Normen beschriebene Maß der Belastungen nicht überschritten wird ([Sie13], S. 78). In einer Distributionskette mit mehreren beteiligten Unternehmen ist es demnach von besonderem Interesse, den Verursacher einer etwaigen Belastungsüberschreitung exakt identifizieren zu können (vgl. [Fal16], S. 50). Allerdings existieren diesbezüglich in der logistischen Praxis zum aktuellen Zeitpunkt noch keine zufriedenstellenden Lösungen (vgl. Kapitel 2, S. 9 ff.).

### 1.1 Problemstellung

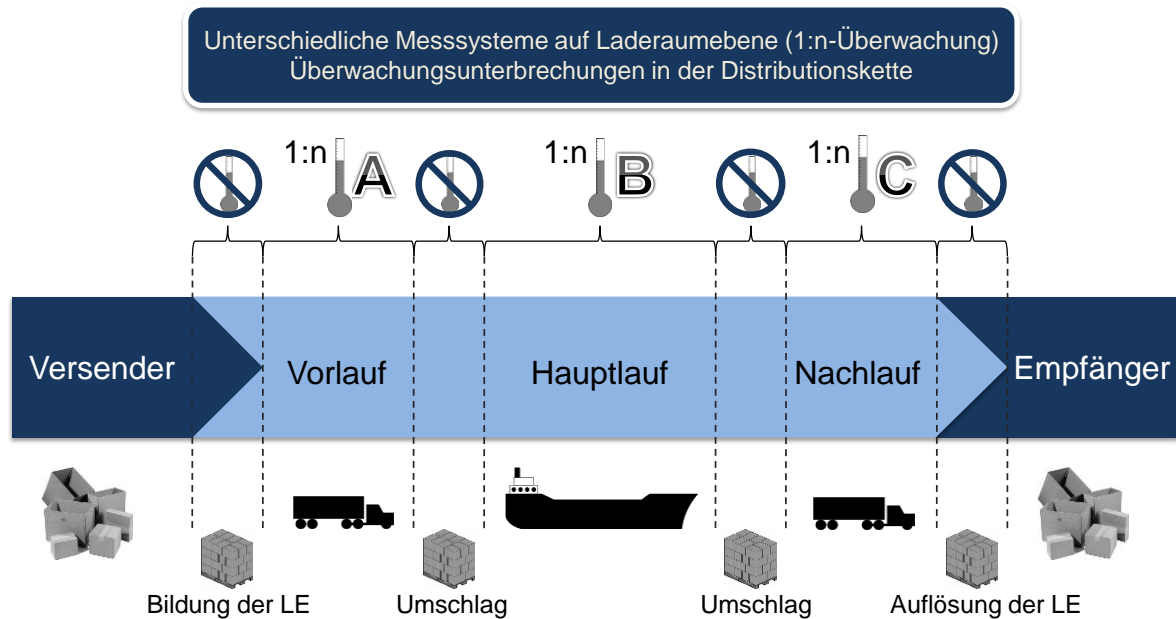
Zwar sind Produkte auf dem Markt verfügbar, mit deren Hilfe eine kontinuierliche Zustandsüberwachung im Rahmen von TUL-Prozessen realisiert werden kann, jedoch kommen diese in der Praxis – insbesondere aus Kostengründen – i. d. R. nur sporadisch oder in speziellen Anwendungsfällen (z. B. zur Überwachung des Zustandes von sehr hochwertigen Gütern) zum Einsatz (vgl. [SHB12], S. 268 ff.). Des Weiteren beschränken sich die vorhandenen Lösungen zumeist auf die Tiefkühl- und Kühllogistik und in diesem Zusammenhang auf die Überwachung der Umgebungstemperatur auf Laderaumebene ([JSS14], S. 112)<sup>1</sup>. Zusätzlich zum Parameter Temperatur gilt es bei der Überwachung von TUL-Prozessen jedoch weitere mechanische und klimatische Belastungen zu berücksichtigen, die bspw. in Form von Stößen, Umgebungsdruck oder Luftfeuchte auftreten und einen negativen Einfluss auf die zu handhabenden Güter haben können (siehe **Abbildung 1**).

Außerdem ergeben sich im Zusammenhang mit einer ausschließlichen Zustandsüberwachung auf der Ebene des Laderaumes nach [JE11] die im Folgenden beschriebenen Probleme: Zunächst tritt bei dieser Überwachungsmethode die Schwierigkeit auf, dass beim Umschlag oder der Zwischenlagerung einzelner Ladeeinheiten Überwachungsunterbrechungen zustande kommen. Zudem ist ein Temperaturmessfühler, der die Temperatur eines Laderaumes aufzeichnet, gleichzeitig mehreren Ladeeinheiten zugeordnet (1:n-Überwachung), was bei im Laderaum auftretenden Temperaturunterschieden zu wenig aussagekräftigen Ergebnissen führt. Weitere Probleme, die durch eine Zustandsüberwachung entstehen, die lediglich auf der Ebene des Laderaumes erfolgt, bestehen in möglichen Unterschieden zwischen den einzelnen Überwachungssystemen für z. B. Lkw, Seeschiff oder Bahn im Hinblick auf Typ, Hersteller, Genauigkeit, Kalibrierung usw. sowie im Umstand, dass sich die Überwachungsmöglichkeiten jeweils nur auf einzelne Teilprozesse der Distributionskette beschränken und damit jeder Prozessbeteiligte selbst für die Überprüfung der Unversehrtheit der Ladeeinheiten verantwortlich ist. (vgl. [JE11], S. 109)

Die wesentlichen Probleme, die durch eine Überwachung auf Laderaumebene entstehen, werden in der folgenden **Abbildung 2** noch einmal veranschaulicht:

---

<sup>1</sup> Hinsichtlich der in dieser Arbeit zugrunde gelegten Definitionen bezüglich der Begriffe Laderaum-, Ladeeinheiten-, Transportverpackungs- und Produktverpackungsebene sei an dieser Stelle auf das Kapitel 2.1 (S. 9 f.) verwiesen.

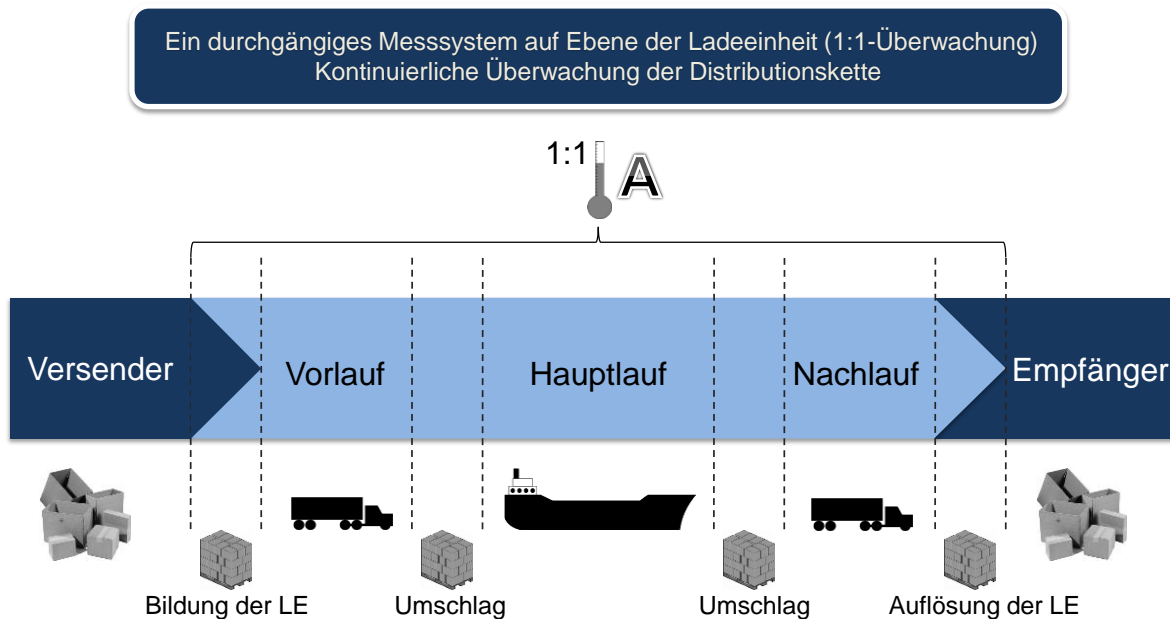


**Abbildung 2: Schwachstellen der Laderaumüberwachung innerhalb einer Distributionskette mit Vor-, Haupt- und Nachlauf ([JE11], S. 109)**

Bei Betrachtung der **Abbildung 2** wird deutlich, dass das Problem der Identifikation des Schadensverursachers insbesondere dann auftritt, wenn Beschädigungen erst während oder nach der Auflösung einer Ladeeinheit zutage treten. Als ein Beispiel hierfür kann der Verderb eines Produktes vor Ablauf des Mindesthaltbarkeitsdatums dienen, der aufgrund einer während des Transportes aufgetretenen Unterbrechung der Kühlkette entsteht. ([Sie14a], S. 10)

Ein vielversprechender Ansatz zur Lösung dieses Problems ist der Einsatz sogenannter multisensorischer Radio Frequency Identification (RFID)-Transponder. Das Forschungsprojekt „Entwicklung eines multisensorischen Transponders zur Überwachung und Steuerung von logistischen Prozessen“ des Instituts für Distributions- und Handelslogistik (IDH) des VVL e. V. in Dortmund hat bereits gezeigt, dass mithilfe des Einsatzes von multisensorischen RFID-Transpondern Datenlogger realisierbar sind, die eine kontinuierliche Überwachung der Distributionskette auf Ladeeinheitenebene (1:1-Überwachung) gewährleisten, wobei zudem Parameter wie z. B. Druck, Beschleunigung oder Feuchte Berücksichtigung finden können (vgl. [Ent10]). Außerdem kann das Auslesen der Überwachungsdaten automatisiert und damit regelmäßig erfolgen, wodurch das Aufdecken individueller Fehler innerhalb einer Distributionskette ermöglicht wird und insgesamt die Prozesstransparenz deutlich gesteigert werden kann (vgl. [JE11], S. 110; [Sie14b], S. 26).

Die elementaren Vorteile, die die Realisierung einer Zustandsüberwachung auf Ladeeinheitenebene im Vergleich zu einer Überwachung auf der Ebene des Laderaumes aufweist, werden in der **Abbildung 3** verdeutlicht, aus der u. a. hervorgeht, dass mittels eines durchgängigen Messsystems auf der Ebene der Ladeeinheit einheitliche Messdaten ohne Überwachungsunterbrechungen aufgezeichnet werden können.



**Abbildung 3:** Zustandsüberwachung auf der Ebene der Ladeeinheit innerhalb einer Distributionskette mit Vor-, Haupt- und Nachlauf ([JE11], S. 109)

Um sensorische RFID-Transponder jedoch auch wirtschaftlich einsetzen zu können, ist zur Vermeidung aufwendiger Rücktransporte eine Integration der Transponder in mehrwegfähige Transporthilfsmittel anzustreben, die sich in entsprechenden Kreisläufen bewegen, da Sensortransponder im Vergleich zu reinen Identifikationstranspondern sehr kostenintensiv sind und ihr Einsatz als Einwegdatenträger damit nur für hochwertige Güter geeignet ist ([Sie13], S. 78).

Ein wesentliches Problem, das hierbei allerdings auftritt, ist die vergleichsweise geringe Lebensdauer der Energiequelle (semi-)aktiver Transponder<sup>2</sup>. Während die Lebenserwartung von Transporthilfsmitteln in der Regel im Bereich mehrerer Jahre liegt, reicht die Energie der Transponder in Abhängigkeit von der Nutzungshäufigkeit,

<sup>2</sup> Bei Sensortranspondern zur kontinuierlichen Aufzeichnung definierter Messwerte handelt es sich um semi-aktive oder aktive Transponder, bei denen eine vom Schreib-Lesegerät unabhängige Energiequelle erforderlich ist, die u. a. zur Versorgung der Sensorik benötigt wird. Eine Beschreibung der Funktionsweise dieser Transpondertypen erfolgt im Kapitel 2.2.5 (S. 23 ff.).

den Sensortypen und der angestrebten Genauigkeit der Messdaten zum Teil nur für wenige Wochen oder Monate. Aus diesem Grund ist ein regelmäßiger Austausch der Transponder bzw. ihrer Energiequellen erforderlich, was sich infolge der entstehenden Kosten entsprechend negativ auf die Wirtschaftlichkeit auswirkt. ([JS15], S. 184)

## 1.2 Zielsetzung der Arbeit

Um dem im Kapitel 1.1 dargestellten Sachverhalt zu begegnen, wird innerhalb der vorliegenden Arbeit die Realisierung einer autarken Energieversorgung bei multisensorischen RFID-Transpondern angestrebt. Der Lösungsansatz zur Erreichung dieser Zielstellung besteht darin, als Alternative zu Primärzellen – diese werden nach dem aktuellen Stand der Technik in den meisten Fällen für die Energieversorgung von (semi-)aktiven RFID-Transpondern eingesetzt (vgl. Kapitel 2.2.5, S. 23 ff.) – auf sogenannte Energy-Harvesting-Technologien zurückzugreifen<sup>3</sup>.

Durch den Einsatz von Energy-Harvesting-Modulen kann vorhandene Umgebungenergie, die im Zusammenhang mit TUL-Prozessen zum Beispiel in Form von Vibrationen und Stößen während eines Transportes, durch Lichtstrahlung im Rahmen der Lagerung oder durch auftretende Temperaturdifferenzen verfügbar ist, in elektrische Energie umgewandelt und somit zur Energieversorgung des Transponders genutzt werden (vgl. [Sie13], S. 79). Idealerweise kann der Sensortransponder hierdurch über die gesamte Lebensdauer des Transporthilfsmittels in diesem verbleiben und der Wartungsaufwand derartig minimiert werden, dass die Wirtschaftlichkeit einer Zustandsüberwachung auf Ladeeinheitenebene – auch aus Sicht der Anwender – nicht nur für besonders hochwertige Güter gegeben ist.

Energy-Harvesting-Technologien, die über eine grundsätzliche Eignung zur Energieumwandlung innerhalb von logistischen Prozessen verfügen, sind Vibrationsgeneratoren, Photovoltaikzellen und thermoelektrische Generatoren (vgl. [Sie14c], S. 12). Bezüglich der potenziellen elektrischen Energie, die mithilfe dieser Technologien im Zusammenhang mit TUL-Prozessen – bezogen auf die Applikation an einem mehrwegfähigen Transporthilfsmittel – bereitgestellt werden kann, sollen im Rahmen

---

<sup>3</sup> Der Begriff Energy-Harvesting im Allgemeinen sowie die verschiedenen für die Anwendung im Rahmen logistischer Prozesse in Frage kommenden speziellen Energy-Harvesting-Technologien werden im Kapitel 3 (S. 29 ff.) näher erläutert.

dieser Arbeit mittels der Durchführung umfangreicher Praxis- und Laboruntersuchungen neue wissenschaftliche Erkenntnisse gewonnen werden.

Die hierbei erzielten Ergebnisse bilden sowohl im Hinblick auf die angestrebte Entwicklung eines Funktionsmusters eines energieautarken multisensorischen RFID-Transponders, dessen grundsätzliche technische Machbarkeit und Funktionsfähigkeit innerhalb der vorliegenden Arbeit nachgewiesen werden soll, als auch in Bezug auf zukünftige Produktentwicklungen im Bereich der qualitativen Überwachung von Distributionsketten eine Grundvoraussetzung und repräsentieren aus diesem Grund den Schwerpunkt dieser Arbeit.

Zusätzlich zur Untersuchung der technischen Realisierbarkeit gilt es auch eine Bewertung der Wirtschaftlichkeit eines potenziellen Praxiseinsatzes energieautarker RFID-Sensortransponder zu vollziehen, indem die hierdurch entstehenden Kosten bzw. Aufwendungen dem erzielbaren Nutzen bzw. Ertrag gegenübergestellt werden. Durch die kombinierte Verwendung geeigneter Methoden, die im Zusammenhang mit der Wirtschaftlichkeitsbewertung von Investitionen Anwendung finden, sollen hierbei konzentrierte Aussagen bezüglich der ökonomischen Vorteilhaftigkeit der Verwendung wartungsarmer Sensortransponder zur qualitativen Überwachung logistischer Prozesse erarbeitet werden.

### **1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit**

Die vorliegende Arbeit gliedert sich insgesamt in acht Kapitel, wobei im ersten Kapitel zunächst die Problemstellung bzw. der Handlungsbedarf bei Technologien zur qualitativen Überwachung logistischer Prozesse in kurzer Form erläutert wird. Darauf basierend werden die elementaren Zielstellungen abgeleitet, die im Rahmen dieser Arbeit verfolgt werden. Außerdem erfolgen eine Beschreibung der Vorgehensweise, mithilfe derer die definierten Ziele erreicht werden sollen, sowie eine Darstellung hinsichtlich des logischen Aufbaus der Arbeit.

Im Kapitel 2 wird der aktuelle Stand der Technik in Bezug auf Zustandsüberwachungstechnologien für den Einsatz in der Distributionslogistik noch einmal ausführlich dargelegt, indem vorhandene Lösungen anhand zuvor definierter Kriterien im Hinblick auf ihre Eignung zur qualitativen Überwachung einzelner Ladeinheiten bewertet werden und hieraus der existierende Forschungsbedarf hergeleitet wird.

Das Kapitel 3 umfasst in erster Linie die technische Erläuterung der wesentlichen Einzelkomponenten, die bei der Entwicklung des angestrebten energieautarken multisensorischen RFID-Transponders von Relevanz sind. Des Weiteren wird in diesem Kapitel die technische Gesamtlösung – unter anderem bezüglich des bei der Datenübertragung zu verwendenden Frequenzbereiches – eingegrenzt.

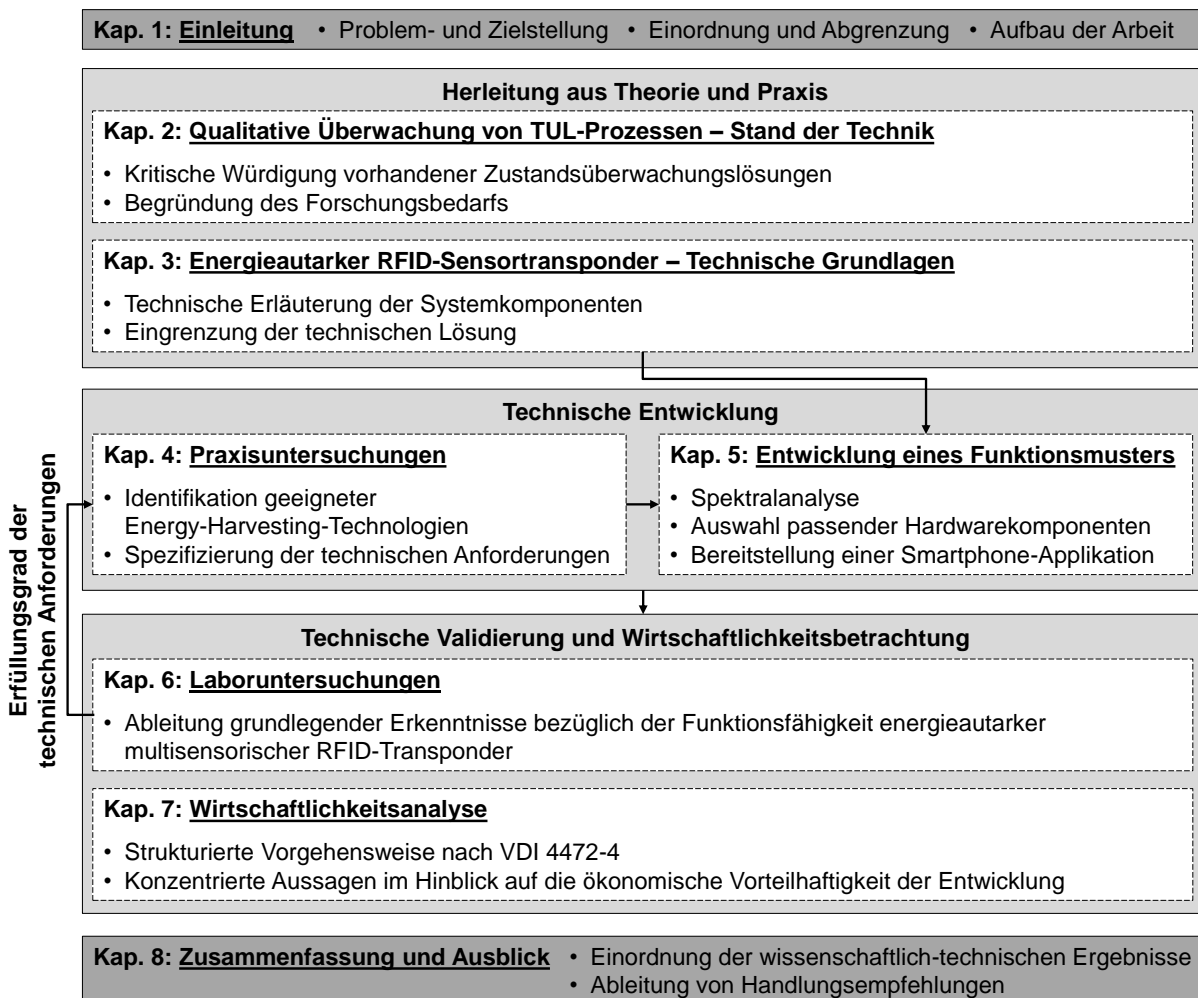
Einen elementaren Teil dieser Arbeit bildet das Kapitel 4, in welchem im Zusammenhang mit eigens durchzuführenden Praxisuntersuchungen erstmalig die auf Ladeeinheitenebene in Form von Lichtstrahlung, Beschleunigungen und Temperaturdifferenzen zur Verfügung stehenden Umgebungsenergien gemessen und ausgewertet werden. Hierdurch lassen sich insbesondere die zur Energieumwandlung innerhalb von Distributionsprozessen am besten geeigneten Energy-Harvesting-Technologien identifizieren sowie die bei der im Kapitel 5 zu vollziehenden Funktionsmusterentwicklung zu berücksichtigenden technischen Anforderungen spezifizieren.

Auf Grundlage der in den Kapiteln 3 und 4 erarbeiteten Ergebnisse erfolgt im fünften Kapitel die Entwicklung eines Funktionsmusters eines RFID-Sensortransponders, der autark mittels Energy-Harvesting betrieben wird. Um bei der hierfür erforderlichen Auswahl passender Hardwarekomponenten einen anwendungsgerechten Vibrationsgenerator auswählen zu können, gilt es zur Bestimmung der optimalen Eigenfrequenz des Generators im Vorfeld eine Spektralanalyse auf Basis der im Rahmen der Praxismessungen erhobenen Beschleunigungsmesswerte auszuführen. Zudem ist die Bereitstellung einer Software bzw. Smartphone-Applikation erforderlich, mithilfe derer der zu entwickelnde Transponder beschrieben und ausgelesen werden kann.

Anschließend werden innerhalb des sechsten Kapitels Laboruntersuchungen hinsichtlich der Leistungsfähigkeit des entwickelten Funktionsmusters durchgeführt, wobei zuerst der Leistungsbedarf des exemplarisch auszuwählenden Sensortransponders bestimmt und dieser im Anschluss der elektrischen Leistung gegenübergestellt wird, die mittels der einzusetzenden Energy-Harvesting-Module unter praxisnahen Umgebungsbedingungen erzielt werden kann. Hieraus können wiederum grundlegende wissenschaftliche Erkenntnisse in Bezug auf die Funktionsfähigkeit energieautarker multisensorischer RFID-Transponder zur Überwachung des Zustandes einzelner Ladeeinheiten in der Distributionslogistik gewonnen werden.

Das siebte Kapitel beinhaltet die neben der Untersuchung der technischen Realisierbarkeit wartungsarmer RFID-Sensortransponder durchzuführende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, die in Anlehnung an die in der VDI-Richtlinie 4472 (Blatt 4) vorgegebene strukturierte Vorgehensweise zur Kosten-Nutzenbewertung von RFID-Systemen in der Logistik erfolgt (vgl. [VDI09]) und im Rahmen derer konzentrierte Aussagen im Hinblick auf die ökonomische Vorteilhaftigkeit des potenziellen Praxiseinsatzes des entwickelten Zustandsüberwachungssystems getroffen werden.

Abschließend werden im Kapitel 8 die erarbeiteten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse zusammengefasst und bezüglich ihrer Nutzbarkeit im Zusammenhang mit weiterführenden Forschungsarbeiten bzw. Produktentwicklungen eingeordnet. Des Weiteren werden wichtige Handlungsempfehlungen herausgestellt, die es im Zuge einer eventuellen Produktentwicklung umzusetzen bzw. zu beachten gilt. Der logische Aufbau der Arbeit wird in der folgenden **Abbildung 4** visualisiert:



**Abbildung 4: Aufbau der Arbeit**



## **2 Zustandsüberwachung in der Distributionslogistik – Stand der Technik**

In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand der Technik in Bezug auf vorhandene sowie gegenwärtig erforschte Technologien zur Zustandsüberwachung von Distributionsketten analysiert und hieraus die existierende Forschungslücke abgeleitet.

Hierbei werden zunächst die wesentlichen Anforderungen herausgearbeitet, die ein Zustandsüberwachungssystem für die Anwendung in der Distributionslogistik erfüllen muss, und daraus spezielle Kriterien abgeleitet, anhand derer eine Bewertung unterschiedlicher Technologien erfolgen kann.

Im Rahmen der anschließend durchzuführenden Bewertung der als relevant identifizierten Lösungen werden insbesondere deren Schwachstellen hervorgehoben und auf diese Weise der vorhandene Forschungsbedarf verdeutlicht, der den Gegenstand der vorliegenden Arbeit darstellt.

### **2.1 Definition von Kriterien zur Bewertung von Technologien für die qualitative Überwachung logistischer Prozesse**

Aus der anfangs dargelegten Problemstellung heraus lassen sich die im Folgenden beschriebenen Kriterien zur Bewertung von Technologien zur qualitativen Überwachung logistischer Prozesse ableiten.

Die ersten zwei Bewertungskriterien, die es in diesem Zusammenhang zu nennen gilt, sind die Ebene sowie die Wirtschaftlichkeit der Zustandsüberwachung. Die Ebene der Zustandsüberwachung ergibt sich aus dem Einsatzobjekt, an dem eine Überwachungstechnologie appliziert wird (vgl. [SWF<sup>+</sup>06], S. 161 ff.), wobei innerhalb dieser Arbeit grundsätzlich zwischen der Laderaum-, Ladeeinheiten-, Transportverpackungs- und Produktverpackungsebene unterschieden wird.

Einsatzobjekte wie Sattelaufleger, ISO-Container oder Güterwaggons, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit der Laderaumebene zugeordnet werden, sind in der Fachliteratur als Transporteinheiten definiert, die mithilfe entsprechender Transportmittel wie Lkw oder Zug befördert werden ([TH11], S. 164). In diesen Transporteinheiten werden wiederum Ladeeinheiten transportiert, die nach der VDI 3968 als aus einem einzelnen oder mehreren Gütern bestehende Packgüter definiert sind, die als

Ganzes transportiert, umgeschlagen und gelagert werden ([VDI13], S. 3). Einsatzobjekte, die der Ebene der Ladeeinheit zugewiesen werden, sind zum Beispiel mehrwegfähige Transporthilfsmittel wie Rollbehälter, Paletten oder Großladungsträger.

Auf der Verpackungsebene wird zwischen Transport- und Produktverpackungen unterschieden. Bei einer Transportverpackung handelt es sich hierbei nach der Norm DIN 55405 um eine

„Verpackung, deren Ausführung von den Anforderungen im Bereich der Distribution und der Transportbelastung, insbesondere Stapeln und Kommissionieren, bestimmt wird und die im Allgemeinen [...] der Zusammenfassung einer Anzahl von Packungen dient“ ([DIN14a], S. 110).

Im Kontext dieser Arbeit zählen hierzu z. B. Transportbehälter oder Wellpappkartons, die über modulare Abmessungen verfügen und deren Handhabung auf bzw. in den oben erwähnten Transporthilfsmitteln erfolgt. Mittels dieser Transportverpackungen werden indessen mehrere Packungen zusammengefasst, welche nach der DIN 55405 aus der Vereinigung von zu verpackendem Gut und dessen Verpackung hervorgehen (vgl. [DIN14a], S. 89) und der Ebene der Produktverpackung zugeordnet werden.

Im Kapitel 1.1 wurde bereits dargelegt, dass Zustandsüberwachungstechnologien auf der Ladeeinheiten- oder Verpackungsebene in der Praxis – insbesondere aus Kostengründen – zumeist nur sporadisch oder lediglich im Rahmen spezieller Anwendungen zum Einsatz kommen. Da die Kosten mit dem Detaillierungsgrad der Überwachung bzw. der Anzahl der zu überwachenden Einsatzobjekte ansteigen, erscheint die Realisierbarkeit einer qualitativen Überwachung auf Verpackungsebene, die sich nicht ausschließlich auf hochwertige Güter bezieht, unter der Berücksichtigung des Kriteriums der Wirtschaftlichkeit nach dem aktuellen Stand der Technik als schwierig umsetzbar. Aus diesem Grund liegt das Ziel dieser Arbeit zunächst in der Realisierung einer Technologie zur wirtschaftlichen Überwachung des Zustandes einzelner Ladeeinheiten bzw. mehrwegfähiger Transporthilfsmittel (vgl. Kapitel 1.2).

Im Rahmen der im nächsten Kapitel durchzuführenden Bewertung vorhandener Lösungen zur Zustandsüberwachung in der Distributionslogistik gilt es daher bezüglich der Bewertungskriterien der Überwachungsebene und der Wirtschaftlichkeit die folgenden Fragen zu beantworten:

- Ist mit der betrachteten Technologie eine qualitative Überwachung auf Ladeeinheitenebene realisierbar?
- Kann eine wirtschaftliche Zustandsüberwachung auf der Ebene der Ladeeinheit auch für Güter gewährleistet werden, die nicht über einen besonders hohen Wert verfügen?

Weitere Kriterien, die bei der Bewertung von Technologien zur qualitativen Überwachung logistischer Prozesse heranzuziehen sind, beziehen sich auf die Art der Datenerfassung sowie die Form der Datenübertragung.

Hinsichtlich der Art der Datenerfassung kann zwischen der diskreten und der kontinuierlichen Erfassung von Messwerten unterschieden werden, wobei unter der diskreten Datenerfassung die Ermittlung bestimmter Zustandsparameter in zeitlich definierten Abständen und unter der kontinuierlichen Datenerfassung die Aufzeichnung relevanter Messwerte über den gesamten Betrachtungszeitraum (inklusive der Speicherung des konkreten Zeitpunktes der Messung) verstanden wird (vgl. [SHB12], S. 265). Aufgrund des durch eine kontinuierliche Datenerfassung entstehenden deutlich höheren Informationsgehalts sowie der damit verbundenen Möglichkeit, die schadenverursachenden Akteure innerhalb von Distributionsketten exakt identifizieren zu können (vgl. [SHB12], S. 265 f.), ist die Entwicklung einer Zustandsüberwachungstechnologie anzustreben, die eine kontinuierliche Datenaufzeichnung gewährleistet.

Ziel bezüglich der Datenübertragung muss es sein, ein Auslesen der Messdaten ohne Einfluss auf das zu überwachende Transporthilfsmittel zu gewährleisten, um hierdurch eine regelmäßige Überwachung an allen relevanten Schnittstellen einer Distributionskette zu ermöglichen (vgl. Kapitel 1.1). Hierfür ist eine kontaktlose Datenübertragung via Funk erforderlich, da kabelgebundene Systeme, die bspw. über eine Universal Serial Bus (USB)-Schnittstelle an einem Computer ausgelesen werden können, der zuvor definierten Anforderung nicht gerecht werden. Dieses ist durch den hohen Aufwand begründet, der beim Auslesen kabelgebundener Zustandsüberwachungstechnologien dadurch entsteht, dass diese zunächst manuell von dem jeweiligen Transporthilfsmittel entfernt werden müssen, um anschließend an einem separaten Leseplatz ausgelesen werden zu können ([JE11], S. 109).

Im Zusammenhang mit der im Kapitel 2.2 zu vollziehenden Technologiebewertung sind hinsichtlich der Art der Datenerfassung und der Form der Datenübertragung dementsprechend die im Folgenden aufgeführten Fragen zu stellen:

- Wird mit der zu bewertenden Zustandsüberwachungstechnologie eine kontinuierliche Aufzeichnung relevanter Messparameter sichergestellt?
- Besteht die Möglichkeit einer kontaktlosen Datenübertragung via Funk?

Wie bereits im Kapitel 1.1 ausführlich dargestellt, sind zwei weitere Anforderungen, die ein System zur qualitativen Überwachung einzelner Ladeeinheiten erfüllen sollte, die Mehrwegfähigkeit sowie die Funktionalität, mehrere Zustandsparameter gleichzeitig überwachen zu können. Im Hinblick auf die im Kapitel 2.2 durchzuführende Bewertung existierender Zustandsüberwachungstechnologien ist demnach die Beantwortung der folgenden Fragen erforderlich:

- Verfügt die betrachtete Überwachungslösung über eine Mehrwegfähigkeit?
- Können mithilfe der zu bewertenden Technologie mehrere Zustandsparameter gleichzeitig überwacht werden?

Als letzter elementarer Parameter zur Beurteilung der Eignung von Zustandsüberwachungssystemen ist die Art der Stromversorgung zu nennen, die u. a. für die kontinuierliche Datenaufzeichnung durch einen oder mehrere Sensor(en) erforderlich ist. Da bei der angestrebten qualitativen Überwachung auf Ladeeinheitenebene die Möglichkeit der Stromversorgung über das Bordnetz eines Transportmittels weitestgehend entfällt, existieren in diesem Zusammenhang generell die Möglichkeiten, die jeweilige Technologie mittels einer Primärzelle, einer Sekundärzelle oder per Energy-Harvesting mit elektrischer Energie zu versorgen.

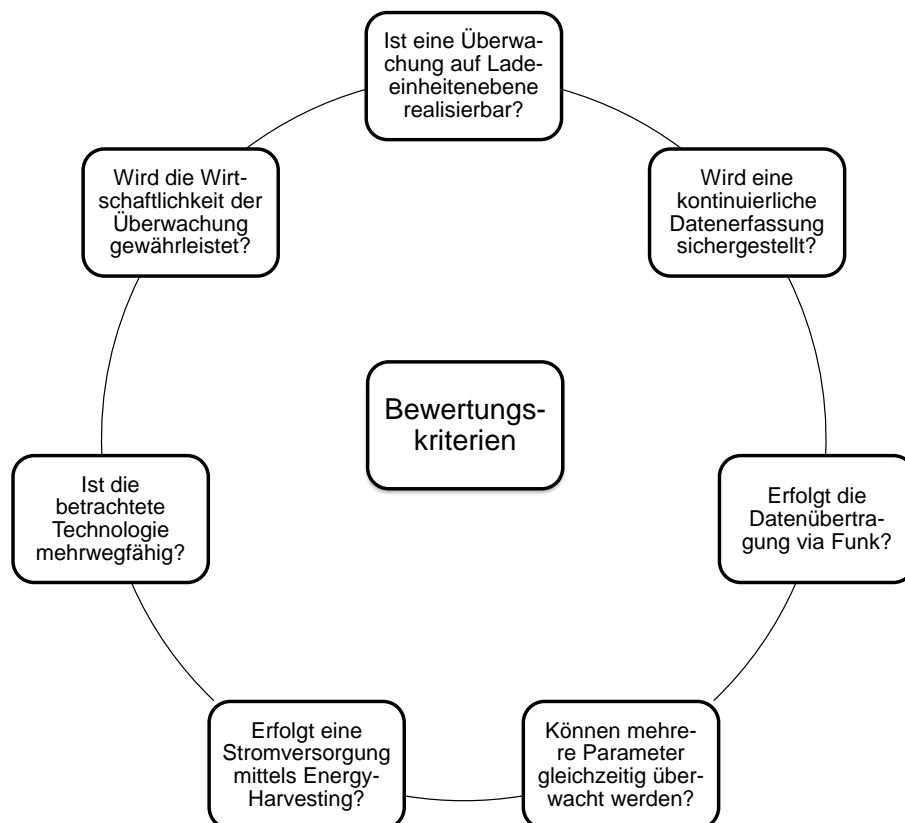
Wesentliche Gründe, die im Zusammenhang mit der Energieversorgung von Sensorapplikationen für den Einsatz von Energy-Harvesting-Generatoren anstelle von Primär- oder Sekundärzellen sprechen, sind die Reduzierung des Wartungsaufwandes für den Austausch von Batterien über die Lebensdauer einer Applikation sowie die erreichbare Steigerung der Betriebssicherheit (vgl. [Kut14]; [Lan14a]; [Kre12]; [Nie11]). Des Weiteren ist die Anwendung von Energy-Harvesting-Lösungen auch unter der Berücksichtigung ökologischer Aspekte vorteilhaft, da hierdurch Sonderab-

fälle, die bei der Verwendung von Primärzellen bspw. in Form von Lithium entstehen, vermieden bzw. reduziert werden können (vgl. [Lan14a]). Weitere Nachteile von Primärzellen sind z. B. ihre nichtdeterministische Lebensdauer, entstehende Entsorgungskosten oder vorhandene Transportbeschränkungen [Per11].

Aus den zuvor genannten Gründen sind Energy-Harvesting-Applikationen (sofern diese realisierbar sind) in den meisten Fällen gegenüber Batterielösungen zu bevorzugen. Bezüglich der Art der Stromversorgung ergibt sich daher die folgende Fragestellung bzw. das folgende Bewertungskriterium:

- Erfolgt bei der betrachteten Zustandsüberwachungstechnologie eine Stromversorgung mittels Energy-Harvesting?

In der folgenden **Abbildung 5** sind die definierten Bewertungskriterien für Technologien zur qualitativen Überwachung von TUL-Prozessen, die es im Rahmen der im Kapitel 2.2 zu vollziehenden kritischen Würdigung vorhandener Zustandsüberwachungslösungen heranzuziehen gilt, noch einmal zusammenfassend dargestellt:



**Abbildung 5: Wesentliche Kriterien zur Bewertung von Technologien für die qualitative Überwachung von TUL-Prozessen**

## 2.2 Bewertung vorhandener Lösungen zur Zustandsüberwachung in der Distributionslogistik

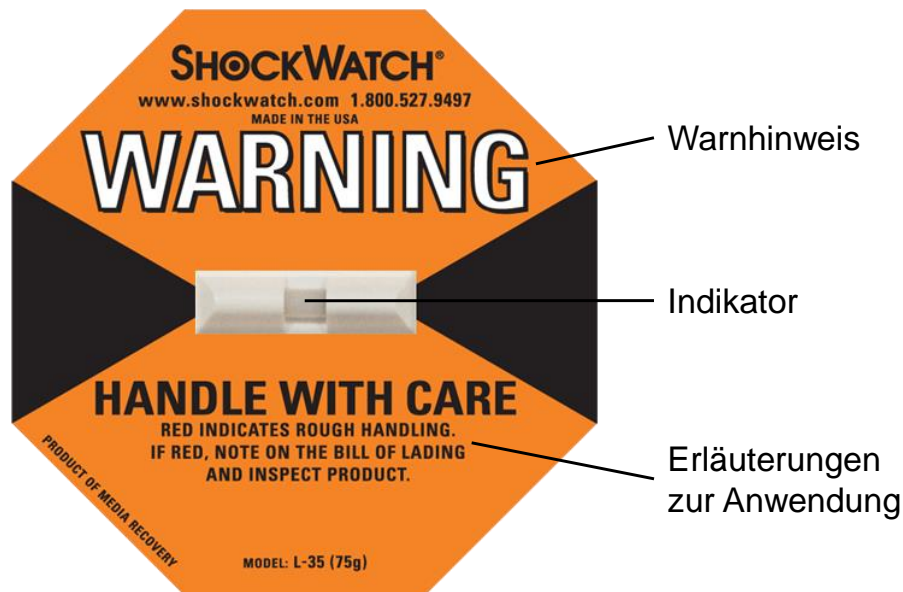
Die am Markt verfügbaren Technologien zur Transportüberwachung lassen sich nach [SHB12] grundsätzlich in die drei Kategorien der Indikatorlösungen, der elektronischen Datenlogger sowie der Telematik-Systeme einteilen ([SHB12], S. 266). Diese Einteilung wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit um die Kategorien der drahtlosen Sensornetzwerke sowie der sensorischen RFID-Transponder erweitert, welche den Gegenstand vieler aktueller Forschungsarbeiten darstellen (siehe hierzu z. B. [Rob16]; [ML14] oder [Sie14a]).

Für die einzelnen Technologiekategorien gilt es eine kritische Würdigung zu vollziehen, indem die im Kapitel 2.1 formulierten Fragestellungen bezüglich der definierten Bewertungskriterien für Technologien zur Zustandsüberwachung innerhalb von Distributionsprozessen beantwortet werden.

### 2.2.1 Indikator-Klebeetiketten

Ein Indikator ist ein mess- oder wahrnehmbarer Ersatzsachverhalt, der im Zusammenhang mit der Transportüberwachung eine Aussagekraft im Hinblick auf eine bestimmte mechanische oder klimatische Belastung besitzt, auf deren Intensität in der Regel durch eine chemisch bedingte Verfärbung einer – zumeist in ein Klebeetikett integrierten – Substanz, die bei der Überschreitung eines vordefinierten Schwellenwertes erfolgt, Rückschlüsse gezogen werden können (vgl. [Ent10], S. 37).

Die ShockWatch Corporation mit Sitz in Dallas, bei der es sich um einen der marktführenden Hersteller für Indikatorlösungen handelt, bietet beispielsweise Etiketten zur qualitativen Überwachung der Parameter Temperatur, Beschleunigung und Neigung an, wobei für die einzelnen zuvor genannten Parameter jeweils mehrere unterschiedliche Schwellenwerte verfügbar sind, die überwacht werden können (vgl. [Sho16a]). In der folgenden **Abbildung 6** ist beispielhaft ein Indikator-Klebeetikett dieses Anbieters dargestellt, das speziell für die Beschleunigungsüberwachung eingesetzt werden kann:



**Abbildung 6: Indikator-Klebeetikett zur Überwachung der Beschleunigung [Sho16b]**

Indikatorlösungen weisen im Allgemeinen den Vorteil auf, dass sie eine kostengünstige Überwachung der sachgerechten Behandlung eines Transportgutes ermöglichen und daher in den meisten Fällen für einen wirtschaftlichen Einsatz auf der Ebene der Ladeinheit geeignet sind (vgl. [SHB12], S. 266). Ein wesentlicher Nachteil, den der Großteil der verfügbaren Indikatorlösungen aufweist, ist hingegen die fehlende Mehrwegfähigkeit. Diese kommt dadurch zustande, dass Indikatoren das Über- oder Unterschreiten eines definierten Toleranzbereiches zumeist durch eine farbliche, irreversible Kennzeichnung anzeigen und aus diesem Grund nur einmalig verwendet werden können (vgl. [SBF10], S. 17).

Ebenfalls nachteilig ist das Nichtvorhandensein einer kontinuierlichen Zustandsüberwachung sowie einer kontaktlosen Datenübertragung via Funk. Des Weiteren ist zu erwähnen, dass Indikator-Klebeetiketten in der Regel auf die Überwachung nur eines Zustandsparameters beschränkt sind, weshalb für die Betrachtung verschiedener relevanter Umgebungsparameter der Einsatz mehrerer unterschiedlicher Etiketten gleichzeitig erforderlich ist.

In der **Tabelle 1** ist das Ergebnis der kritischen Würdigung der Zustandsüberwachungstechnologie der Indikator-Klebeetiketten noch einmal zusammenfassend aufgeführt:

**Tabelle 1: Bewertung von Indikator-Klebeetiketten bezüglich ihrer Eignung zur qualitativen Überwachung logistischer Prozesse**

Bewertungskriterium	Überwachungstechnologie
	Indikator-Klebeetiketten
Ist eine qualitative Überwachung auf Ladeeinheitenebene realisierbar?	Ja
Kann eine wirtschaftliche Zustandsüberwachung auf der Ebene der Ladeeinheit gewährleistet werden?	Ja
Wird eine kontinuierliche Aufzeichnung relevanter Messparameter sichergestellt?	Nein
Besteht die Möglichkeit einer kontaktlosen Datenübertragung via Funk?	Nein
Ist die betrachtete Lösung mehrwegfähig?	Nein
Können mehrere Zustandsparameter gleichzeitig überwacht werden?	Einsatz mehrerer unterschiedlicher Etiketten erforderlich
Erfolgt eine Stromversorgung mittels Energy-Harvesting?	Keine Stromversorgung erforderlich

### 2.2.2 Elektronische Datenlogger

Elektronische Datenlogger verfügen im Vergleich zu Indikator-Klebeetiketten über den elementaren Vorteil, dass die zu überwachenden Transportbedingungen kontinuierlich und mit dem exakten Zeitwert der einzelnen Messungen aufgezeichnet und gespeichert werden, wodurch der Zeitpunkt eines Schadens genau bestimmt werden kann und darüber hinaus – auf der Grundlage einer entsprechenden Analyse der gespeicherten Messdaten – eine langfristige Optimierung von Transportrouten hinsichtlich ihrer potenziellen Risikoquellen möglich wird (vgl. [SBF10], S. 17). Außerdem können mithilfe eines elektronischen Datenloggers mehrere Zustandsparameter gleichzeitig auf der Ebene der Ladeeinheit überwacht werden (vgl. [SHB12], S. 266).

Auf dem Markt existieren diesbezüglich sowohl Einweglösungen wie beispielsweise der „EBI 330-T85 Einweg-USB-Temperaturdatenlogger“ der ebro Electronic GmbH oder der „tempmate.®-S1 V2“ der imec Messtechnik GmbH ([Ebr14], S. 475; [Ime16]) als auch Mehrweglösungen wie z. B. der Datenlogger „MSR 165“ der schweizerischen MSR Electronics GmbH oder der „LogTag® UTRIX-16“ der CiK Solutions GmbH ([MSR14], S. 17; [Cik15], S. 151).

Die beispielhaft aufgeführten Produkte sowie elektronische Datenlogger im Allgemeinen weisen jedoch grundsätzlich Nachteile auf. Zum einen ist für das Auslesen der aufgezeichneten Messdaten ein verhältnismäßig hoher Aufwand zu betreiben, da



ein manuelles Entfernen des Datenloggers von der Ladeeinheit sowie ein kabelgebundenes Auslesen an einem Leseplatz notwendig sind. Zum anderen verfügen sie – zum Beispiel im Vergleich zu Indikator-Klebeetiketten oder RFID-Sensortranspondern – über einen relativ hohen Preis sowie eine begrenzte Einsatzdauer, die durch den Betrieb mittels Primär- oder Sekundärzellen zustande kommt.

Zwar sind zum Teil Einweg-Datenlogger erhältlich, die in ihrer Anschaffung günstiger sind als ausgewählte RFID-Sensortransponder, jedoch beschränken sich diese Einweglösungen zumeist auf die Messung der Temperatur sowie die Überwachung nur eines Transportweges.

Der wesentliche Vorteil von Mehrweg- gegenüber Einweg-Datenloggern kommt durch die Verwendung wiederaufladbarer Sekundärzellen bzw. Akkumulatoren zustande, durch die ein mehrfacher Einsatz des Datenloggers bzw. die Betrachtung mehrerer Transportwege ermöglicht wird. Allerdings ergibt sich in diesem Zusammenhang erneut ein zusätzlicher logistischer Aufwand für den Anwender, da die verwendeten Akkumulatoren bei einem Großteil der am Markt vorhandenen Produkte im Anschluss an ihren Einsatz manuell über eine USB-Schnittstelle – zum Beispiel an einem Computer oder Notebook – aufgeladen werden müssen.

Neben den zuvor beschriebenen gebräuchlichen elektronischen Datenloggern sind mittlerweile auch Funk-Datenlogger wie beispielsweise der „Beschleunigungslogger blueDAN axel°\_4.0“ der ESYS GmbH oder der „testo 184 G1“ der Testo AG verfügbar ([Esy16]; [Tes16]), mithilfe derer eine kontaktlose Datenübertragung – z. B. über Bluetooth Low Energy (BLE)<sup>4</sup> oder Near Field Communication (NFC)<sup>5</sup> – erfolgen kann und damit der hohe Aufwand für das Auslesen der gemessenen Zustandsdaten reduziert wird. Der hierdurch erzielte Vorteil schlägt sich jedoch in der Regel in einem deutlich höheren Anschaffungspreis nieder. Des Weiteren bleibt der Nachteil der begrenzten Einsatzdauer der eingesetzten Primär- oder Sekundärzellen auch bei den angebotenen Funk-Datenloggern bestehen.

---

<sup>4</sup> Unter Bluetooth Low Energy wird im Allgemeinen eine stromsparende Version des Funkübertragungs-Standards Bluetooth verstanden, welche für spezielle Applikationen im „Internet der Dinge“ entwickelt wurde, die bis dahin aus Gründen der Batterielebensdauer oder der Kosten nicht verbreitet umgesetzt wurden (vgl. [Blu16]; [Tor14], S. 54).

<sup>5</sup> Bei Near Field Communication handelt es sich grundsätzlich um einen Übertragungsstandard für kurze Distanzen bis zu zehn Zentimetern, der über eine Kompatibilität zu bestehenden RFID-Standards im Frequenzbereich von 13,56 MHz verfügt ([LR10], S. 87).

Unter anderem aus den zuvor erwähnten Gründen werden elektronische Datenlogger in der logistischen Praxis zum aktuellen Zeitpunkt lediglich in Branchen mit hochwertigen und sehr empfindlichen Gütern wie beispielsweise Pharmazeutika eingesetzt (vgl. [SHB12], S. 266).

Die folgende **Tabelle 2** gibt einen Überblick in Bezug auf das Bewertungsergebnis der Zustandsüberwachungstechnologie der elektronischen Datenlogger:

**Tabelle 2: Bewertung elektronischer Datenlogger hinsichtlich ihrer Eignung zur qualitativen Überwachung von Distributionsprozessen**

Bewertungskriterium	Überwachungstechnologie
	Elektronische Datenlogger
Ist eine qualitative Überwachung auf Ladeeinheitenebene realisierbar?	Ja
Kann eine wirtschaftliche Zustandsüberwachung auf der Ebene der Ladeeinheit gewährleistet werden?	Lediglich für hochwertige Güter
Wird eine kontinuierliche Aufzeichnung relevanter Messparameter sichergestellt?	Ja
Besteht die Möglichkeit einer kontaktlosen Datenübertragung via Funk?	Ausschließlich bei (kostenintensiven) Funk-Datenloggern
Ist die betrachtete Lösung mehrwegfähig?	Sowohl Einweg- als auch Mehrweglösungen vorhanden
Können mehrere Zustandsparameter gleichzeitig überwacht werden?	Ja
Erfolgt eine Stromversorgung mittels Energy-Harvesting?	Nein

### 2.2.3 Telematik-Systeme

Aus technischer Sicht verbindet die Telematik die Bereiche Telekommunikation und Informatik, wobei prinzipiell zwei dezentrale Informationssysteme durch die Nutzung eines Telekommunikationssystems datentechnisch miteinander verknüpft werden ([Hau16], S. 70). Die Einsatzgebiete von Telematik-Systemen sind vielseitig und umfassen neben der in dieser Arbeit betrachteten Anwendung im Rahmen der Transportlogistik unter anderem auch Anwendungsfelder wie das Gesundheitswesen oder die Gebäudeautomatisierung (vgl. [VRE15]; [Sch15], S. 56).

Im Hinblick auf die Logistik spielen Telematik-Systeme insbesondere im interorganisationalen Transport eine wichtige Rolle ([Hau16], S. 70). Die funktionalen Einsatzschwerpunkte der diesbezüglich am Markt angebotenen Lösungen sind bspw. die

Ortung, das Fahrzeug- und Flottenmanagement, die Fahrdatenauswertung, die Tourenplanung und -optimierung, die Sendungsverfolgung sowie die für die vorliegende Arbeit relevante Überwachung von Transportbedingungen ([RS10], S. 10).

In Bezug auf die Transportüberwachung besteht bei Telematik-Systemen i. d. R. die Möglichkeit der Integration verschiedener Sensoren zur kontinuierlichen Aufzeichnung unterschiedlicher für den jeweiligen Anwendungsfall relevanter Zustandsparameter (vgl. [Sch15], S. 59 f.). Im Vergleich zu elektronischen Datenloggern verfügen Telematik-Systeme hierbei zusätzlich über ein Kommunikations- und Ortungsmodul, mit dessen Hilfe die Transportkonditionen nicht nur erfasst, sondern die gemessenen Daten auch direkt – z. B. via Mobilfunk- oder Satellitenkommunikation – an die Akteure des Transportprozesses übertragen werden können ([SHB12], S. 266). Durch diese aktive Benachrichtigung ergibt sich wiederum der wesentliche Vorteil, dass potenzielle Schäden frühzeitig identifiziert und – sofern möglich – entsprechende Maßnahmen zur Schadenreduktion ergriffen werden können ([SHB12], S. 267).

Demgegenüber steht der grundlegende Nachteil, dass sich die vorhandenen Telematik-Systeme – wie bspw. die Lösung „TrailerConnect<sup>®</sup>“ des Marktführers Schmitz Cargobull Telematics GmbH – größtenteils auf die Überwachung des Trailers bzw. des Laderaumes beschränken (vgl. [Sch16]; [Sch15]), womit wiederum die im Kapitel 1.1 bereits ausführlich dargelegten Probleme einhergehen. Des Weiteren sind Telematik-Systeme aufgrund ihrer hohen Komplexität im Vergleich zu alternativen Zustandsüberwachungstechnologien deutlich kostenintensiver (vgl. [PP12], S. 115).

Um Telematik-Systeme auch für die Zustandsüberwachung auf der Ebene der Ladeinheit einsetzen zu können, existieren Lösungen auf dem Markt, bei denen Telematik-Module mit Funk-Datenloggern kombiniert werden. Als ein Beispiel hierfür kann eine spezielle Lösung der Dreyer+Timm GmbH dienen, bei der die Telematikeinheit „scombox“ über eine serienmäßige Funkschnittstelle mit den „scomsens-L-Funk-Temperaturdatenloggern“ kommunizieren kann ([Dre15], S. 61). Nachteilig bei diesem System sind jedoch im Wesentlichen die hohen Investitionskosten sowie die begrenzte Lebensdauer der Funk-Datenlogger, die durch die Energieversorgung mittels Primär- oder Sekundärzellen zustande kommt.

Bezogen auf den Einsatz von Energy-Harvesting-Technologien im Zusammenhang mit Telematikanwendungen ist zum Beispiel die für Container und Wechselbrücken

entwickelte Applikation „mecSOLAR“ der MECOMO AG erhältlich, mittels derer GPS-Module sowie eine Vielzahl an Zustandssensoren mit Strom versorgt werden können. Die Energieumwandlung basiert hierbei auf Photovoltaikzellen in Kombination mit Lithium-Ionen-Zellen als Energiespeicher ([Mec13], S. 51). Diese beispielhafte Energy-Harvesting-Applikation beschränkt sich allerdings erneut auf die nachteilige Zustandsüberwachung auf Laderaumebene.

In der **Tabelle 3** wird das Ergebnis der kritischen Würdigung bezüglich der Eignung von Telematik-Systemen zur qualitativen Überwachung logistischer Prozesse noch einmal zusammengefasst:

**Tabelle 3: Bewertung von Telematik-Systemen im Hinblick auf ihre Eignung zur qualitativen Überwachung logistischer Prozesse**

Bewertungskriterium	Überwachungstechnologie
	Telematik-Systeme
Ist eine qualitative Überwachung auf Ladeeinheitenebene realisierbar?	Nur bei Kombination mit Funk-Datenloggern
Kann eine wirtschaftliche Zustandsüberwachung auf der Ebene der Ladeinheit gewährleistet werden?	Ausschließlich für sehr hochwertige Güter
Wird eine kontinuierliche Aufzeichnung relevanter Messparameter sichergestellt?	Ja
Besteht die Möglichkeit einer kontaktlosen Datenübertragung via Funk?	Ja (zudem aktives Senden möglich)
Ist die betrachtete Lösung mehrwegfähig?	Ja
Können mehrere Zustandsparameter gleichzeitig überwacht werden?	Ja
Erfolgt eine Stromversorgung mittels Energy-Harvesting?	Lediglich auf Laderaumebene

#### 2.2.4 Drahtlose Sensornetzwerke

Drahtlose Sensornetzwerke bestehen aus einzelnen drahtlosen Funk-Sensorknoten, die gemeinsam ein Netz bilden und den elementaren Vorteil aufweisen, dass sie sowohl mit einer Basisstation als auch von Knoten zu Knoten aktiv miteinander kommunizieren können (vgl. [ZRL<sup>+</sup>12], S. 2; [PP12], S. 114). Demnach lässt sich mithilfe drahtloser Funk-Sensorknoten durch den entsprechenden Aufbau eines Netzwerkes eine Zustandsüberwachung auf der Ebene der Ladeeinheit realisieren, bei der – sofern sich die Basisstation in Übertragungsbereich befindet – sogar eine aktive Benachrichtigung der Prozessbeteiligten umgesetzt werden kann, wenn

der Ist-Wert eines betrachteten Zustandsparameters von einem zuvor festgelegten Soll-Wert abweicht.

Zudem besteht bei drahtlosen Sensornetzwerken die Möglichkeit der kontinuierlichen Überwachung mehrerer Zustandsparameter gleichzeitig, wobei die aufgezeichneten Daten hierbei bereits lokal auf den einzelnen Funk-Sensorknoten ausgewertet werden können, da diese jeweils eine eigene Recheneinheit mit Prozessor und Speicherkapazität besitzen (vgl. [ZRL<sup>+</sup>12], S. 2; [PP12], S. 115).

Wesentliche Nachteile drahtloser Sensornetzwerke sind die verhältnismäßig hohen Investitionskosten sowie der regelmäßig notwendige Austausch der Energiequelle, der dadurch entsteht, dass drahtlose Funk-Sensorknoten ihre Energie in der Regel aus Primärzellen beziehen (vgl. [Jed09], S. 12; [PP12], S. 115; [ZRL<sup>+</sup>12], S. 2).

Um den zuvor genannten Nachteilen entgegenzuwirken, wurde in den vergangenen Jahren eine Vielzahl an Forschungsprojekten bearbeitet, im Rahmen derer eine autarke Energieversorgung drahtloser Sensornetzwerke mittels geeigneter Energy-Harvesting-Module im Mittelpunkt stand. Allerdings lag der Fokus der in diesem Zusammenhang zu erwähnenden Forschungsarbeiten – bspw. bei den Verbundprojekten „Energieautarke Aktor- und Sensorsysteme für die intelligente drahtlose Vernetzung von Produktionsanlagen (EnAS)“ oder „Energieautarkes Condition Monitoring System (ECoMoS)“ – zumeist auf Anwendungen im industriellen Umfeld wie z. B. der Fabrikautomatisierung oder der Zustandsüberwachung von Industrieanlagen und nicht im Bereich der Transportüberwachung (vgl. [Kär07], S. 58 ff.; [BT14]).

Auch erste Produktentwicklungen im Hinblick auf energieautarke Sensornetzwerke wie beispielsweise der Funk-Sensorknoten „Elephant“ der embedded brains GmbH zielen in erster Linie nicht auf den Anwendungsbereich der Logistik, sondern vielmehr auf Bereiche wie die Überwachung von Gebäuden und Industrieanlagen oder die Hausautomation ab (vgl. [Kre14], S. 16 f.).

Bezüglich des Einsatzes drahtloser Sensornetzwerke zur qualitativen Überwachung logistischer Prozesse existieren u. a. Lösungen wie die vom Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen erforschte s-net<sup>®</sup>-Technologie oder die in der Praxis angestrebte Vernetzung von Fahrzeugen, Güterzügen und Maschinen der Robert Bosch GmbH. Diese weisen jedoch jeweils den Nachteil auf, dass die für den Betrieb der

einzelnen Funk-Sensorknoten benötigte Energie durch in ihrer Lebensdauer begrenzte Primärzellen bereitgestellt wird. (vgl. [ML14], S. 49; [Rob16], S. 28 f.)

Die Einsatzmöglichkeiten von Energy-Harvesting-Technologien zur Energieversorgung drahtloser Funk-Sensorknoten wurden im Rahmen des Verbundprojektes „Dynamisch, autonomes, energieautarkes Container Netzwerk in der Luftfrachtindustrie (DyCoNet)“ für den speziellen Anwendungsfall der Überwachung eines Luftfrachtcontainers untersucht. Die verhältnismäßig hohe Energiemenge, die für das aktive Senden von Informationen durch einen Funk-Sensorknoten verbraucht wird, sowie spezifische Einschränkungen bei Lufttransporten (u. a. große Bandbreite an Vibrationsfrequenzen sowie geringe Temperaturunterschiede und Beleuchtungsstärken am Luftfrachtcontainer) führten jedoch zu dem Projektergebnis, dass Energy-Harvesting-Module zur Energieversorgung eines an einem Luftfrachtcontainer applizierten aktiven Funk-Sensorknotens aufgrund der theoretisch notwendigen Baugrößen (es wäre bspw. eine Photovoltaikzelle mit einer Fläche von vier Quadratmetern sowie eine durchschnittliche Beleuchtungsstärke von 500 Lux erforderlich) nach aktuellem Stand der Technik nicht praktikabel eingesetzt werden können. (vgl. [KS14])

In der folgenden **Tabelle 4** ist das Bewertungsergebnis der Eignung drahtloser Sensornetzwerke zur Überwachung des Zustandes einzelner Ladeeinheiten im Rahmen logistischer Prozesse zusammenfassend dargestellt:

**Tabelle 4: Bewertung der Eignung drahtloser Sensornetzwerke zur qualitativen Überwachung von Distributionsprozessen**

Bewertungskriterium	Überwachungstechnologie
	Drahtlose Sensornetzwerke
Ist eine qualitative Überwachung auf Ladeeinheitenebene realisierbar?	Ja
Kann eine wirtschaftliche Zustandsüberwachung auf der Ebene der Ladeeinheit gewährleistet werden?	Lediglich für hochwertige Güter
Wird eine kontinuierliche Aufzeichnung relevanter Messparameter sichergestellt?	Ja
Besteht die Möglichkeit einer kontaktlosen Datenübertragung via Funk?	Ja (zudem aktives Senden möglich)
Ist die betrachtete Lösung mehrwegfähig?	Ja
Können mehrere Zustandsparameter gleichzeitig überwacht werden?	Ja
Erfolgt eine Stromversorgung mittels Energy-Harvesting?	Nicht bei Anwendungen zur Transportüberwachung

### 2.2.5 RFID-Sensortransponder

Wie bereits im Kapitel 1.1 erwähnt, eignen sich RFID-Sensortransponder zur kontinuierlichen Überwachung mehrerer Zustandsparameter auf der Ebene der Ladeeinheit. Des Weiteren gewährleistet diese i. d. R. mehrwegfähige Technologie eine kontaktlose Datenübertragung via Funk, wodurch ein automatisiertes und regelmäßiges Auslesen der Sensormessdaten ermöglicht wird.

Im Hinblick auf die Art der Stromversorgung ist bei sensorischen RFID-Transpondern grundsätzlich zwischen passiven, aktiven und semi-aktiven<sup>6</sup> Lösungen zu unterscheiden, wobei eine kontinuierliche Aufzeichnung relevanter Messwerte ausschließlich bei aktiven und semi-aktiven Transpondern sichergestellt wird, da passive RFID-Systeme nicht über eine integrierte Energiequelle verfügen und die Datenaufzeichnung und -übertragung aus diesem Grund lediglich in dem Moment erfolgen kann, in dem sich der Sensortransponder im magnetischen oder elektromagnetischen Feld eines Lesegerätes befindet (vgl. [Fin15], S. 25 ff.). Ein Beispiel für einen passiven RFID-Sensortransponder stellt eine aktuelle und verhältnismäßig kostengünstige Entwicklung der Smartrac Group und RFMicron dar, bei der die Antennen passiver UHF-Inlays als Sensoren fungieren und dadurch Umgebungsparameter wie Feuchte oder Druck erfasst werden können [Swe14].

Aktive RFID-Sensortransponder verfügen über eine eigene Batterie bzw. Primärzelle, welche die Energieversorgung des Transponders sowie der eingebundenen Sensorik sicherstellt und gleichzeitig eine aktive Datenübertragung durch den Transponder ermöglicht (vgl. [Rei14], S. 1334 f.). Hierdurch entsteht wiederum der Vorteil, dass die Prozessbeteiligten bei Abweichungen zu im Vorfeld festgelegten Soll-Werten bestimmter Umgebungsparameter in Echtzeit benachrichtigt werden können. Der grundlegende Nachteil dieser Technologie ist jedoch die begrenzte Betriebsdauer der eingebauten Batterie, die aufgrund der hohen Energiemengen, die bei einem solchen Transpondersystem insbesondere für das aktive Senden und Empfangen von Daten erforderlich sind, regelmäßig sehr gering ausfällt (vgl. [SWF<sup>+</sup>06], S. 26; [Rei14], S. 1335 f.). Als Anwendungsbeispiel kann in diesem Zusammenhang das „Active RFID System 3000“ der in Salzburg ansässigen Value-ID GmbH herangezogen werden (vgl. [Val16]).

---

<sup>6</sup> Semi-aktive Transponder werden in der Literatur zum Teil auch synonym als semi-passive Transponder bezeichnet.

Produktentwicklungen im Bereich semi-aktiver multisensorischer RFID-Transponder sind z. B. die „TELID® RFID Sensordatenlogger“ der Micro-Sensys GmbH (vgl. [Jur15], S. 46 ff.; [Mic16]), der „SENSOR TAG“ der B & M TRICON GmbH (vgl. [BMT16]), der „SL13A“ der ams AG (vgl. [Alm14], S. 43; [Swe13]) oder der „programmierbare NFC-Sensor-Transponder“ der Texas Instruments Incorporated (vgl. [Hel15]).

Ein Grund dafür, dass semi-aktive RFID-Sensortransponder im Zusammenhang mit der Gewährleistung einer kontinuierlichen Zustandsüberwachung in der Praxis am weitesten verbreitet sind und in den meisten Fällen gegenüber aktiven Systemen bevorzugt werden, ist ihr deutlich geringerer Energieverbrauch, der dadurch zustande kommt, dass die integrierte Energiequelle bei dieser Technologie ausschließlich für den Datenerhalt auf dem Mikrochip und die Anbindung von Sensoren genutzt wird und die Energie für die Datenübertragung dem Feld des Schreib-Lesegerätes entnommen wird (vgl. [Fin15], S. 25 ff.; [Jed09], S. 13; [SWF<sup>+</sup>06], S. 26).

Trotz des geringeren Energieverbrauchs im Vergleich zu aktiven Systemen stellt auch bei semi-aktiven Transpondern die verwendete Primärzelle den limitierenden Faktor bezüglich der Betriebsdauer dar, was wiederum ein Grund für den nur sporadischen Einsatz in der logistischen Praxis ist (vgl. Kapitel 1.1).

In Bezug auf die Entwicklung von Energy-Harvesting-Applikationen ist diese Technologie aufgrund der vorhandenen Energieeffizienz hingegen sehr interessant. Allerdings existieren zum aktuellen Zeitpunkt keine Entwicklungen, bei denen die im Zusammenhang mit TUL-Prozessen an einer Ladeinheit zur Verfügung stehenden Umgebungsenergien zur Energieversorgung von semi-aktiven Transpondern genutzt werden. Vielmehr beschränken sich die in diesem Zusammenhang entwickelten und erforschten Lösungen auf das Energy-Harvesting aus dem Feld des Lesegerätes. Als ein Beispiel hierfür kann ein von der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften entwickeltes RFID-Sensor-Label dienen, bei welchem sich ein Akkumulator im Rahmen der Interaktion zwischen Transponder und Lesegerät automatisch auflädt (vgl. [FK16]). Diese Lösung lässt sich jedoch als wenig praktikabel einstufen. Schließlich ergab sich innerhalb der diesbezüglich durchgeführten Forschungsarbeiten, dass das Laden der vollen Akkukapazität von einer Milliampere-Stunde über eine



Distanz von 20 Zentimetern eine Zeitdauer von insgesamt 40 Stunden in Anspruch nimmt (vgl. [FK16]).

In der **Tabelle 5** ist das Bewertungsergebnis hinsichtlich der Eignung von RFID-Sensortranspondern zur Zustandsüberwachung von Distributionsprozessen zusammenfassend aufgeführt. Die Bewertung bezieht sich hierbei ausschließlich auf semi-aktive Systeme, da diese – wie zuvor bereits beschrieben – für den speziellen Anwendungsfall der kontinuierlichen Überwachung auf Ladeeinheitenebene im Vergleich zu passiven und aktiven Systemen über eine deutlich höhere Praxisrelevanz verfügen.

**Tabelle 5: Bewertung von semi-aktiven RFID-Sensortranspondern in Bezug auf ihre Eignung zur qualitativen Überwachung von Distributionsprozessen**

Bewertungskriterium	Überwachungstechnologie
	RFID-Sensortransponder (semi-aktiv)
Ist eine qualitative Überwachung auf Ladeeinheitenebene realisierbar?	Ja
Kann eine wirtschaftliche Zustandsüberwachung auf der Ebene der Ladeeinheit gewährleistet werden?	Lediglich für hochwertige Güter (aus Sicht der Anwender)
Wird eine kontinuierliche Aufzeichnung relevanter Messparameter sichergestellt?	Ja
Besteht die Möglichkeit einer kontaktlosen Datenübertragung via Funk?	Ja
Ist die betrachtete Lösung mehrwegfähig?	Ja
Können mehrere Zustandsparameter gleichzeitig überwacht werden?	Ja
Erfolgt eine Stromversorgung mittels Energy-Harvesting?	Nicht in praktikabler Form

### 2.3 Zusammenfassende Bewertung sowie Ableitung des Forschungsbedarfes

Die folgende **Tabelle 6** gibt einen zusammenfassenden Überblick bezüglich der in den vorherigen Kapiteln 2.2.1 bis 2.2.5 vollzogenen Bewertung von Technologien zur Zustandsüberwachung in der Distributionslogistik:

**Tabelle 6: Zusammenfassende Bewertung vorhandener Technologien zur qualitativen Überwachung von Distributionsprozessen**

Bewertungskriterium	Überwachungstechnologie				
	Indikator-Klebetiketten	Elektronische Datenlogger	Telematik-Systeme	Drahtlose Sensornetze	RFID-Sensortransponder (semi-aktiv)
Ist eine qualitative Überwachung auf Ladeeinheitenebene realisierbar?	Ja	Ja	Nur bei Kombination mit Funk-Datenloggern	Ja	Ja
Kann eine wirtschaftliche Zustandsüberwachung auf der Ebene der Ladeeinheit gewährleistet werden?	Ja	Lediglich für hochwertige Güter	Ausschließlich für sehr hochwertige Güter	Lediglich für hochwertige Güter	Lediglich für hochwertige Güter (aus Sicht der Anwender)
Wird eine kontinuierliche Aufzeichnung relevanter Messparameter sichergestellt?	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja
Besteht die Möglichkeit einer kontaktlosen Datenübertragung via Funk?	Nein	Nur bei (kostenintensiven) Funk-Datenloggern	Ja (zudem aktives Senden möglich)	Ja (zudem aktives Senden möglich)	Ja
Ist die betrachtete Lösung mehrwegfähig?	Nein	Einweg- und Mehrweglösungen verfügbar	Ja	Ja	Ja
Können mehrere Zustandsparameter gleichzeitig überwacht werden?	Mehrere unterschiedliche Etiketten erforderlich	Ja	Ja	Ja	Ja
Erfolgt eine Stromversorgung mittels Energy-Harvesting?	Keine Stromversorgung erforderlich	Nein	Lediglich auf Laderaumebene	Nicht bei Anwendungen zur Transportüberwachung	Nicht in praktikabler Form

Bei Betrachtung der **Tabelle 6** wird deutlich, dass gegenwärtig keine Zustandsüberwachungslösung existiert, die alle im Kapitel 2.1 definierten Anforderungen an Technologien zur qualitativen Überwachung von TUL-Prozessen erfüllt.

Indikator-Klebeetiketten gewährleisten aufgrund ihres geringen Preises zwar in vielen Fällen eine wirtschaftliche Zustandsüberwachung auf Ladeeinheitenebene; allerdings sind sie im Vergleich zu den weiteren betrachteten Technologien in ihrer Funktionalität erheblich eingeschränkt, da u. a. keine kontinuierliche Aufzeichnung relevanter Umgebungsparameter erfolgt und damit der Zeitpunkt eines Schadens nicht genau bestimmt werden kann sowie die Möglichkeit einer langfristigen Optimierung von Transportrouten hinsichtlich ihrer potenziellen Risikoquellen entfällt.

Bei den weiteren bewerteten Lösungen sind demgegenüber – mit Ausnahme der stark zusammenhängenden Kriterien der Wirtschaftlichkeit und der Energieversorgung mittels Energy-Harvesting – alle innerhalb des Kapitels 2.1 definierten Anforderungen erfüllt, wobei drahtlose Sensornetzwerke und semi-aktive RFID-Sensortransponder gegenüber Telematik-Systemen und Funk-Datenloggern über einen beträchtlichen Kostenvorteil verfügen und aus diesem Grund im Zusammenhang mit einer Zustandsüberwachung auf Ladeeinheitenebene zu bevorzugen sind.

Vergleicht man drahtlose Sensornetzwerke mit semi-aktiven RFID-Sensortranspondern, so verfügen drahtlose Sensorknoten insgesamt über den höheren Funktionsumfang, welcher im Wesentlichen durch die Möglichkeit der aktiven Datenübertragung bzw. der aktiven Benachrichtigung der Prozessbeteiligten bei Abweichungen vom Soll-Prozess entsteht. Mit diesem Vorteil geht jedoch auch der wesentliche Nachteil des um ein Vielfaches höheren Energieverbrauchs drahtloser Sensornetzwerke einher, der dazu führt, dass eine Energieversorgung mithilfe von Energy-Harvesting-Technologien nach aktuellem Stand der Technik nicht praktikabel umgesetzt werden kann und eine wirtschaftliche Zustandsüberwachung auf der Ebene der Ladeeinheit aus Anwendersicht damit in den meisten Fällen nicht gegeben ist.

Der vergleichsweise hohe Energieverbrauch drahtloser Sensorknoten kommt dadurch zustande, dass der Großteil der Energie bei batteriebetriebenen Funksystemen für das aktive Senden und Empfangen von Daten durch den Transceiver benötigt wird (siehe **Abbildung 7**). Dieses ist auch der entscheidende Grund dafür, dass semi-aktive RFID-Lösungen, bei denen der hohe Energiebedarf für die Datenübertragung nicht aus der internen Energiequelle des Transponders, sondern aus dem Feld des Schreib-Lesegerätes bezogen wird (vgl. Kapitel 2.2.5, S. 23 ff.), im Hinblick auf die Realisierbarkeit einer autarken Energieversorgung des angestrebten Zu-

standsüberwachungssysteme im Vergleich zu Lösungen mit einer aktiven Datenübertragung, bei denen bspw. die Funkstandards BLE oder ZigBee<sup>7</sup> Verwendung finden, die interessanteste Technologie darstellen.

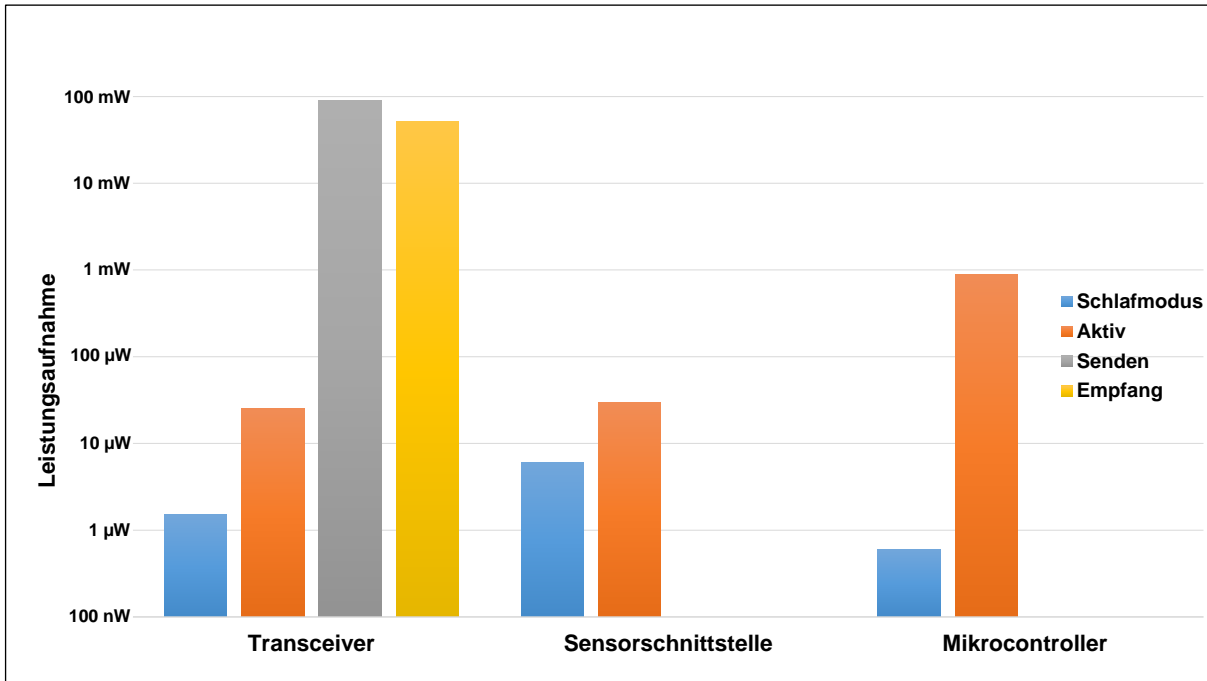


Abbildung 7: Typische Leistungsaufnahme von Komponenten eines batteriebetriebenen Transponders ([Rei14], S. 1336)<sup>8</sup>

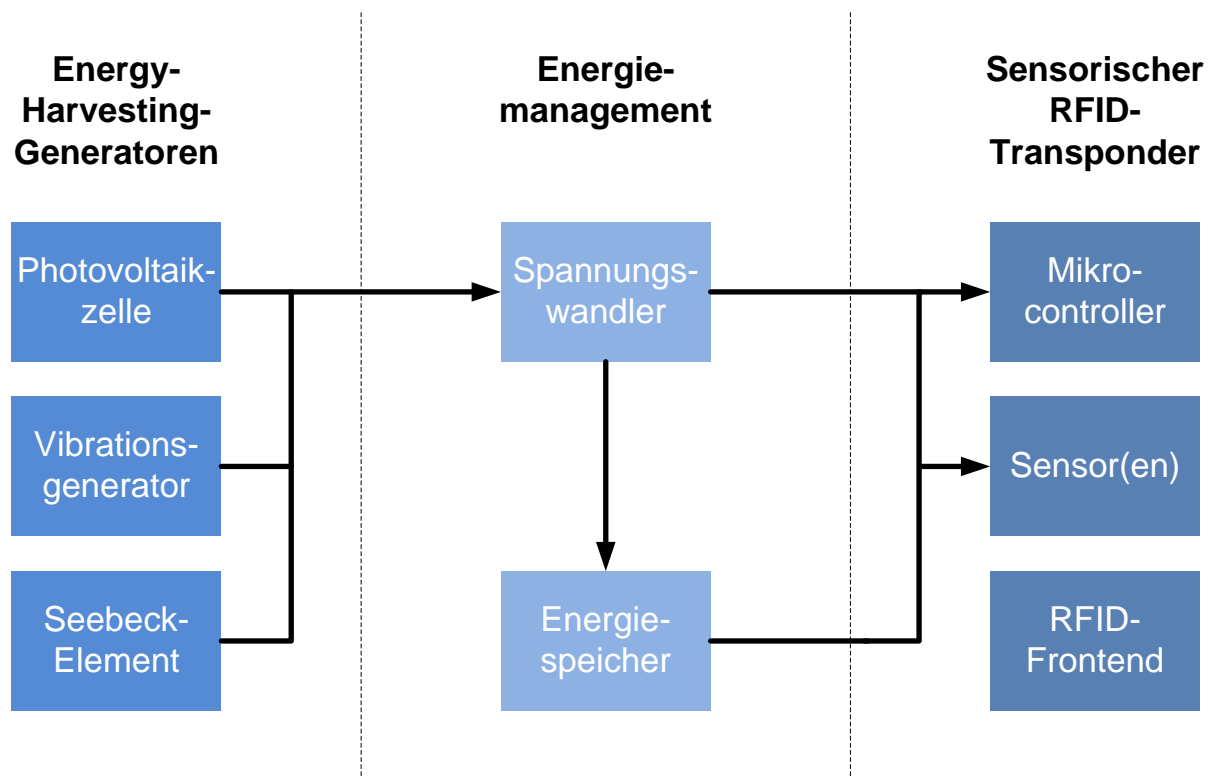
Um die vorhandene Forschungslücke zu schließen und eine Zustandsüberwachungstechnologie zu entwickeln, die allen im Kapitel 2.1 definierten Anforderungen gerecht wird, gilt es daher im weiteren Verlauf dieser Arbeit – speziell für semi-aktive RFID-Sensortransponder – zu prüfen, ob die angestrebte Energieautarkie der Transponder mittels geeigneter Energy-Harvesting-Technologien technisch umsetzbar ist und hierdurch eine wirtschaftliche Überwachung des Zustandes einzelner Ladeeinheiten im Rahmen logistischer Prozesse auch aus Anwendersicht erreicht werden kann.

<sup>7</sup> Der Funkübertragungs-Standard ZigBee basiert auf Arbeiten der 2002 gegründeten ZigBee Allianz, bei der es sich um einen Zusammenschluss von Industrieunternehmen handelt, welcher das Ziel verfolgt, offene weltweite Standards für Funknetze bereitzustellen, die für Überwachungs- und Steuerungsaufgaben eingesetzt werden können ([KK14], S. 215).

<sup>8</sup> Die in der Grafik zugrunde gelegten Werte für die Leistungsaufnahmen eines Transceivers und Mikrocontrollers beziehen sich hier auf die beispielhaft betrachteten Module „CC1101“ und „MSP430“ der Texas Instruments Incorporated (vgl. [Rei14], S. 1335 f.).

### 3 Technische Grundlagen bei der Entwicklung energieautarker multisensorischer RFID-Transponder

In der folgenden **Abbildung 8** sind die wesentlichen Einzelkomponenten sowie der Energiefluss des angestrebten energieautarken multisensorischen RFID-Transponders in Form eines Blockdiagramms dargestellt:



**Abbildung 8:** Schematische Darstellung der grundlegenden Komponenten sowie des Energieflusses des geplanten energieautarken RFID-Sensortransponders (i. A. a. [Sie13], S. 80)

Bei Betrachtung des Diagramms ist insbesondere auffällig, dass für das RFID-Frontend keine eigene Spannungsversorgung vorgesehen ist. Dieses lässt sich dadurch begründen, dass das RFID-Frontend bei semi-aktiven RFID-Sensortranspondern im Rahmen der Datenübertragung in der Regel über das Feld des Schreib-Lesegerätes mit der erforderlichen Energie versorgt wird (vgl. [Sch08], S. 238).

Weitere technische Grundlagen in Bezug auf die in der **Abbildung 8** aufgeführten Technologien sowie die für das Verständnis der vorliegenden Arbeit erforderlichen Begrifflichkeiten und Zusammenhänge werden innerhalb dieses Kapitels in komprimierter Form erläutert.

### 3.1 Energy-Harvesting

Unter Energy-Harvesting wird die Gewinnung von elektrischer Energie aus einer in natürlicher Weise vorliegenden Quellenergie verstanden, die einem System nicht künstlich zugeführt werden muss (vgl. [KW08]). Wie aus dem Energieerhaltungssatz abzuleiten ist, wird Energie im eigentlichen Sinne nicht erzeugt, sondern immer aus einer anderen Form von Energie umgewandelt (vgl. [Kal14], S. 119). Grundsätzlich sind hierbei die Energieformen der mechanischen Energie, der chemischen Energie, der elektrischen Energie, der Strahlungsenergie sowie der thermischen Energie zu unterscheiden.

Es gibt eine Reihe von Prinzipien, die für die Umwandlung zwischen den einzelnen Energieformen genutzt werden können. In der folgenden **Abbildung 9** ist eine Auswahl dieser Prinzipien unter Angabe der Quell- und Zielenergieform aufgeführt:

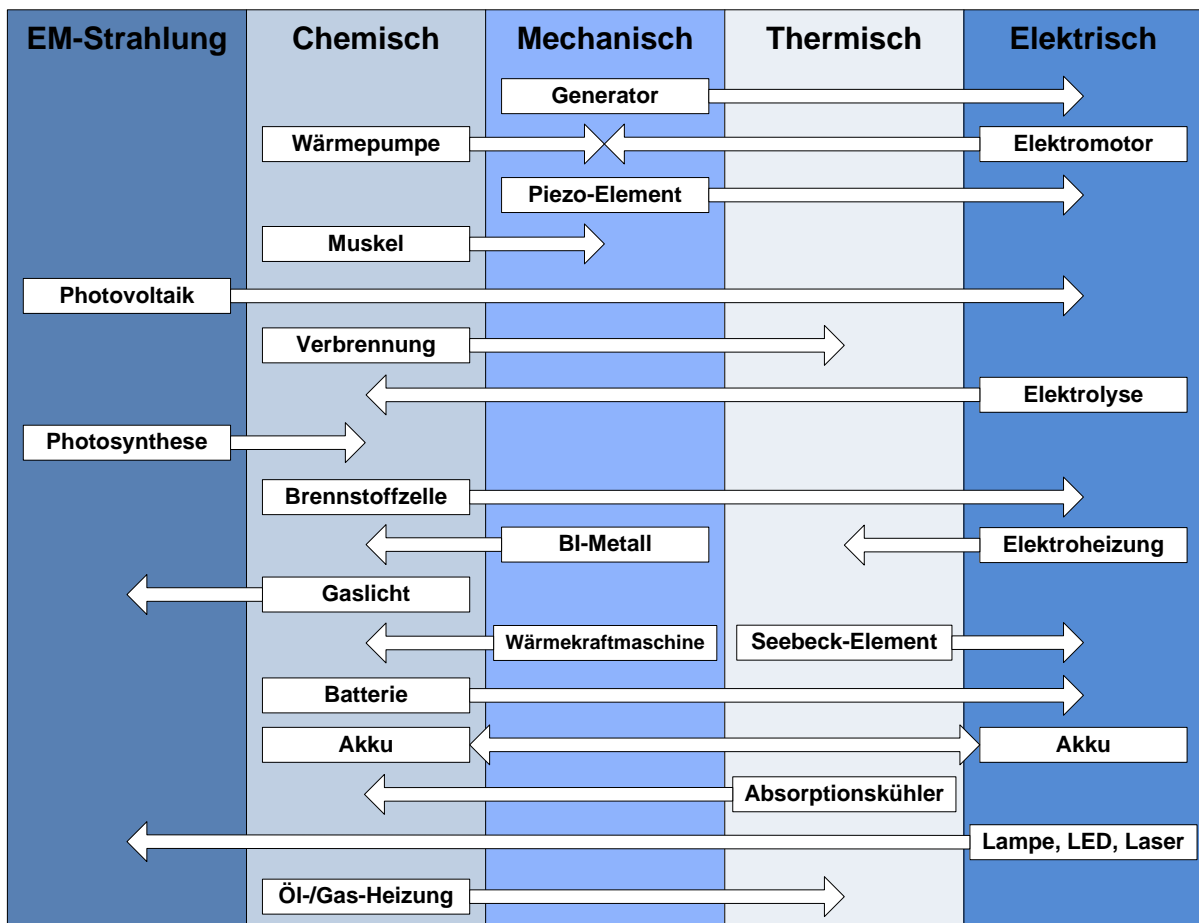


Abbildung 9: Prinzipien zur wechselseitigen Umwandlung von Energieformen (i. A. a. [Wal07], S. 22)

Als Umwandlungsprinzipien für die Energieversorgung multisensorischer RFID-Transponder kommen nur solche in Frage, die als Ziel die elektrische Energie haben. Eine Übersicht von Anwendungsbeispielen, in denen Energy-Harvesting-Techniken bereits verbreitet zum Einsatz kommen, gibt die **Tabelle 7**.

**Tabelle 7: Anwendungsbeispiele verschiedener Energy-Harvesting-Technologien (i. A. a. [ITW16a]; [Sch13]; [Sum09])**

Energieform	Anwendungsbeispiel	Funktionsweise
Lichtenergie	Solartaschenrechner	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Energie wird aus Licht bezogen</li> <li>• Energieumwandlung und -nutzung erfolgen i. d. R. gleichzeitig</li> <li>• Keine Ausfallzeiten oder Funktionseinschränkungen</li> </ul>
Kinetische Energie	Automatikuhr	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nutzung der kinetischen Energie aus der Armbewegung</li> <li>• Gangreserve bis zu zehn Tagen möglich</li> <li>• Uhr muss nach längeren Liegezeiten neu gestellt werden</li> </ul>
Thermische Energie	Überwachungssensoren zum Aufspüren von Beulen oder Rissen in Flugzeughüllen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einsatz thermoelektrischer Halbleiter</li> <li>• Energiebezug aus Temperaturdifferenzen (Nutzung des sog. Seebeck-Effekts, vgl. Kapitel 3.1.2)</li> </ul>

Für die Energieumwandlung im Zusammenhang mit TUL-Prozessen wird Energy-Harvesting bislang noch nicht verbreitet eingesetzt. Insbesondere im Hinblick auf die auf der Ebene der Ladeinheit vorhandenen Umgebungsenergien lagen im Vorfeld dieser Arbeit keine ausreichenden wissenschaftlichen Erkenntnisse vor (vgl. Kapitel 4.1, S. 54). Energy-Harvesting-Module, die grundsätzlich für den Einsatz innerhalb logistischer Prozesse geeignet sind, sind – wie bereits erwähnt – Photovoltaikzellen, thermoelektrische Generatoren sowie Vibrationsgeneratoren.

Die kontinuierlichen Leistungsdichten dieser Technologien sind in der **Abbildung 10** im Vergleich zu klassischen chemischen Energiespeichern wie Zink-Luft-Zellen, primären und sekundären Lithium-Ionen-Zellen sowie Alkaline-Zellen über den Verlauf von fünf Jahren dargestellt.

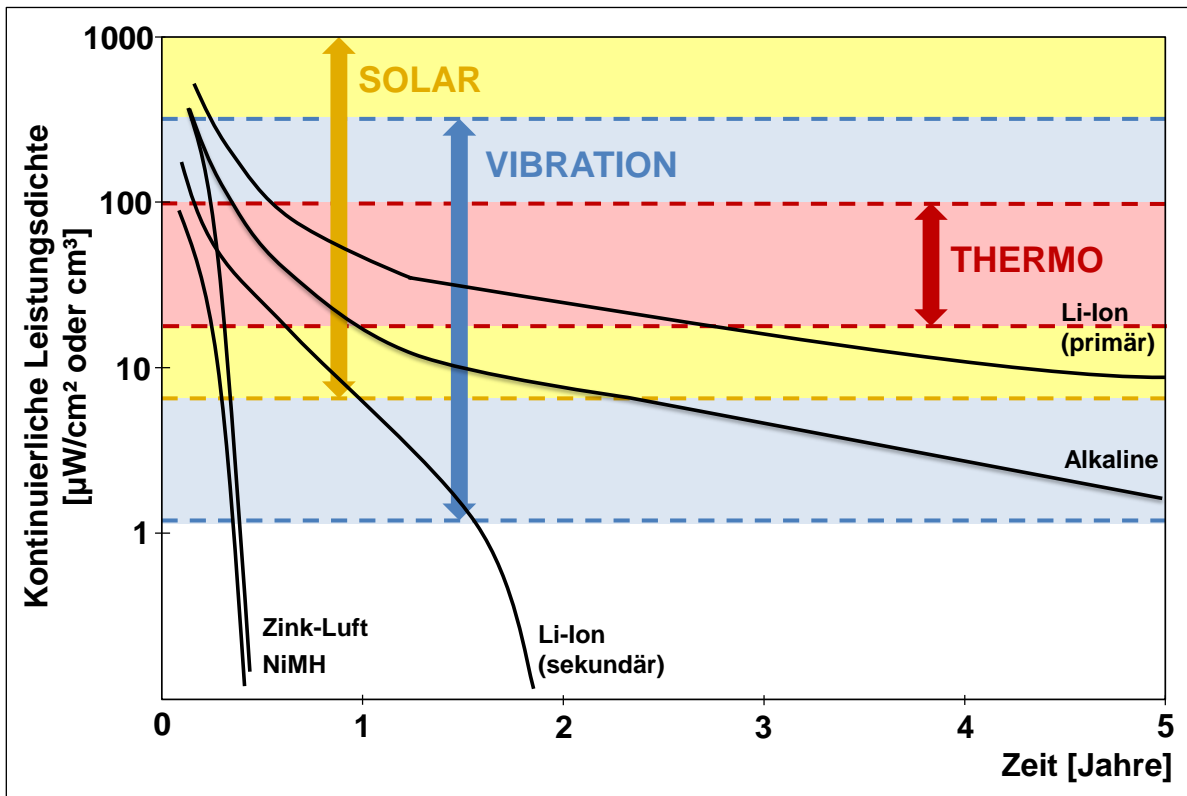


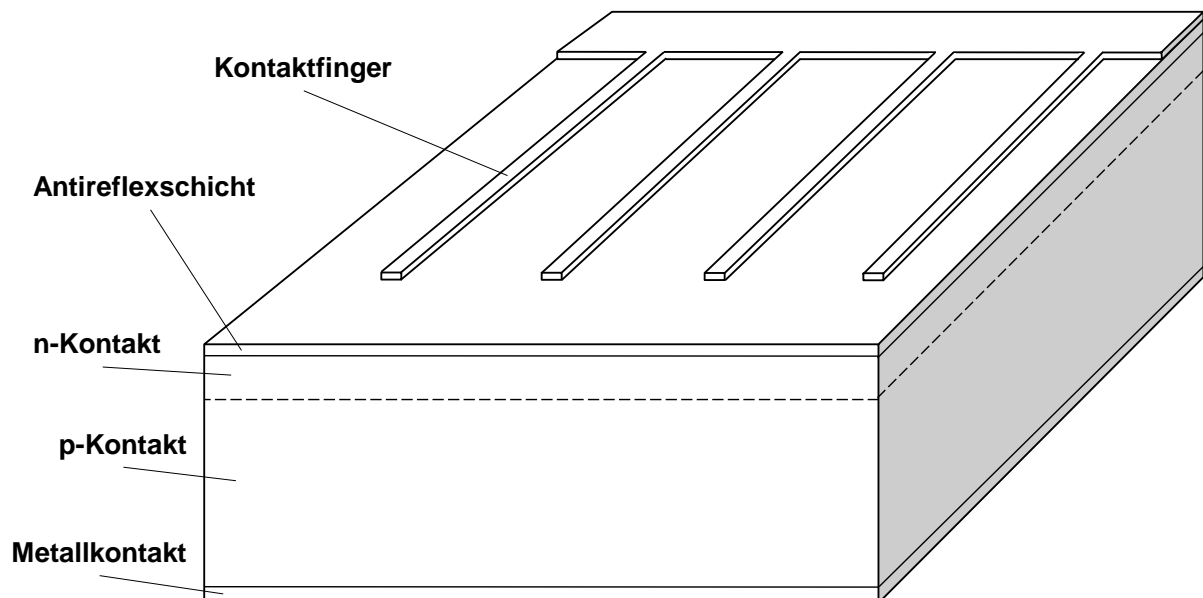
Abbildung 10: Kontinuierliche Leistungsdichten von ausgewählten chemischen Energiespeichern und Energy-Harvesting-Generatoren (i. A. a. [Mey09])

Aus der **Abbildung 10** heraus lässt sich ableiten, dass die Leistungsdichte der chemischen Energiespeicher zunächst zwar höher ist als die der meisten Energy-Harvesting-Generatoren, diese im Gegensatz zur Leistungsdichte der Generatoren im Verlauf der Zeit jedoch deutlich abfällt. Demnach lässt sich die Aussage treffen, dass Energy-Harvesting-Techniken in Systemen mit langer Lebensdauer von Vorteil sind. Wie sich allerdings bei allen Generatoren zeigt, variiert die Leistung unabhängig von der Nutzungsdauer über die Zeit sehr stark, da die zur Verfügung stehende Umgebungsenergie nicht konstant ist. Beispielsweise liefert eine Solarzelle im Außenbereich mit direkter Sonneneinstrahlung deutlich mehr Energie als im Innenbereich mit künstlichem Licht. Des Weiteren ist darauf hinzuweisen, dass in der **Abbildung 10** Einflüsse unberücksichtigt bleiben, die möglicherweise die Effizienz der verschiedenen Energy-Harvesting-Module beeinträchtigen können. Verschmutzt z. B. eine Solarzelle im Laufe der Zeit, so kann deren Effizienz bis hin zum Totalausfall sinken. ([Sie14a], S. 17)



### 3.1.1 Photovoltaik

Bei Photovoltaikzellen bzw. Solarzellen handelt es sich grundsätzlich um Fotodioden mit großer Fläche, mithilfe derer eine direkte Umwandlung von solarer Strahlung in elektrische Energie möglich ist (vgl. [Mar14], S. 351; [JHH<sup>+</sup>15], S. 123). Durch die Absorption von Sonnenstrahlen bzw. Photonen werden hierbei mittels des photovoltaischen Effekts Elektron-Loch-Paare gebildet (vgl. [JHH<sup>+</sup>15], S. 123 f.). Diese werden durch das interne elektrische Feld des p-n-Überganges zwischen zwei verschiedenen Halbleitern<sup>9</sup> derartig getrennt, dass die Elektronen zum n-Kontakt und die Löcher zum p-Kontakt befördert werden und hierdurch eine Potenzialdifferenz entsteht (vgl. [Sch13], S. 24; [Mar14], S. 351). Über diese Spannung zwischen dem Gitter dünner Kontaktfinger an der Vorderseite sowie dem Metallkontakt an der Rückseite einer Solarzelle kann der erzeugte Photostrom (bei angeschlossener elektrischer Last) abgeleitet werden (vgl. [JHH<sup>+</sup>15], S. 124; [Mar14], S. 351). Aufgrund des hohen Reflexionsgrades der Halbleiter muss die Oberfläche photovoltaischer Zellen zudem mit einer reflexvermindernden Schicht versehen werden ([Mar14], S. 351). Der schematische Aufbau einer Photovoltaikzelle wird in der folgenden **Abbildung 11** noch einmal veranschaulicht:



**Abbildung 11: Schematischer Aufbau einer Solarzelle (i. A. a. [Mar14], S. 351)**

<sup>9</sup> Unter Halbleitern werden kristalline oder amorphe Festkörper verstanden, deren elektrische Leitfähigkeit in der Nähe des absoluten Nullpunktes der Temperatur verschwindet und mit zunehmender Temperatur stark ansteigt. Bei Umgebungstemperatur liegt die Leitfähigkeit von Halbleitern zwischen der von Metallen und Isolatoren. ([WV16], S. 29)

Der Wirkungsgrad einer Solarzelle ergibt sich aus dem Verhältnis der maximal erzielbaren elektrischen zur eingestrahnten optischen Leistung (vgl. [Wag15], S. 79). Handelsübliche Solarzellen, die aufgrund der praktisch unbegrenzten Ressourcen in den meisten Fällen aus Silizium hergestellt werden, erreichen hierbei einen maximalen Wirkungsgrad von etwa 15 Prozent (vgl. [Mar14], S. 353). Die in diesem Zusammenhang auftretenden Verluste lassen sich in optische und elektrische Verluste aufteilen und sind in der **Tabelle 8** zusammengestellt.

**Tabelle 8: Verluste in Silizium-Solarzellen (i. A. a. [Mar14], S. 355)**

Optische Verluste	Elektrische Verluste
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reflexion an der Oberfläche (ca. 3 %)</li> <li>• Abschattung durch Kontaktfinger (ca. 3 %)</li> <li>• Photonen mit überschüssiger Energie (ca. 32 %)</li> <li>• Photonen mit ungenügender Energie (ca. 24 %)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interne Zellenverluste infolge des Serienwiderstandes des Zellenmaterials und der Kontaktfinger (ca. 1 %)</li> <li>• Rekombination von Ladungsträgern in Basis und Emitter (ca. 22 %)</li> </ul>

Bezüglich des Herstellungsverfahrens von Silizium-Solarzellen gibt es große Unterschiede. Der höchste Wirkungsgrad kann mit monokristallinen Siliziumzellen erzielt werden; allerdings erweist sich deren Herstellung auch als besonders energie- und kostenintensiv (vgl. [Mar14], S. 356). Bei der Auswahl einer Photovoltaikzelle gilt es demnach, neben der Leistung auch Faktoren wie die Nachhaltigkeit und die Wirtschaftlichkeit zu beachten. Die Wirkungsgrade unterschiedlicher Solarzellen sind in der **Tabelle 9** aufgeführt.

**Tabelle 9: Wirkungsgrade verschiedener Solarzellen (i. A. a. [Mar14], S. 357)**

Material	Ausführung	Wirkungsgrad [%]	
		Labormuster	Industrielle Fertigung
Si	Monokristallin	23	16 bis 20
Si	Polykristallin	20	14 bis 16
Si	Polykristallines Band	13 bis 18	11 bis 16
Si	Amorphe Dünnschicht	13	7 bis 8
GaAs	Monokristallin	25	15 bis 20
CdTe	Dünnschicht	16	9 bis 10
Cu(In,Ga)(S,Se) <sub>2</sub>	Dünnschicht	20	9 bis 12
CuInS <sub>2</sub>	Dünnschicht	12,7	-
CuGaSe <sub>2</sub>	Dünnschicht	9,3	-
OPV	Organische Solarzellen	10	-

Bezüglich der in der **Tabelle 9** angegebenen Zahlenwerte gilt es zu berücksichtigen, dass es sich hierbei um theoretische Werte handelt, die ausschließlich unter Laborbedingungen erzielt werden können. Die tatsächliche Leistung photovoltaischer Zellen hängt indessen wesentlich von äußeren Bedingungen wie beispielsweise der Temperatur oder dem Einfallswinkel und der Wellenlänge der absorbierten Lichtphotonen ab (vgl. [WE10]).

### 3.1.2 Thermoelektrische Generatoren

In thermoelektrischen Generatoren werden Temperaturgradienten in der Umgebung durch Ausnutzung des sogenannten Seebeck-Effekts direkt in elektrische Energie umgewandelt (vgl. [MEK<sup>+</sup>12], S. 1654; [Dis10], S. 34). Hierbei fließt ein thermoelektrischer Strom, wenn zwei verschieden elektrisch leitende Materialien miteinander verbunden sind und eine Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zwischen deren Kontaktflächen besteht (vgl. [Sch13], S. 26). In Abhängigkeit von den absoluten Seebeck-Koeffizienten<sup>10</sup>  $S_A$  und  $S_B$  einer Paarung der Materialien A und B lässt sich die mit einem thermoelektrischen Generator erzielbare elektrische Spannung  $U$  mit

$$U = \int_{T_1}^{T_2} (S_B(T) - S_A(T)) dT$$

**Formel 1: Berechnung der elektrischen Spannung eines thermoelektrischen Generators**

berechnen ([Sch13], S. 26). Der höchste Wirkungsgrad, der bei der Umwandlung von Wärmeenergie in elektrische Energie theoretisch erreicht werden kann, wird in diesem Zusammenhang durch den Carnot-Wirkungsgrad mit

$$\eta_{Carnot} = \frac{T_W - T_K}{T_W}$$

**Formel 2: Carnot-Wirkungsgrad**

beschrieben, wobei  $T_W$  für die Temperatur auf der wärmeren und  $T_K$  für die Temperatur auf der kälteren Seite des Generators steht ([Sch13], S. 26). Aus der Formel zur Berechnung des Carnot-Wirkungsgrades geht hervor, dass die elektrische Energie,

---

<sup>10</sup> Durch den Seebeck-Koeffizienten ist die thermoelektrische Spannung pro Temperaturdifferenz eines Werkstoffes definiert (vgl. [ZSD<sup>+</sup>16], S. 2).

die mithilfe eines Seebeck-Elements gewonnen werden kann, in erster Linie von dem vorhandenen Temperaturgradienten abhängt. Zudem erhöht sich der prozentuale Wirkungsgrad des Energy-Harvesting-Moduls – bei gleichbleibender Temperaturdifferenz – mit der Reduzierung der Temperatur auf der wärmeren Seite des Generators.

Zum aktuellen Zeitpunkt sind im Temperaturbereich von unter 250 Grad Celsius am Markt fast ausschließlich Thermogeneratoren erhältlich, die aus dem Werkstoff Wismuttellurid ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) bestehen und einen maximalen Wirkungsgrad von 7,2 Prozent erreichen (vgl. [SM15], S. 12; [ZSD<sup>+</sup>16], S. 2).

Der schematische Aufbau eines Seebeck-Elementes ist in der **Abbildung 12** dargestellt. In einem Thermowandler bilden p-dotierte und n-dotierte Halbleiter-Materialien Thermopaare, welche über Metallkontakte elektrisch miteinander verbunden sind (vgl. [Rei14], S. 1358 f.). Die verschiedenen Thermopaare sind wiederum elektrisch seriell und thermisch parallel verschaltet sowie zur elektrischen Isolierung in Keramikplatten eingefasst ([Rei14], S. 1359). Innerhalb der folgenden Grafik ist auszugswise ein einzelnes Thermopaar abgebildet:

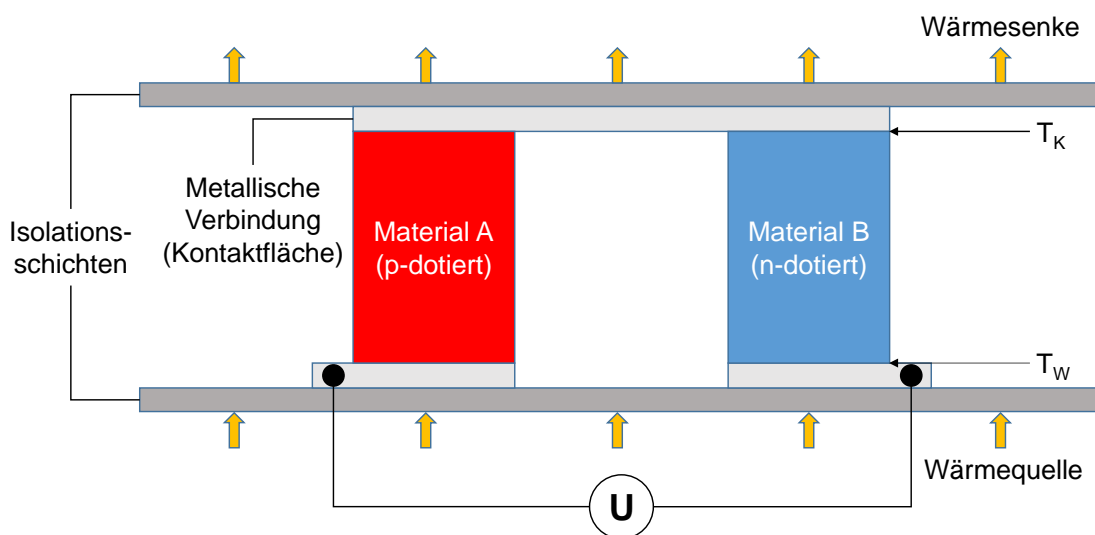


Abbildung 12: Schematischer Aufbau eines thermoelektrischen Generators (i. A. a. [Rei14], S. 1359)

### 3.1.3 Vibrationsgeneratoren

Bei Vibrationsgeneratoren sind grundsätzlich das elektromagnetische, das piezoelektrische und das elektrostatische Verfahren als vorhandene Möglichkeiten zur

Energieumwandlung zu unterscheiden, wobei jedoch nur die beiden ersten Verfahren von praktischer Bedeutung sind (vgl. [HBB09], S. 475 ff.; [Yil09], S. 42 ff.; [Sch10a], S. 6).

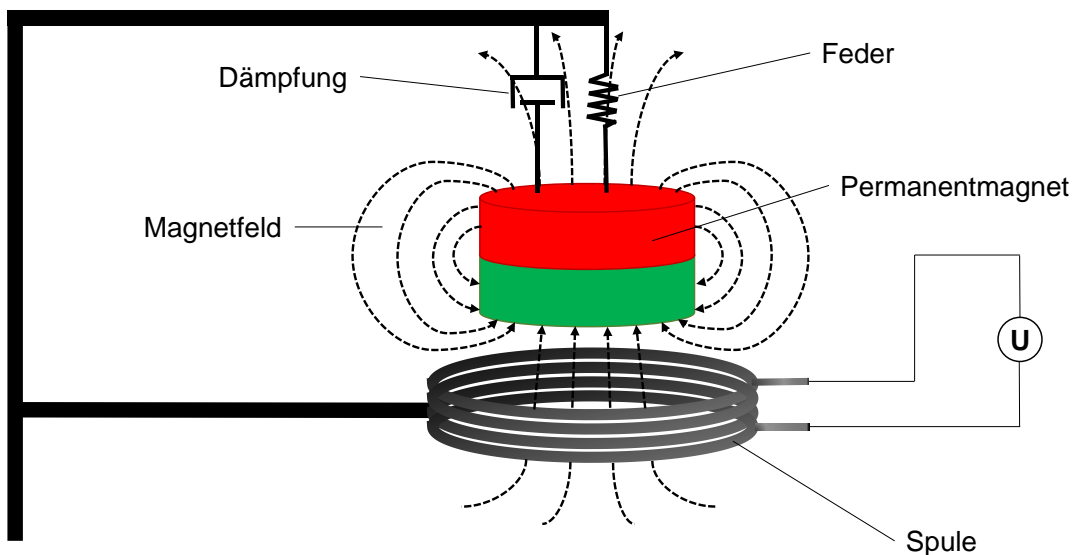
Das elektromagnetische Verfahren basiert auf dem Prinzip der Induktion. Dabei wird nach dem Induktionsgesetz eine Spannung  $U$  mit

$$U = -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{d(A * B)}{dt}$$

**Formel 3: Induktionsgesetz**

an einer Spule mit der Windungszahl  $N$  induziert, wenn eine zeitliche Änderung des magnetischen Flusses vorliegt. Der magnetische Fluss  $\Phi$  bezeichnet das Skalarprodukt vom Flächenvektor  $A$  und dem Vektor der magnetischen Flussdichte  $B$  und stellt somit die Spulenfläche, die durch das Magnetfeld der Flussdichte  $B$  senkrecht durchsetzt ist, dar. Eine zeitliche Änderung von  $\Phi$  ergibt sich also durch eine Veränderung des Betrages von  $B$ , durch Änderung der von  $B$  senkrecht durchsetzten Spulenfläche  $A$  oder eine Kombination aus beidem (vgl. [Sch13], S. 57 ff.; [KMR13], S. 292 ff.)

Das grundsätzliche Funktionsprinzip eines elektromagnetischen Vibrationsgenerators wird in der folgenden **Abbildung 13** verdeutlicht:



**Abbildung 13: Funktionsprinzip eines elektromagnetischen Energiewandlers (i. A. a. [Rei14], S. 1366)**

Am Beispiel der in der **Abbildung 13** gezeigten Anordnung wird deutlich, dass sich durch die Bewegung des Dauermagneten in Richtung der Spule zum einen der Betrag von  $B$  aufgrund des geringeren Abstandes erhöht und zum anderen die Magnetfeldlinien des inhomogenen Feldes des Permanentmagneten die Spule bei kleinerem Abstand zunehmend senkrecht durchsetzen. Der magnetische Fluss  $\Phi$  erhöht sich demnach bei Verringerung des Abstandes und verringert sich bei Vergrößerung des Abstandes vom Permanentmagneten zur Spule.

Bei Vibrationen ist durch diese Relativbewegungen vom Permanentmagneten zur Spule (Erhöhung bzw. Verringerung des Abstandes) eine zeitliche Änderung des magnetischen Flusses gegeben, die aufgrund der abwechselnden Zu- und Abnahme von  $\Phi$  zur Induktion einer Spannung mit wechselndem Vorzeichen bzw. einer Wechsellspannung führt (vgl. [Rei14], S. 1362 ff.).

Beim Aufladen eines Energiespeichers fließt in der Spule ein durch die Induktionsspannung hervorgerufener Strom. Dieser Stromfluss bewirkt, dass ein Magnetfeld entsteht, das nach der Lenzschen Regel seiner Ursache entgegengerichtet ist und demnach die Relativbewegungen vom Permanentmagneten zur Spule abbremst bzw. dämpft. Diese Bedämpfung des Gesamtsystems ist wiederum die Voraussetzung für die Umwandlung von mechanischer in elektrische Energie. (vgl. [Sch13], S. 57 ff.)

Beim piezoelektrischen Verfahren erfolgt die Energieumwandlung durch die Verformung piezoelektrischer Materialien wie meist Blei-Zirkonat-Titanat, in denen durch Stauchungen oder Streckungen eine Ladungsteilung hervorgerufen wird, die ein elektrisches Feld und ein elektrisches Spannungsgefälle entsprechend der Größe der Verformung erzeugt (vgl. [Yil09], S. 43; [Rei14], S. 1365).

Systeme zur elektrischen Energieerzeugung aus Schwingungen und Stößen, die sich den piezoelektrischen Effekt zunutze machen, können sehr unterschiedlich aufgebaut werden. Die nachfolgende **Abbildung 14** beinhaltet beispielhaft den klassischen Aufbau eines piezoelektrischen Energiewandlers als Biegebalken mit Schwungmasse:

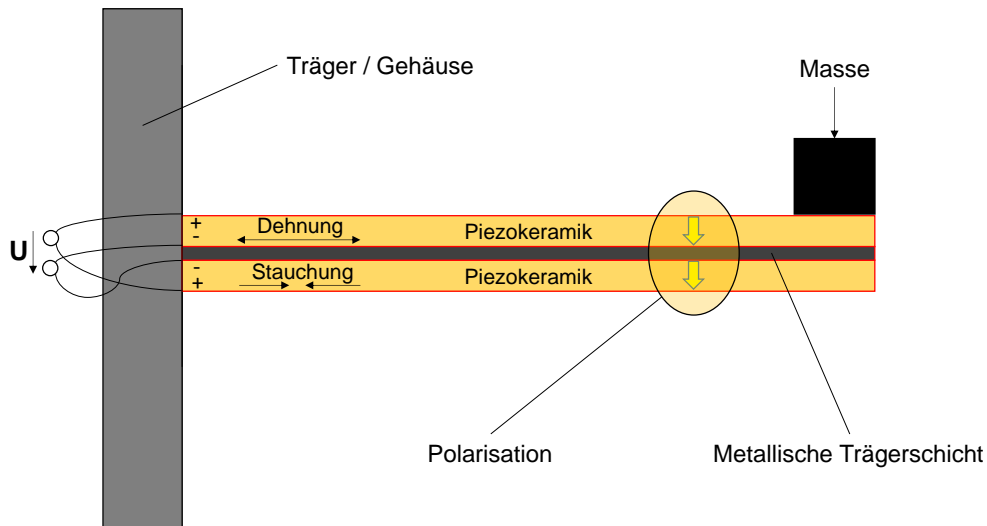


Abbildung 14: Klassischer Aufbau eines piezoelektrischen Energiewandlers (i. A. a. [Sch13], S. 56)

Der aus zwei piezoelektrischen Schichten und einer metallischen Trägerschicht bestehende Biegebalken wird an einem Ende eingespannt und am anderen Ende mit einer seismischen Masse belastet, die u. a. zur Anpassung der Eigenfrequenz eines piezoelektrischen Vibrationsgenerators dient (vgl. [Dis10], S. 36; [Sch13], S. 56). Wird die Schwungmasse durch Vibrationen angeregt, so wird der Balken periodisch gebogen und das piezoelektrische Material gestaucht und gestreckt, wodurch eine elektrische Spannung entsteht ([Dis10], S. 36).

Die folgende **Tabelle 10** gibt einen Überblick über die theoretisch und praktisch erzielbare maximale Energiespeicherdichte der beiden Generatorvarianten:

Tabelle 10: Erzielbare Energiespeicherdichte bei Vibrationsgeneratoren – Vergleich zwischen piezoelektrischem und elektromagnetischem Verfahren (i. A. a. [Ou14], S. 10)

Verfahren	Praktisches Maximum [mJ/cm <sup>3</sup> ]	Theoretisches Maximum [mJ/cm <sup>3</sup> ]
Elektromagnetisch	24,8	400
Piezoelektrisch	35,4	335

Aus der **Tabelle 10** geht hervor, dass – bezogen auf die praktische Umsetzung – mithilfe piezoelektrischer Vibrationsgeneratoren zum aktuellen Zeitpunkt eine höhere Energiespeicherdichte erzielt wird als bei Vibrationsgeneratoren, die auf dem elektromagnetischen Funktionsprinzip basieren. Dieses ist dadurch begründet, dass die bislang auf dem Markt für vibrationsbasierte Energiewandler verfügbaren Produkte

größtenteils auf dem piezoelektrischen Funktionsprinzip basieren und diese Technologie dadurch deutlich weiter ausgereift ist.

Allerdings liegt das theoretische Maximum in Bezug auf die erreichbare Energiespeicherdichte bei elektromagnetischen Generatoren höher als bei piezoelektrischen (vgl. **Tabelle 10**). Zudem weisen elektromagnetische Energiewandler den entscheidenden Vorteil auf, dass sie im Vergleich zu piezoelektrischen Wandlern über eine deutlich höhere Robustheit verfügen und damit langlebiger sind (vgl. [Sch10b], S. 8). Diese Eigenschaft des Generators stellt bei einem längerfristigen Einsatz in rauer Umgebung wiederum eine Grundvoraussetzung dar und ist der wesentliche Grund für die Schlussfolgerung, dass im Rahmen von Logistikanwendungen elektromagnetische gegenüber piezoelektrischen Vibrationsgeneratoren zu bevorzugen sind.

## 3.2 Energiemanagement

Neben der Energieumwandlung muss beim Energy-Harvesting berücksichtigt werden, dass die verfügbare elektrische Energie häufig nicht direkt zur Versorgung der energieverbrauchenden Komponenten geeignet ist. Zum Beispiel können Fälle auftreten, in denen die Spannung nicht die zumeist erforderlichen 3,3 Volt erreicht, die Energiebereitstellung und der Energieverbrauch asynchron verlaufen oder die Energie in Form einer Wechselspannung vorliegt, der Mikrocontroller jedoch eine Gleichspannung benötigt. Um die vorhandene Energie auch in diesen Fällen nutzen zu können, sind spezielle Schaltungen und Energiespeicher erforderlich. Das Energiemanagement, das u. a. aus den im Folgenden näher erläuterten Komponenten der Spannungswandler und Energiespeicher besteht (siehe **Abbildung 8** auf der Seite 29), hat eine möglichst effiziente Verwendung der vorhandenen Energie zum Ziel und stellt bei der Entwicklung energieautarker elektronischer Systeme einen zentralen Bestandteil dar. ([Sie14a], S. 21)

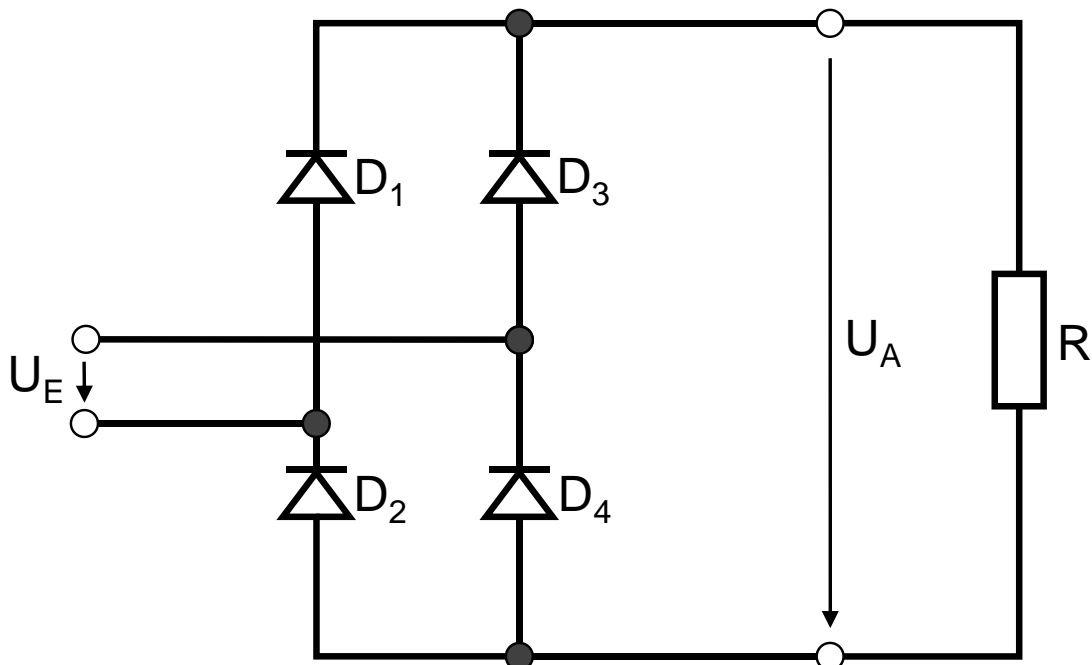
### 3.2.1 Spannungswandler

Spannungswandler, die bei der Entwicklung von Energy-Harvesting-Applikationen über eine elementare Bedeutung verfügen, sind Brückengleichrichter sowie Aufwärts- und Abwärtswandler.



Brückengleichrichter werden beispielsweise dann benötigt, wenn Vibrationsgeneratoren zur Energieumwandlung eingesetzt werden, da bei diesen eine Wechselspannung als Quellspannung vorliegt, die zunächst gleichzurichten bzw. in eine von der Elektronik nutzbare Gleichspannung umzusetzen ist (vgl. [Dem11], S. 65).

Ein Brückengleichrichter besteht aus vier Dioden<sup>11</sup>, die derartig geschaltet sind, dass beide Halbwellen eines Eingangswechselstromes genutzt werden und ausgangsseitig immer nur in eine Richtung fließen (vgl. [Ros16], S. 232). Das Prinzipschaltbild eines Brückengleichrichters ist in der **Abbildung 15** dargestellt. Der Widerstand  $R$  steht hierbei für einen elektrischen Verbraucher und  $U_E$  bzw.  $U_A$  für die Eingangs- bzw. Ausgangsspannung.



**Abbildung 15:** Prinzipschaltbild eines Brückengleichrichters (i. A. a. [Ros16], S. 232)

Die folgende **Abbildung 16** zeigt das grundlegende Funktionsprinzip eines Aufwärtswandlers. Diese Art der Spannungswandler ist im Zusammenhang mit der Entwicklung von Energy-Harvesting-Applikationen unabdingbar, da mithilfe von Aufwärtswandlern kleinere Spannungen, die bei Energy-Harvesting-Anwendungen in hoher Regelmäßigkeit auftreten, in größere vom elektronischen Verbraucher nutzbare Spannungen umgesetzt werden können (vgl. [Dem11], S. 68; [Gut14], S. 797).

<sup>11</sup> Die Diode ist ein Halbleiterbauelement, das für die Montage auf Leiterplatten vorgesehen ist und über eine Fluss- und Sperrichtung verfügt, wodurch u. a. die Stromrichtung innerhalb eines Schaltkreises gezielt beeinflusst werden kann (vgl. [Sti16], S. 77 ff.).

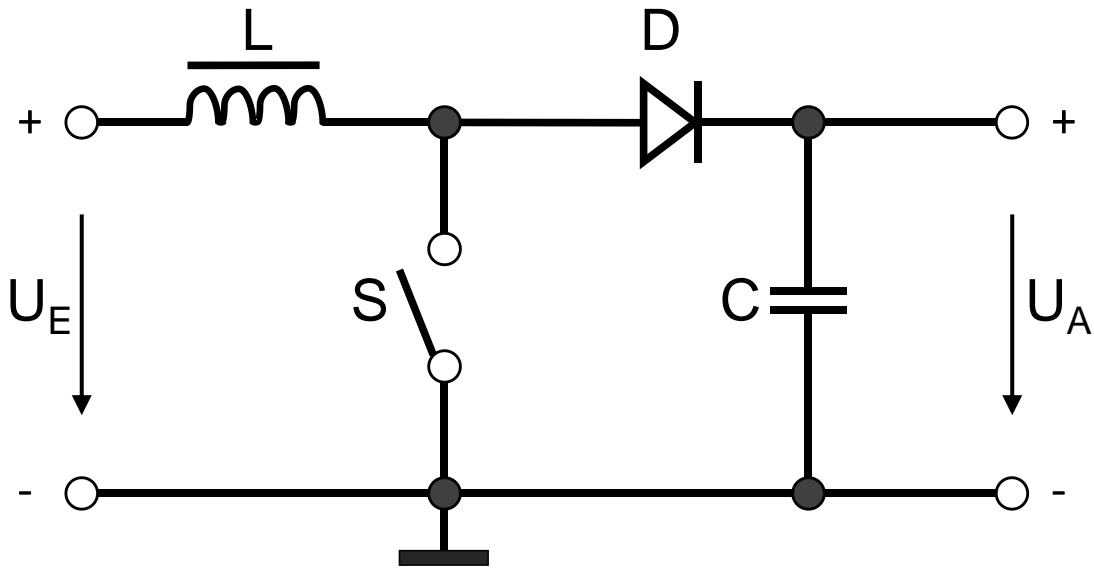


Abbildung 16: Funktionsprinzip eines Aufwärtswandlers (i. A. a. [Dem11], S. 68)

Prinzipiell wird bei Aufwärtswandlern eine Spule mit der Induktivität  $L$  mit einer Diode  $D$  in Reihe geschaltet, an die ein Ladekondensator mit der Kapazität  $C$  angeschlossen ist, welcher die anliegende Spannung aufsummiert ([Dem11], S. 68). Bei geschlossenem Schalter  $S$  (hierbei handelt es sich typischerweise um einen Transistor) wird die Induktivität  $L$  an die Eingangsspannung  $U_E$  geschaltet, wodurch der Strom in der Spule und damit die im Magnetfeld gespeicherte Energie ansteigt (vgl. [Sch07], S. 30; [Dem11], S. 68). Erst in der zweiten Phase, in welcher der Schalter  $S$  geöffnet ist, fließt Strom über die Diode auf die Ausgangsseite, wobei die Ausgangsspannung  $U_A$  immer größer oder gleich der Eingangsspannung  $U_E$  ist (vgl. [Sch07], S. 30; [Dem11], S. 69).

Ein Abwärtswandler, dessen Prinzipschaltbild in der **Abbildung 17** zu sehen ist, wandelt eine Eingangsspannung  $U_E$  in eine kleinere Ausgangsspannung  $U_A$  um ([Sch07], S. 13). Dieser Spannungswandlertyp kommt zum Einsatz, wenn die für die Elektronik benötigte Spannung kleiner ist als diejenige, die von der verwendeten Energy-Harvesting-Technologie bereitgestellt wird, wobei die Spannung i. d. R. auf einen festen Spannungswert stabilisiert wird ([Dem11], S. 65).

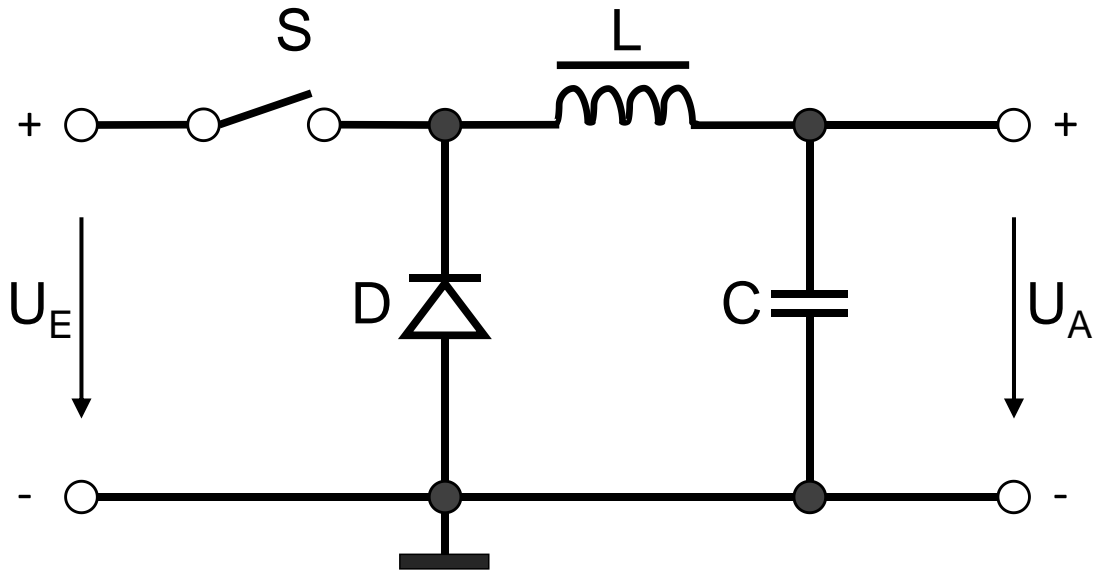


Abbildung 17: Funktionsprinzip eines Abwärtswandlers (i. A. a. [Dem11], S. 73)

Der Abwärtswandler ist dadurch charakterisiert, dass der Laststrom des Verbrauchers bei geschlossenem Schalter S vom Eingang über die Spule mit der Induktivität L zum Ausgang des Wandlers fließt ([Gut14], S. 790). Ist der Schalter S geöffnet, so wird die während der Einschaltzeit in der Spule gespeicherte Energie in der Form abgegeben, dass der Strom weiterhin durch den Verbraucher fließt, diesmal jedoch durch die Diode D und den Kondensator mit der Kapazität C ([Gut14], S. 790; [Dem11], S. 73).

### 3.2.2 Energiespeicher

Bei Energy-Harvesting-Applikationen steht in der Regel nur zeitweise nutzbare Umgebungsenergie zur Verfügung. Eine Energiespeicherung in Phasen hoher Energieausbeute ist daher zwingend erforderlich, um den jeweiligen elektronischen Verbraucher auch in Phasen niedriger Energieverfügbarkeit möglichst zuverlässig betreiben zu können. ([Dem11], S. 47)

Energiespeichertechnologien, die über eine Relevanz im Bereich der Mikroelektronik verfügen, sind unter anderem elektrochemische Speicher wie bspw. Lithium-Ionen (Li-Ion)-Zellen oder Nickel-Metallhydrid (NiMH)-Zellen, klassische Elektrolytkondensatoren sowie Doppelschicht- bzw. Superkondensatoren (vgl. [DR14], S. 157 ff.; [Dem11], S. 48 ff.; [ALS<sup>+</sup>14], S. 249 ff.).

Bei der Bewertung unterschiedlicher Energiespeichermodule bezüglich ihrer Eignung für den Einsatz im Zusammenhang mit Energy-Harvesting-Anwendungen sind z. B. Parameter wie die Speicherkapazität (nutzbare gespeicherte Energie), die Energie- und Leistungsdichte (Verhältnis der nutzbaren Energie bzw. Leistung zur Masse bzw. zum Volumen) sowie die Zyklenlebensdauer (Anzahl möglicher Ladungen und Entladungen) zu berücksichtigen (vgl. [Spe15], S. 381; [KD15], S. 27 f.). Da aufgrund der unregelmäßigen Energieverfügbarkeit bei Energy-Harvesting-Applikationen für gewöhnlich ein häufiges Laden und Entladen des Energiespeichers erforderlich ist, sind hier insbesondere eine hohe Zyklenlebensdauer sowie eine hohe Leistungsdichte (diese ermöglicht kurze Lade- und Entladezeiten) von entscheidender Bedeutung.

Elektrochemische Speicher wie beispielsweise Akkumulatoren bzw. Sekundärzellen speichern elektrische Energie in Form von chemischer Energie, welche im Rahmen des Entladevorgangs wieder in elektrische Energie umgewandelt wird (vgl. [DR14], S. 163). Gegenüber klassischen Kondensatoren und Doppelschichtkondensatoren verfügen sie über die Vorteile einer größeren Speicherkapazität und einer höheren Energiedichte (vgl. [SS14], S. 164 ff.; [KD15], S. 27 f.). Nachteilig sind indessen die vergleichsweise geringe Leistungsdichte sowie die – insbesondere im Vergleich zu Doppelschichtkondensatoren – deutlich kürzere Zyklenlebensdauer elektrochemischer Speichermodule (vgl. [KD15], S. 27 f.; [SS14], S. 600).

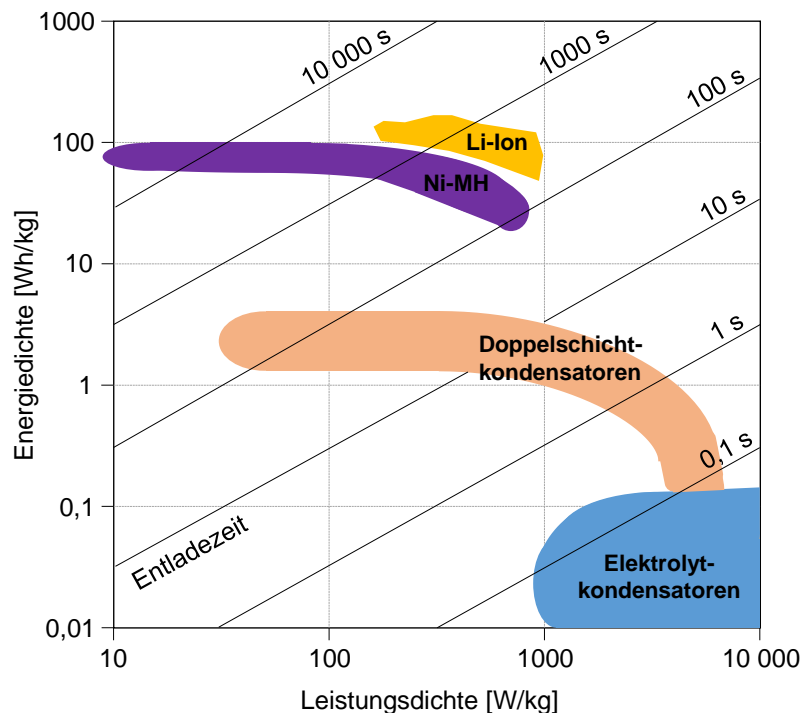
Klassische Elektrolytkondensatoren speichern elektrische Energie direkt in Form eines elektrischen Feldes und zeichnen sich durch eine sehr hohe Leistungsdichte sowie eine hohe Anzahl an möglichen Ladezyklen aus ([DR14], S. 160). Aufgrund der elementaren Nachteile einer sehr geringen Energiedichte und Speicherkapazität ist die Verwendung dieser Kondensatoren als längerfristige Energiespeicher jedoch wenig gebräuchlich (vgl. [SS14], S. 164 ff.; [KD15], S. 27 f.; [Dem11], S. 60). Im Zusammenhang mit Energy-Harvesting-Applikationen, bei denen die Speicherung sehr kleiner Energiemengen in vielen Fällen ausreichend ist, spielen Elektrolytkondensatoren allerdings durchaus eine wichtige Rolle (vgl. [Dem11], S. 60).

Eine deutlich höhere Energiedichte und Speicherkapazität als bei klassischen Kondensatoren kann durch Doppelschicht- bzw. Superkondensatoren erreicht werden, bei denen die Energiespeicherung sowohl im elektrischen Feld als auch elektrochemisch erfolgt (vgl. [KDH<sup>+</sup>05], S. 175 ff.; [DR14], S. 160 ff.). Die Gesamtkapazität setzt

sich demnach aus elektrostatischen und elektrochemischen Kapazitäten zusammen, wobei bei Doppelschichtkondensatoren die elektrostatischen und bei Superkondensatoren die elektrochemischen Kapazitäten überwiegen ([DR14], S. 162).

Zwar verfügen Doppelschicht- bzw. Superkondensatoren im Vergleich zu elektrochemischen Speichern ebenfalls über eine niedrigere Energiedichte und Speicherkapazität, jedoch sind sie im Hinblick auf eine kurzzeitige Zwischenspeicherung der aus Energy-Harvesting-Modulen bereitgestellten Energie sehr interessant, da sie sich gegenüber Sekundärzellen durch eine höhere Leistungsdichte und eine deutlich längere Zyklenlebensdauer auszeichnen ([SS14], S. 164 ff.; [KD15], S. 27 f.; [KDH<sup>+</sup>05], S. 175 f.).

In der folgenden **Abbildung 18** sind die Energie- und Leistungsdichten von klassischen Elektrolytkondensatoren, Doppelschicht- bzw. Superkondensatoren und den beispielhaften elektrochemischen Speichermodulen der Li-Ion-Zelle und der NiMH-Zelle in Form des sogenannten Ragone-Diagramms<sup>12</sup> aufgeführt:



**Abbildung 18: Vergleichende Darstellung unterschiedlicher Energiespeichertechnologien im Ragone-Diagramm (i. A. a. [KD15], S. 27)**

<sup>12</sup> Das Ragone-Diagramm dient der anschaulichen Darstellung unterschiedlicher Energiespeichertechnologien, indem die Energiedichte über der Leistungsdichte aufgetragen wird ([Spe15], S. 391). Die Leistungsdichte ergibt sich hierbei aus der nach der Zeit abgeleiteten Energiedichte ([SS14], S. 180).

Aus der **Abbildung 18** geht hervor, dass Doppelschicht- bzw. Superkondensatoren in Bezug auf die Energie- und Leistungsdichte die Lücke zwischen klassischen Kondensatoren und elektrochemischen Speichermodulen füllen, was ein wesentlicher Grund dafür ist, dass sie bei der Entwicklung von Energy-Harvesting-Lösungen als Zwischenpuffer im Rahmen des Energiemanagements eine verbreitete Verwendung finden (vgl. [KD15], S. 25; [Mar09]).

Bei der Bestimmung eines passenden Energiespeichers für das Energiemanagement-Modul des angestrebten energieautarken multisensorischen RFID-Transponders gilt es daher – unter der Berücksichtigung der in Bezug auf Energy-Harvesting-Applikationen als am wichtigsten identifizierten Eigenschaften einer hohen Zyklenlebensdauer und Leistungsdichte – entweder einen Doppelschicht- bzw. Superkondensator mit einer möglichst hohen Leistungsdichte oder einen klassischen Elektrolytkondensator mit einer möglichst hohen Energiedichte bzw. Speicherkapazität auszuwählen.

### 3.3 Integration von Sensoren in RFID-Transponder

Grundlegend wird unter einem Sensorelement eine in sich abgeschlossene Komponente verstanden, die an ihrem Eingang eine physikalische, chemische oder biologische Messgröße aufnimmt und an ihrem Ausgang ein elektrisches, konditioniertes Messsignal ausgibt, welches mit dem aufgenommenen Messwert in einem eindeutigen – häufig linearen – Zusammenhang steht (vgl. [Trä14], S. 3 f.).

In der **Tabelle 11** sind Sensoren aufgeführt, die nach dem aktuellen Stand der Technik in RFID-Transponder integriert werden können. Hieraus wird ersichtlich, dass mittels (semi-)aktiver RFID-Transponder, die über eine interne Energiequelle verfügen (vgl. Kapitel 2.2.5, S. 23 ff.), bereits eine Vielzahl an Messgrößen aufgezeichnet werden kann. Bei passiven RFID-Transpondern beschränkt sich die Integrierbarkeit von Sensoren hingegen auf solche, die keinen eigenen Energiebedarf aufweisen (vgl. [Fin15], S. 483).

**Tabelle 11: Verwendbarkeit von Sensoren für RFID-Transponder (i. A. a. [Fin15], S. 483)**

Sensor / Messgröße	Integrierbar	Verwendbar für passive RFID-Transponder	Verwendbar für (semi-)aktive RFID-Transponder
Temperatur	Ja	Ja	Ja
Feuchte	Ja	Ja	Ja
Druck	Mikromechanisch	Ja	Ja
Schock	Mikromechanisch	Ja	Ja
Beschleunigung	Mikromechanisch	Nein	Ja
Licht	Ja	Ja	Ja
Durchfluss	Ja	Nein	Ja
PH-Wert	Ja	Nein	Ja
Gase	Ja	Nein	Ja
Leitwert	Ja	Nein	Ja

Zur Verbindung digitaler Sensoren mit einem Mikrocontroller werden in der Regel Datenbusse verwendet, mit deren Hilfe die Messwerte mehrerer Sensoren über eine gemeinsame Leitung übertragen werden können, wodurch die für die Datenübertragung benötigte Zeitdauer im Vergleich zu mehreren unterschiedlichen Direktverbindungen zwischen den Sensoren und dem Mikrocontroller erheblich minimiert werden kann (vgl. [SFS05], S. 19 ff.). Die Datenbussysteme, die im Zusammenhang mit der Entwicklung von RFID-Sensortranspondern in der Praxis die weiteste Verbreitung aufweisen, sind der von der NXP Semiconductors Netherlands B.V. entwickelte „Inter Integrated Circuit“ (I<sup>2</sup>C) sowie die „Serial Peripheral Interface“ (SPI) der Motorola Solutions Incorporated<sup>13</sup> (vgl. [Ent10], S. 32 ff.).

### 3.4 Mikrocontroller in RFID-Sensortranspondern

Der Mikrocontroller ist die Steuerungszentrale eines RFID-Sensortransponders, welche u. a. zur Verwaltung des Datenspeichers, zur Steuerung der Sensorik sowie zur Auswertung aufgezeichneter Sensormesswerte dient (vgl. [Wüs11], S. 258; [Sch08], S. 238).

<sup>13</sup> Die Schnittstellen I<sup>2</sup>C und SPI, die u. a. zur Anbindung von Sensoren an Mikrocontroller eingesetzt werden, sollen an dieser Stelle lediglich Erwähnung finden. Für eine detaillierte Beschreibung dieser Technologien sei z. B. auf ([Bäh10], S. 287 ff.) und [Fre16] verwiesen.

Die Programmierung eines Mikrocontrollers erfolgt entsprechend der jeweiligen Aufgabenstellung, wobei im Zusammenhang mit Energy-Harvesting-Schaltungen ein möglichst geringer Energieverbrauch im Mittelpunkt steht, d. h. der Mikrocontroller befindet sich hier überwiegend im Ruhemodus oder ist sogar komplett abgeschaltet und schaltet ausschließlich bei Bedarf (z. B. zur Durchführung einer Sensormessung) für eine kurze Zeitdauer in den aktiven Betriebsmodus (vgl. [Dem11], S. 79 ff.).

Wesentliche Komponenten von Mikrocontrollern, die als steuerndes Element innerhalb von (semi-)aktiven RFID-Sensortranspondern zur Anwendung kommen und auf deren Funktionen im Folgenden näher eingegangen wird, sind der Prozessorkern, der interne Speicher, die Analog-Digital-Wandler (AD-Wandler), die seriellen Schnittstellen, das Zeitgeber-/Zähler-Modul und die Unterbrechungssteuerung (vgl. [LG13], S. 580; [Hel15]; [Dem11], S. 83 ff.; [Bäh10], S. 11 ff.).

Die Basiskomponenten eines Prozessorkerns sind die Rechen- und Logikeinheit sowie das Steuerwerk (vgl. [Bäh10], S. 61; [Dem11], S. 83; [LG13], S. 583). Mithilfe der Rechen- und Logikeinheit können beispielsweise Rechenoperationen wie Addition, Subtraktion, Multiplikation, Division, Vergleichen oder Rotieren sowie logische Operationen wie „UND“, „ODER“, „Exklusiv-ODER“ oder Bitmanipulationen durchgeführt und über das sogenannte Statusregister an das Steuerwerk übermittelt werden (vgl. [LG13], S. 583; [Bäh10], S. 62). Das Steuerwerk ist für die zeitgerechte Bearbeitung von Programmbefehlen zuständig und erzeugt alle Steuersignale zu den prozessorinternen und -externen Komponenten eines Systems ([Bäh10], S. 61 f.). Es beinhaltet das Befehlsregister, welches den augenblicklich ausgeführten Programmbefehl zwischenspeichert, das Steuerregister, das die Art und Weise der Befehlsbearbeitung beeinflusst, sowie den Decoder, mit dessen Hilfe die Interpretation des Befehlscodes erfolgt ([Bäh10], S. 61).

Hinsichtlich der Speichereinheit ist es bei Energy-Harvesting-Applikationen von hoher Bedeutung, dass ein nichtflüchtiger Speicher verwendet wird, der gespeicherte Daten auch bei fehlender Versorgungsspannung nicht verliert (vgl. [Wüs11], S. 260). Bei RFID-Sensortranspondern kommen diesbezüglich zumeist nichtflüchtige EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory)- oder Flash-Speicher zum Einsatz, die sich mehrfach elektrisch beschreiben und löschen lassen (vgl. [Rei14], S. 1344; [Bäh10], S. 19; [Dem11], S. 80).



Ein weiterer wichtiger Bestandteil von Mikrocontrollern sind die AD-Wandler, welche analoge Eingangsspannungen bzw. Signale in digitale Werte umsetzen ([Dem11], S. 90). AD-Wandler verfügen über einen analogen Eingang und  $N$  digitale Ausgangsleitungen, wobei ein am Eingang anliegendes Signal in eine ganze Zahl umgerechnet und in binärer Darstellung an den  $N$  digitalen Ausgangsleitungen ausgegeben wird ([Wüs11], S. 267).

Um mit möglichst wenigen Leitungen auszukommen, erfolgt der Datenaustausch zwischen Mikrocontrollern und weiteren Bausteinen oder Systemen mit Kommunikationsschnittstelle wie bspw. Sensoren oder Speichern in der Regel über serielle Schnittstellen, mittels derer im Asynchron- oder Synchronbetrieb eine serielle Datenübertragung durchgeführt werden kann (vgl. [Wüs11], S. 270 f.; [LG13], S. 588). Bei RFID-Sensortranspondern handelt es sich hierbei in den meisten Fällen um I<sup>2</sup>C- oder SPI-Schnittstellen (vgl. Kapitel 3.3, S. 47).

Das Zeitgeber-/Zähler-Modul besteht im Wesentlichen aus einem Binärzähler, der von einem einstellbaren Anfangswert auf null herunterzählt, wodurch im Zusammenhang mit der Prozesssteuerung insbesondere das Zählen und Erfassen sowie die Erzeugung externer Ereignisse ermöglicht wird ([Bäh10], S. 20). Weitere wichtige Funktionen des Zeitgeber-/Zähler-Moduls sind die Verwendung als sogenannter „Watch-Dog Timer“, der aus einem Zähler besteht, der zur Überwachung des Prozessorzustandes dient und z. B. beim Auftreten eines Fehlers ein Zurücksetzen des Mikrocontrollers auslöst, sowie als „Echtzeituhr“, welche die Zeit in Stunden, Minuten, Sekunden und Zehntelsekunden angibt (vgl. [Bäh10], S. 20; [Dem11], S. 105).

Wie bereits dargestellt wurde, bestehen Mikrocontroller aus einer Vielzahl an internen und externen Komponenten, die vom Prozessorkern angesteuert und bedient werden müssen. Im Rahmen der effektiven Nutzung dieser Komponenten repräsentiert die Unterbrechungssteuerung ein weiteres wesentliches Element eines Mikrocontrollers, da diese es ermöglicht, auf ein Peripherieereignis sofort zu reagieren, ohne die entsprechende Komponente ständig abfragen zu müssen (vgl. [Wüs11], S. 269; [Dem11], S. 101). Löst beispielsweise ein AD-Wandler eine Unterbrechungsanforderung aus, weil ein aktueller Sensormesswert zur Verfügung steht, so wird das auf dem Mikrocontroller laufende Programm durch die Unterbrechungssteuerung unterbrochen und stattdessen das Programm ausgeführt, das die Unterbrechungsan-

forderung übermittelt hat (vgl. [LG13], S. 586; [Dem11], S. 101; [Wüs11], S. 269). Liegen mehrere Unterbrechungsanforderungen gleichzeitig vor, so gilt die Prioritätenreihenfolge, die zumeist individuell programmiert werden kann (vgl. [LG13], S. 586; [Dem11], S. 104).

### 3.5 Datenübertragung bei semi-aktiven RFID-Sensortranspondern

Die Datenübertragung erfolgt bei semi-aktiven RFID-Sensortranspondern per Analog- und Digital-Frontend über eine Luftschnittstelle mit einem Schreib-Lesegerät, wobei das RFID-Frontend in der Regel keine eigene Spannungsversorgung benötigt, sondern aus dem Feld des Schreib-Lesegerätes mit der für die Datenübertragung benötigten Energie versorgt wird (vgl. Kapitel 3, S. 29).

Im Zusammenhang mit dem Datenaustausch zwischen Schreib-Lesegeräten und RFID-Transpondern gilt es grundsätzlich, die Frequenzbereiche Low Frequency (LF) mit Frequenzen zwischen 125 kHz und 135 kHz, High Frequency (HF) z. B. mit der Frequenz von 13,56 MHz sowie Ultra High Frequency (UHF) z. B. mit den in Europa verwendeten Frequenzen von 868 MHz oder 2,45 GHz zu unterscheiden (vgl. [Ker07], S. 38 ff.). Die Frequenzbereiche, die in Bezug auf den Praxiseinsatz von semi-aktiven RFID-Sensortranspondern zur qualitativen Überwachung logistischer Prozesse die größte Bedeutung aufweisen und daher im Folgenden näher betrachtet werden, sind der HF-Bereich mit 13,56 MHz sowie der UHF-Bereich mit 868 MHz in Europa bzw. 915 MHz in den USA (vgl. [MP09], S. 214 f.; [Fin15], S. 187 ff.).

Bei HF-Systemen findet die Kopplung zwischen Transponder und Schreib-Lesegerät entweder induktiv über ein magnetisches Feld oder in seltenen Fällen mittels kapazitiver Übertragung durch ein elektrisches Feld statt, wohingegen der Datenaustausch bei UHF-Systemen in Form des sogenannten „Backscatter-Verfahrens“ erfolgt, bei welchem ein elektromagnetisches Feld genutzt wird<sup>14</sup> (vgl. [Ker07], S. 47 f.; [Fin15], S. 24).

HF-RFID-Systeme, bei denen die Datenübertragung durch induktive Kopplung im Nahfeld vollzogen wird, weisen im Vergleich zu UHF-RFID-Systemen insbesondere

---

<sup>14</sup> Für eine detaillierte Beschreibung der unterschiedlichen Übertragungsverfahren, die bei HF- und UHF-RFID-Systemen zum Einsatz kommen, sei z. B. auf ([Ker07], S. 47 ff.) oder ([Fin15], S. 47 ff.) verwiesen.

die Vorteile der erlaubten höheren Feldstärke sowie der besseren Durchdringung von nichtmetallischen Objekten auf ([Rei14], S. 1330). Wesentliche Vorteile von UHF-Lösungen, bei denen der Datenaustausch zwischen Transponder und Schreib-Lesegerät im Fernfeld der Antennen erfolgt, sind die gegenüber HF-Lösungen erzielbaren höheren Lesereichweiten sowie die geringere Empfindlichkeit auf metallische Umgebungen ([Rei14], S. 1344).

Ein entscheidender weiterer Vorteil von HF-RFID-Transpondern, die auf der Frequenz von 13,56 MHz betrieben werden, ist die Kompatibilität zu dem Übertragungsstandard NFC, welcher eine Datenübertragung für kurze Distanzen bis zu zehn Zentimetern über genormte Luftschnittstellen wie zum Beispiel die ISO/IEC 15693-2 oder die ISO/IEC 14443-2 ermöglicht (vgl. [LR10], S. 87; [II06]; [II16]).

Hierdurch ergibt sich zunächst die Möglichkeit, den jeweiligen Sensortransponder mithilfe eines handelsüblichen Smartphones zu beschreiben und auszulesen und auf diese Weise hohe Investitionskosten für eine entsprechende RFID-Infrastruktur zu vermeiden (vgl. [Her13], S. 7; [LR14], S. 129). Neben den deutlich geringeren Anschaffungskosten, die NFC-fähige Smartphones im Vergleich zu proprietären RFID-Schreib-Lesegeräten aufweisen, ergibt sich durch die Verwendung von NFC-kompatiblen HF-Sensortranspondern zudem der Vorteil, die sogenannte Bring Your Own Device (BYOD)-Strategie verfolgen zu können, bei der entweder Privatgeräte der Mitarbeiter in den Arbeitsprozess eines Unternehmens eingebunden oder firmeneigene Geräte im Privaten genutzt werden (vgl. [LR14], S. 129; [ITW16b]).

Weitere Gründe dafür, dass im Rahmen dieser Arbeit die Entwicklung eines Funktionsmusters eines energieautarken multisensorischen RFID-Transponders mit NFC-kompatibler HF-Luftschnittstelle angestrebt wird, sind die mögliche Visualisierung gelesener Transponder- und Sensordaten mittels einer Smartphone-Applikation sowie die Möglichkeit, diese Daten (inklusive Global Positioning System (GPS)-Koordinaten) direkt via Mobilfunknetz bzw. über das Internet zum Backendsystem bzw. in die Cloud übertragen zu können (vgl. [Mic15], S. 73; [LR14], S.129).

## 4 Untersuchung von TUL-Prozessen hinsichtlich potenziell vorhandener Umgebungsenergien auf Ladeeinheitenebene

Die Entwicklung von Energy-Harvesting-Systemen beginnt i. d. R. mit einer Charakterisierung der in der Applikationsumgebung vorhandenen nichtelektrischen physikalischen Eingangsgrößen (vgl. [BT14]). Innerhalb dieses Kapitels gilt es daher, die im Rahmen von TUL-Prozessen auf Ladeeinheitenebene verfügbaren Energiemengen zu ermitteln, die z. B. in Form von Temperaturgradienten, Vibrationen oder Lichtstrahlung vorliegen können.

Hierfür wird zunächst auf bestehende Normen und Richtlinien sowie bereits vorhandene wissenschaftliche Erkenntnisse zurückgegriffen, um anhand der verfügbaren Informationen eine erste Einschätzung hinsichtlich der technischen Machbarkeit energieautarker multisensorischer RFID-Transponder treffen zu können.

Diese rein theoretischen Ergebnisse werden anschließend mittels gezielter Praxismessungen validiert und erweitert, wobei sich diese Untersuchungen auf die Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasser beziehen. Die erzielten Messergebnisse werden daraufhin bezüglich der Eignung von Vibrationsgeneratoren, thermoelektrischen Generatoren und Photovoltaikzellen zur Energieumwandlung im Zusammenhang mit logistischen Prozessen ausgewertet.

### 4.1 Theoretisch vorhandene Umgebungsenergien im Rahmen von TUL-Prozessen

Auf der Grundlage vorhandener Normen und Richtlinien – wie z. B. den ASTM-Standards, der DIN 30786-2 oder der DIN EN ISO 13355 – lassen sich zunächst grundlegende Erkenntnisse bezüglich der innerhalb von Straßen-, Schienen- und Seetransporten auftretenden Beschleunigungen<sup>15</sup> sowie der hierbei relevanten Frequenzbereiche ableiten. Die in den Normen und Richtlinien aufgeführten relevanten Frequenzbereiche sowie die in diesen Frequenzbereichen zu erwartenden spektralen Leistungsdichten – unterschieden nach den Verkehrsträgern Straße, Schiene und Wasser – sind in der nachfolgenden **Tabelle 12** dargestellt:

---

<sup>15</sup> Die auf Beschleunigungen bezogenen Werte werden im Rahmen dieser Arbeit in „g“ angegeben, wobei der Zusammenhang  $1\text{ g} = 9,81\text{ m/s}^2$  zugrunde gelegt wird.

**Tabelle 12: Relevante Frequenzbereiche und zu erwartende spektrale Leistungsdichten bei Straßen-, Schienen- und Seetransporten (i. A. a. [DIN15b], S. 9; [ASTM12], S. 4; [DIN13], S. 59)**

	<b>Verkehrsträger</b>	<b>Relevanter Frequenzbereich [Hz]</b>	<b>Spektrale Leistungsdichte [g<sup>2</sup>/Hz]<sup>16</sup></b>	<b>Norm</b>
	Straße	4 bis 18	0,012	DIN EN ISO 13355
	Schiene	2 bis 50	0,001	ASTM D4728
Wasser	Ruhige See (20 Knoten)	0,1 bis 0,25	0,1	DIN 30786-2
	Raue See (10 Knoten)	0,1 bis 0,25	0,01	DIN 30786-2
	Stürmische See (5 Knoten)	0,1 bis 0,25	1,8	DIN 30786-2

Aus der **Tabelle 12** geht hervor, dass bei den Verkehrsträgern Straße und Schiene in dem sich überschneidenden Frequenzbereich von 4 Hertz bis 18 Hertz die höchsten Beschleunigungen bzw. spektralen Leistungsdichten zu erwarten sind. Beim Verkehrsträger Wasser hingegen treten die höchsten Beschleunigungswerte in dem deutlich niedrigeren Frequenzbereich von 0,1 Hertz bis 0,25 Hertz auf. Allerdings sind nach der DIN 30786-2 im Rahmen von Seetransporten auch im Frequenzbereich von 6 Hertz bis 20 Hertz mit spektralen Leistungsdichten von 0,0002 g<sup>2</sup>/Hz bei rauher See und einer Fahrtgeschwindigkeit von zehn Knoten, 0,002 g<sup>2</sup>/Hz bei stürmischer See und einer Fahrtgeschwindigkeit von fünf Knoten und 0,002 g<sup>2</sup>/Hz bei ruhiger See und einer Fahrtgeschwindigkeit von 20 Knoten signifikante Beschleunigungen vorhanden ([DIN13], S. 59).

Hieraus lässt sich für die Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasser der sich überschneidende Frequenzbereich von 6 Hertz bis 18 Hertz ableiten, der für einen zur Energieumwandlung im Zusammenhang mit Transportprozessen eingesetzten Vibrationsgenerator von Relevanz ist. Die aufgeführten spektralen Leistungsdichten, die theoretisch innerhalb dieses Frequenzbereiches zur Verfügung stehen, können wiederum als vielversprechend für die autarke Energieversorgung von semi-aktiven multisensorischen RFID-Transpondern eingestuft werden.

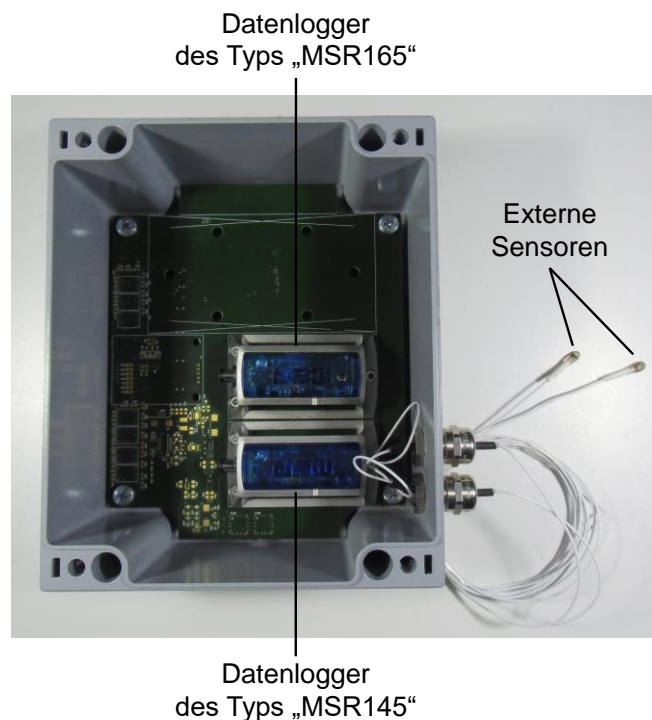
---

<sup>16</sup> Die Spektren stationärer stochastischer Datensignale sollten nach der DIN EN 15433-4 unter Verwendung der Leistungsdichtespektrum-Funktion berechnet werden, wobei deren grafische Darstellung die Maßeinheiten quadratischer Mittelwert je Hertz (g<sup>2</sup>/Hz usw.) über der Frequenz in Hertz hat und als Leistungsdichte-Spektrum bezeichnet wird (vgl. [DIN08b], S. 24 ff.).

An dieser Stelle ist jedoch darauf hinzuweisen, dass sich die in den Normen und Richtlinien angegebenen Werte ausschließlich auf Messungen auf den jeweiligen Ladeflächen der Transportmittel Lkw, Bahn und Seeschiff beziehen. In Bezug auf die an einer Ladeeinheit auftretenden Beschleunigungen, die bei der Entwicklung eines an einer Ladeeinheit applizierten energieautarken Sensortransponders von entscheidender Bedeutung sind, lagen im Vorfeld dieser Arbeit dagegen keine nutzbaren wissenschaftlichen Erkenntnisse vor. Im Hinblick auf die im Rahmen von Umschlagprozessen auftretenden Beschleunigungen sowie die in Form von Lichtstrahlung und Temperaturdifferenzen verfügbaren Umgebungsenergien im Zusammenhang mit TUL-Prozessen existierten ebenfalls keine verwertbaren theoretischen Daten, so dass die Durchführung und Auswertung eigener Praxismessungen erforderlich waren, die im folgenden Kapitel 4.2 detailliert beschrieben werden.

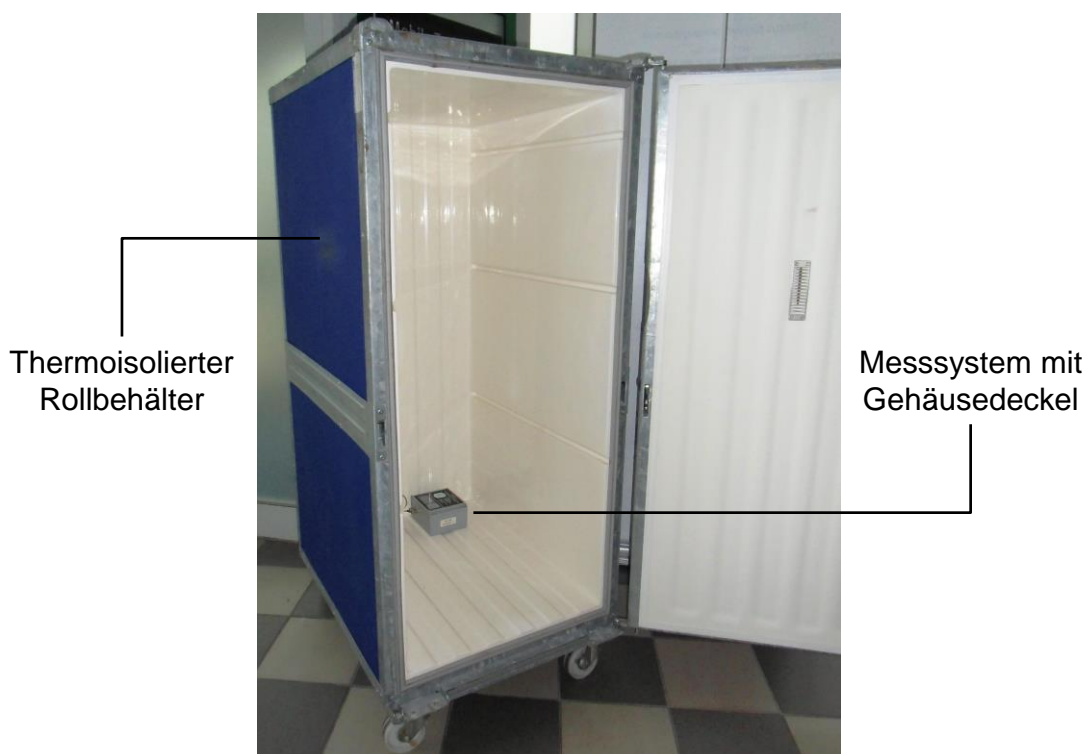
## 4.2 Durchführung von Praxismessungen

Zur Durchführung der Praxismessungen wurde ein spezielles Messsystem zur Erfassung der an einer Ladeeinheit vorhandenen Temperaturgradienten, Beschleunigungen und Beleuchtungsstärken angefertigt (siehe folgende **Abbildung 19**).



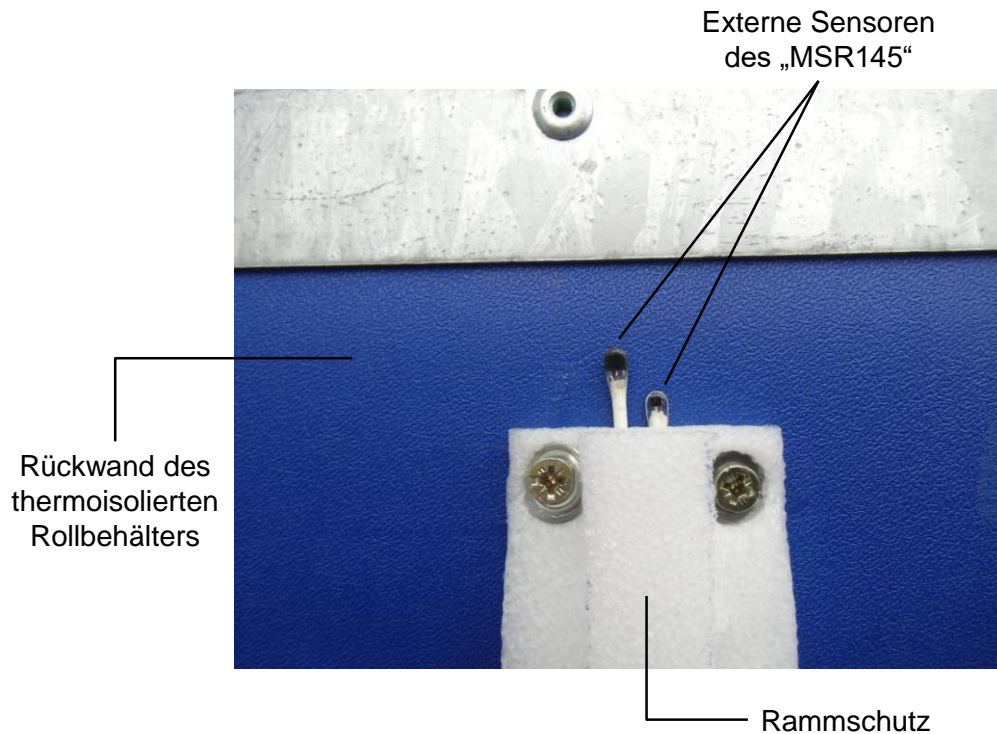
**Abbildung 19: Messsystem zur Erfassung von Temperaturgradienten, Beschleunigungen und Beleuchtungsstärken an einer Ladeeinheit**

Dieses Messsystem wurde im Rahmen der Praxismessungen – wie in der **Abbildung 20** dargestellt – in die beispielhaft ausgewählte Ladeeinheit eines thermoisolierten Rollbehälters integriert. Die elementaren Komponenten des Messsystems sind zum einen ein Datenlogger des Typs „MSR165“, mit dem die Beschleunigungen über die Längsachse, die Querachse und die vertikale Schwingachse sowie die Temperatur im Inneren des Rollbehälters aufgezeichnet werden konnten, und zum anderen ein Datenlogger des Typs „MSR145“, welcher über externe Sensoren verfügt, die der Messung der Beleuchtungsstärke und der Temperatur außerhalb des Rollbehälters dienen.



**Abbildung 20: Applikation des Messsystems innerhalb der exemplarisch ausgewählten Ladeeinheit**

Die externen Sensoren des Datenloggers „MSR145“ wurden hierbei an einer für das Beschreiben und Auslesen des geplanten Sensortransponders zugänglichen Stelle an der hinteren Außenwand des thermoisolierten Rollbehälters fixiert und darüber hinaus mit einem Rammschutz versehen (siehe **Abbildung 21**).



**Abbildung 21: Externe Sensoren zur Messung der Beleuchtungsstärke und der Temperatur**

#### **4.2.1 Transportprozesse**

Bei der Messung der innerhalb von Transportprozessen in Form von Temperaturgradienten, Lichteinstrahlung und Beschleunigungen auf Ladeeinheitenebene zur Verfügung stehenden Umgebungsenergien gilt es grundsätzlich, verschiedene Verkehrsträger zu unterscheiden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden in diesem Zusammenhang die Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasser wie folgt untersucht.

##### **4.2.1.1 Verkehrsträger Straße**

Im Vorfeld der Durchführung von Straßentransporten waren zunächst Faktoren zu definieren, die einen Einfluss auf die im Zusammenhang mit einem Lkw-Transport mithilfe entsprechender Energy-Harvesting-Technologien erzielbaren Energiemengen haben können. Hierbei konnte erneut auf bereits vorhandene Normen und Richtlinien zurückgegriffen werden, wobei in erster Linie eine Orientierung an der Norm DIN 30786-2 erfolgte. Im Folgenden sind ausgewählte Einflussparameter für den Verkehrsträger Straße aufgeführt:



- Straßenkategorie (z. B. Werksgelände, Landstraße oder Autobahn)
- Straßenbelag (z. B. Beton oder Asphalt)
- Federungssystem des Fahrzeuges – z. B. Blattfederung (in der Regel höhere Schwingintensitäten) oder Luftfederung
- Fahrzeugtyp
- Beladungsgrad (Beladung im Verhältnis zur zulässigen Nutzlast)
- Prüflingsmasse (in diesem Fall: Masse der Ladeinheit)
- Messpunkte im jeweiligen Transporthilfsmittel
- Geschwindigkeit des Fahrzeuges
- Position des Prüflings im Fahrzeug
- Klimatische Bedingungen während der Messfahrt
- Fahrdynamische Besonderheiten (z. B. Ausweichmanöver oder Notbremsung)
- Richtung der Schwingung – Vertikalschwingung (i. d. R. am größten), Längsschwingung oder Querschwingung (vgl. [DIN13], S. 13 ff.)

Die Zielstellung bei der Umsetzung der Praxismessungen, bei denen für alle betrachteten Verkehrsträger eine explizite Berücksichtigung der Norm DIN EN 15433-2 erfolgte<sup>17</sup>, lag in der Beachtung möglichst vieler der oben aufgeführten Einflussparameter. Im Hinblick auf den Verkehrsträger Straße wird die Untersuchung der während eines Lkw-Transportes an einer Ladeinheit auftretenden Temperaturdifferenzen, Beleuchtungsstärken und Beschleunigungen im Folgenden für die beispielhaft durchgeführten Transporte von Osnabrück nach Genk (Belgien) sowie von Genk nach Osnabrück ausführlich beschrieben.

Im Rahmen dieser Transportprozesse wurde der mit dem speziellen Messsystem ausgestattete thermoisolierte Rollbehälter (siehe **Abbildungen 19, 20 und 21**) per Lkw über eine Gesamtstrecke (Hin- und Rückfahrt) von knapp 600 Kilometern befördert. In Genk fand ein Umschlag des Rollbehälters in einen anderen Sattelaufleger statt, sodass auf der Hin- und Rückfahrt unterschiedliche Transportbedingungen

---

<sup>17</sup> In der Norm DIN EN 15433-2 werden allgemeine Anforderungen beschrieben, die es beim Messen und Auswerten von mechanisch-dynamischen Transportbelastungen zu berücksichtigen gilt (vgl. [DIN08a]).

realisiert bzw. berücksichtigt werden konnten. Bei dem eingesetzten Transportfahrzeug handelte es sich um einen Sattelzug mit geschlossenem Kasten, der über eine Luftfederung und ein zulässiges Gesamtgewicht von 40 Tonnen verfügte. Die Prüflingsmasse, die in diesem Fall die Masse des Rollbehälters darstellte, belief sich auf 96 Kilogramm und die Außentemperatur im Verlaufe der Messfahrten betrug durchschnittlich ca. 21 Grad Celsius. ([Sie14a], S. 28 f.)

Während der Transporte sowie des Umschlages des Rollbehälters in Genk wurde über einen Zeitraum von zehn Stunden innerhalb und außerhalb des Behälters die Temperatur aufgezeichnet, um hierdurch Aussagen zu den vorhandenen Temperaturdifferenzen treffen zu können, die mithilfe eines Seebeck-Elementes in elektrische Energie umgewandelt werden könnten (vgl. Kapitel 3.1.2). Die verschiedenen Temperaturverläufe sowie die Temperaturdifferenzen, die sich im Zusammenhang mit den Straßentransporten ergeben haben, sind in der **Abbildung 22** dargestellt, in der zu erkennen ist, dass die maximale Temperaturdifferenz bei 1,9 Grad Celsius lag. Im Durchschnitt ergaben sich über den betrachteten Zeitraum von zehn Stunden Temperaturunterschiede von 1,2 Grad Celsius. Hieraus lässt sich ableiten, dass bei den durchgeführten Lkw-Messfahrten kaum Potenzial zur Energieumwandlung mittels eines thermoelektrischen Generators vorhanden war. ([Sie14a], S. 30 f.)

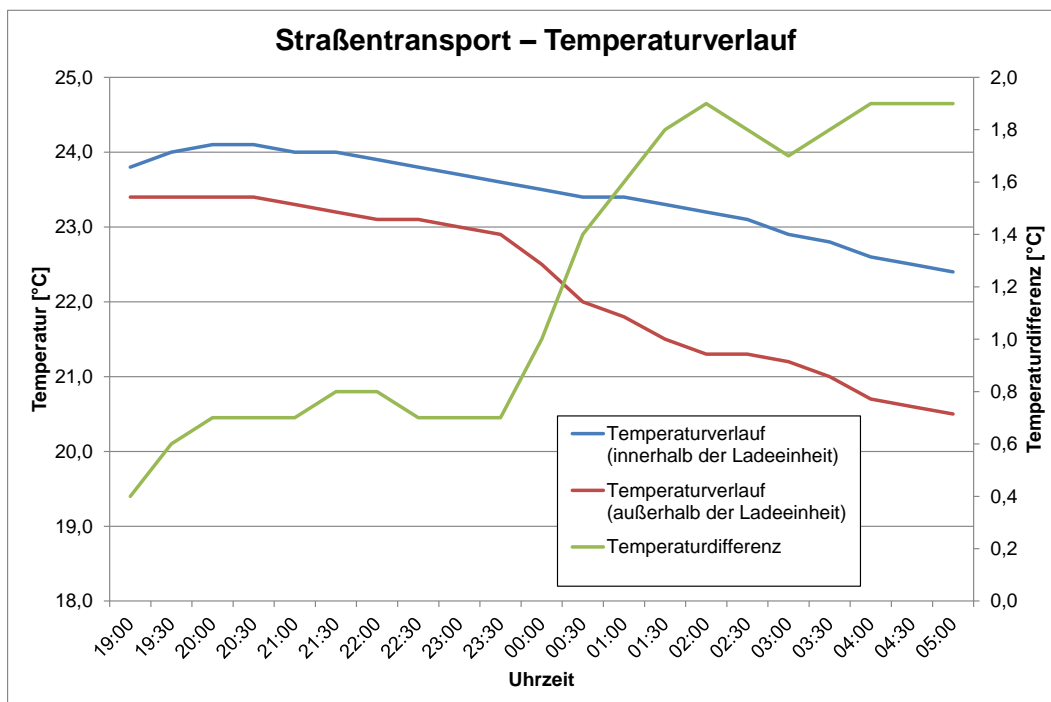
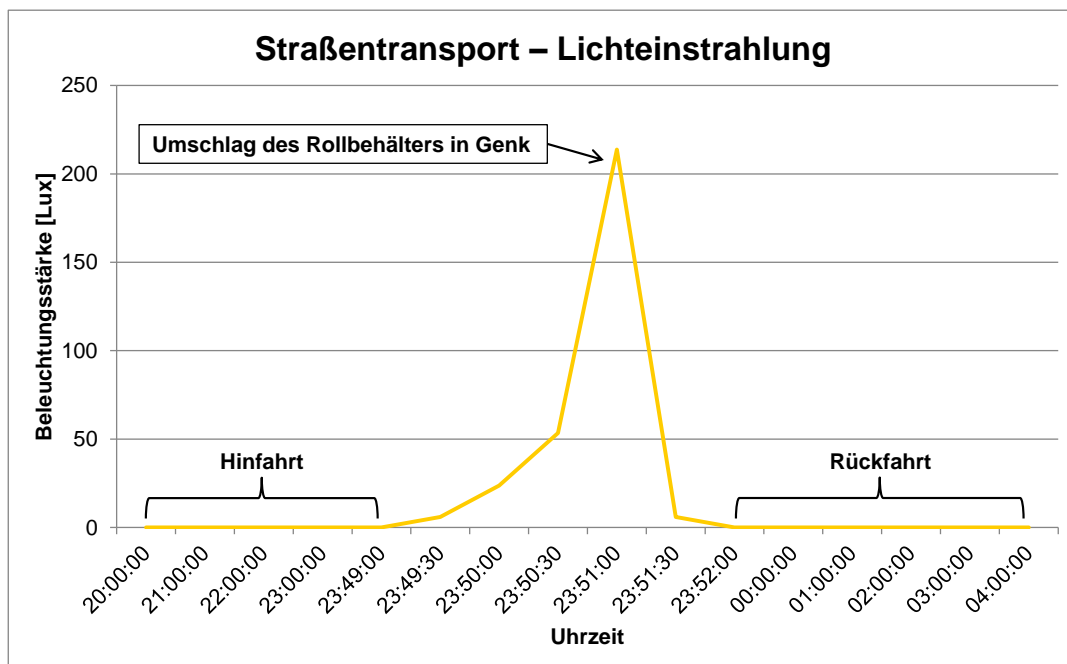


Abbildung 22: Nutzbare Temperaturdifferenzen im Zusammenhang mit beispielhaften Straßentransporten ([Sie14a], S. 30)

Die Lichteinstrahlung, die im Rahmen der durchgeführten Straßentransporte sowie des Nachtumschlages in Genk an der exemplarisch ausgewählten Ladeeinheit gemessen wurde, wird in der **Abbildung 23** gezeigt. Bei Betrachtung des Schaubildes wird deutlich, dass während der Transporte im Innenraum des Sattelauflegers – wie zu erwarten war – keinerlei Lichtstrahlung zur Verfügung stand, die zur Energieumwandlung mittels einer Photovoltaikzelle hätte genutzt werden können. Für die kurze Zeitdauer von ca. drei Minuten, innerhalb derer der Umschlag des Rollbehälters in den für die Rückfahrt vorgesehenen Sattelaufleger erfolgte, standen jedoch alleine durch die Lagerbeleuchtung bei Nacht Beleuchtungsstärken zur Verfügung, die zum Teil bei über 200 Lux lagen und bspw. im Zusammenhang mit der Lagerung von Ladeeinheiten genutzt werden können. (vgl. [Sie14a], S. 31)



**Abbildung 23: Lichteinstrahlung im Verlaufe beispielhafter Straßentransporte ([Sie14a], S. 31)**

Die Beschleunigungsmessungen erfolgten über die Längsachse, die Querachse und die vertikale Schwingachse und wurden mit einer Messfrequenz von 800 Hertz durchgeführt, um hierdurch auch auftretende Stöße mit einer sehr kurzen Zeitdauer im Bereich von Millisekunden erfassen zu können. Wichtige Parameter, die es in diesem Zusammenhang zu ermitteln galt, waren die maximalen negativen und positiven Beschleunigungsmesswerte, die der Bestimmung der erforderlichen Robustheit des geplanten energieautarken Zustandsüberwachungssystems dienen, sowie die

Standardabweichung der Beschleunigung, mittels derer das Potenzial zur Energieumwandlung mit einem elektromagnetischen Vibrationsgenerator eingeschätzt werden kann und die sich nach der DIN EN 15433-4 für ein Signal  $x(t)$ , bei  $0 \leq t \leq T$ , durch die folgende Formel berechnen lässt:

$$\sigma_x = \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T [x(t) - \mu_x]^2 dt \right\}^{1/2} = \left\{ \frac{1}{(N-1)} \sum_{n=1}^N [x(n\Delta t) - \mu_x]^2 \right\}^{1/2}$$

**Formel 4: Berechnung der Standardabweichung der Beschleunigung ([DIN08b], S. 8)**

Hierbei stehen  $T$  für die lineare Mittelungszeit für analoge Signale,  $N$  für die Anzahl der Datenwerte für digitale Signale (mit  $T = N\Delta t$ ) und  $\mu_x$  für den Mittelwert der Beschleunigung, der wie folgt berechnet wird:

$$\mu_x = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n\Delta t)$$

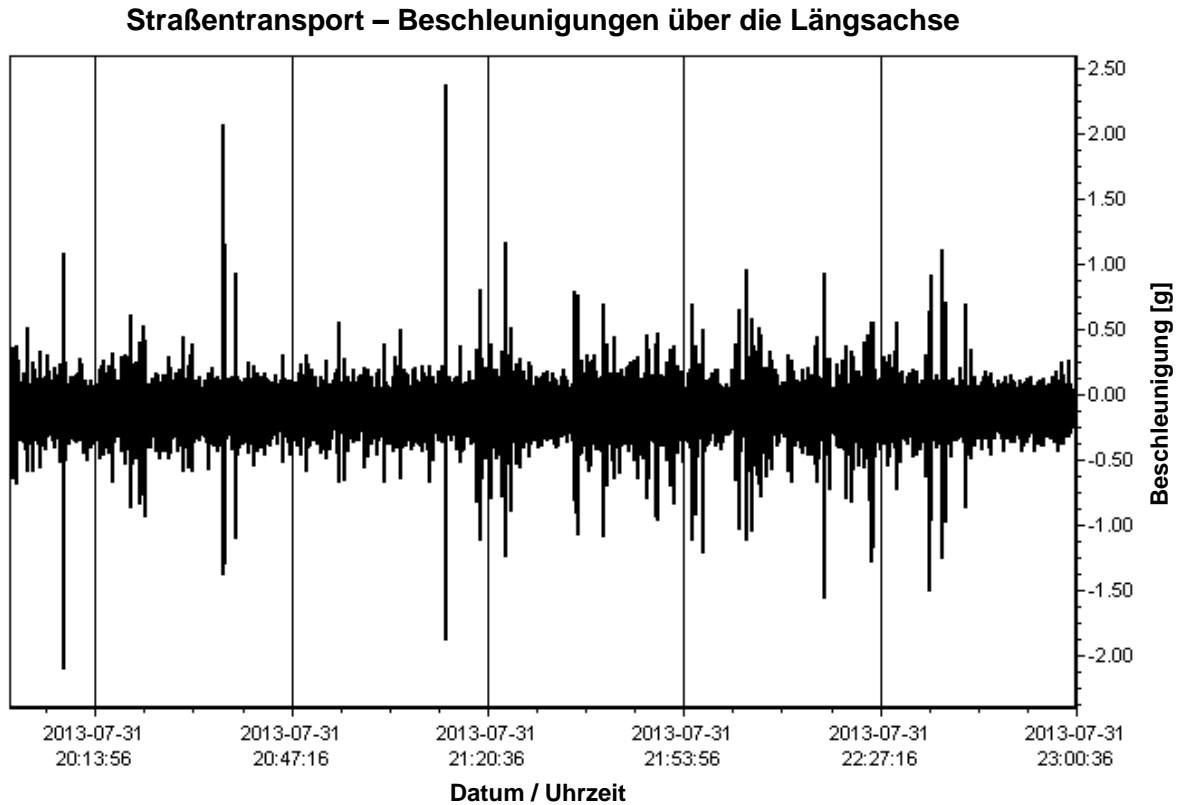
**Formel 5: Berechnung des Mittelwertes der Beschleunigung ([DIN08b], S. 8)**

Die Beladung des Fahrzeugs belief sich auf der Fahrt von Osnabrück nach Genk auf 8,9 Tonnen und der Prüfling bzw. der thermoisolierte Rollbehälter wurde – wie in der folgenden **Abbildung 24** zu sehen – ganz hinten im Transportfahrzeug positioniert:



**Abbildung 24: Beispielhafter Straßentransport von Osnabrück nach Genk – Position des Prüflings im Fahrzeug ([Sie14a], S. 29)**

Über die Längsachse in Fahrtrichtung wurden hierbei über den ausgewählten Zeitraum von drei Stunden mittels des Datenloggers „MSR165“ die in der folgenden **Abbildung 25** dargestellten Beschleunigungswerte gemessen:

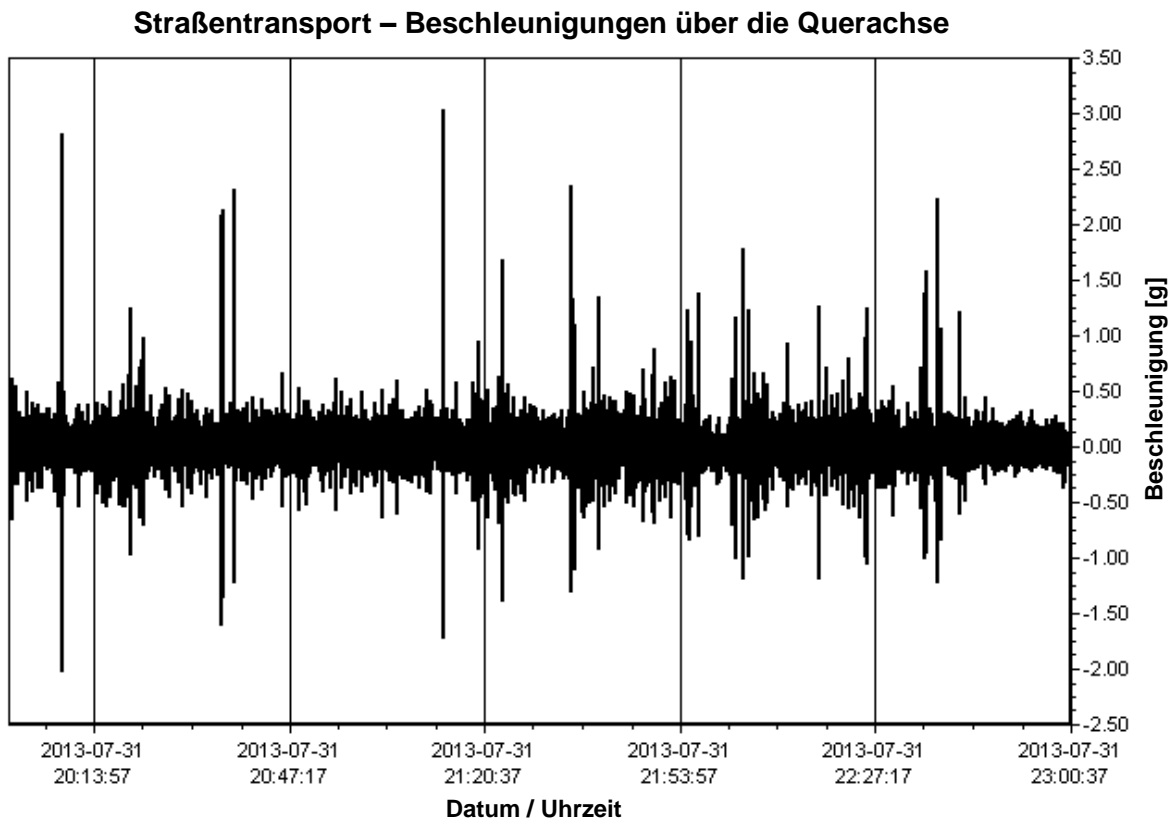


**Abbildung 25: Lkw-Transport von Osnabrück nach Genk – Beschleunigungen über die Längsachse**

Bei der gewählten Messfrequenz von 800 Hertz ergab sich für den Betrachtungszeitraum von drei Stunden an dieser Stelle insgesamt eine Anzahl von 8,64 Millionen Beschleunigungsmesswerten, die es jeweils für die Längsachse, die Querachse sowie die vertikale Schwingachse auszuwerten galt. Des Weiteren ist darauf hinzuweisen, dass sowohl auf der Messfahrt von Osnabrück nach Genk als auch auf der Messfahrt von Genk nach Osnabrück Stillstandzeiten des Transportfahrzeuges auftraten, die z. B. durch Staus oder Ruhezeiten des Lkw-Fahrers entstanden und auf der Hinfahrt ca. fünf und auf der Rückfahrt ca. acht Minuten betragen.

Die maximalen negativen bzw. positiven Beschleunigungen, die auf der Hinfahrt über die Längsachse aufgezeichnet wurden, lagen bei -2,09 g bzw. 2,38 g und für die Standardabweichung der Beschleunigung konnte ein Wert von 0,04 g ermittelt werden.

Die Beschleunigungswerte, die innerhalb des betrachteten dreistündigen Zeitraumes über die Querachse gemessen wurden, zeigt die nachfolgende **Abbildung 26**:



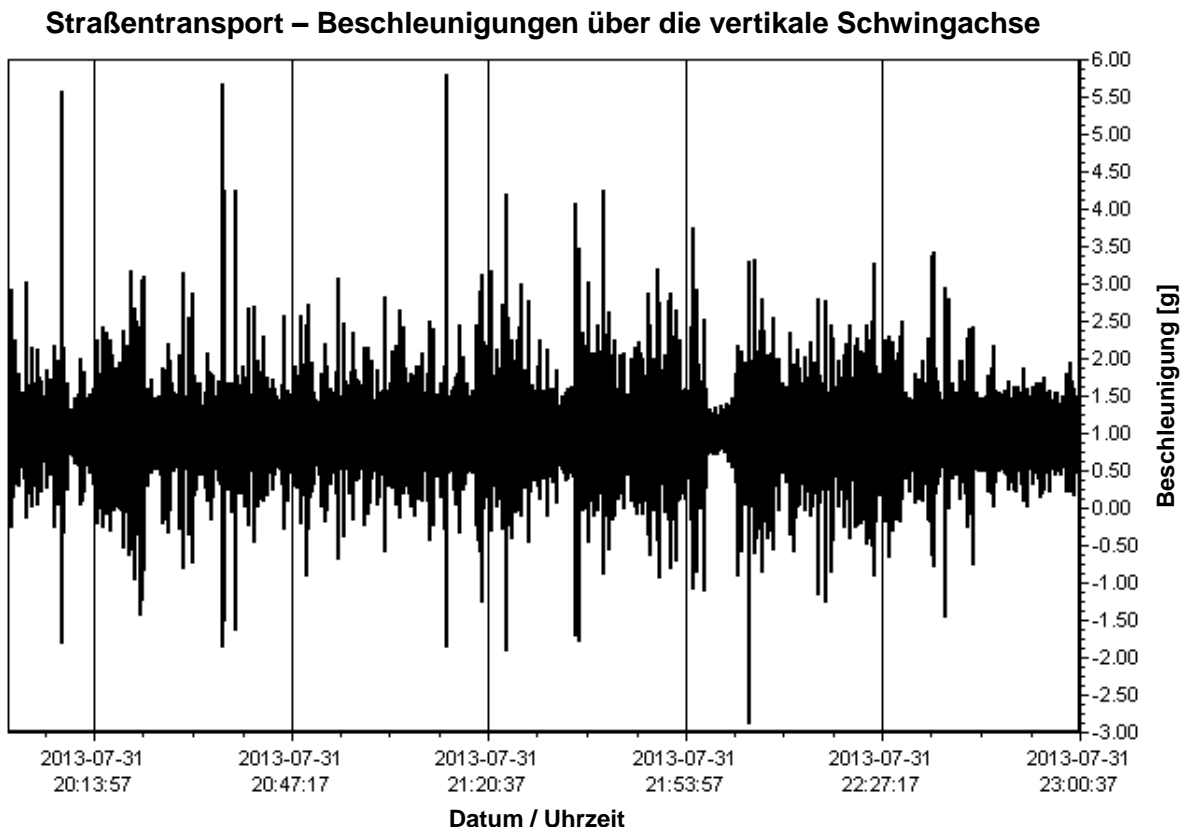
**Abbildung 26: Lkw-Transport von Osnabrück nach Genk – Beschleunigungen über die Querachse**

Hinsichtlich der über die Querachse vorhandenen maximalen negativen bzw. positiven Beschleunigungen ergaben sich Messwerte von -2,02 g bzw. 3,04 g. Die berechnete Standardabweichung der Beschleunigung lag indessen bei 0,05 g.

Insgesamt deutlich höhere Beschleunigungsmesswerte als über die Längsachse und die Querachse traten im Rahmen des untersuchten Lkw-Transportes von Osnabrück nach Genk über die vertikale Schwingachse auf. Dieses geht auch mit den Angaben aus der DIN 30786-2 einher, aus denen hervorgeht, dass bei Straßentransporten über die vertikale Schwingachse in der Regel die höchsten Beschleunigungen zu erwarten sind (vgl. [DIN13], S. 16 f.).

Die maximalen negativen bzw. positiven Beschleunigungen, die über die vertikale Schwingachse aufgezeichnet wurden, betragen -3,88 g bzw. 4,79 g und bezüglich der Standardabweichung der Beschleunigung ergab sich ein errechneter Wert von

0,13 g. Die diesbezüglich über den Betrachtungszeitraum von drei Stunden aufgezeichneten Beschleunigungswerte werden in der **Abbildung 27** noch einmal visualisiert, wobei anzumerken ist, dass sich der Ausgangspunkt der Vertikalbeschleunigungen aufgrund der vorhandenen Erdbeschleunigung gegenüber der Längsachse und der Querachse um 1 g unterscheidet.



**Abbildung 27: Lkw-Transport von Osnabrück nach Genk – Beschleunigungen über die vertikale Schwingachse**

Unter Berücksichtigung der zuvor bestimmten elementaren Einflussparameter bezüglich der bei einem Straßentransport auftretenden Beschleunigungen konnten auf der Messfahrt von Genk nach Osnabrück – wie bereits erwähnt – im Vergleich zur Hin- und Rückfahrt unterschiedliche Transportbedingungen umgesetzt bzw. betrachtet werden. Wesentliche Unterschiede ergaben sich in diesem Zusammenhang beispielsweise in Form der Beladung des Fahrzeuges, die auf der Rückfahrt lediglich 6,3 Tonnen betrug, sowie der Position des thermoisolierten Rollbehälters im Transportfahrzeug, der im Rahmen des Rücktransportes in der Nähe der Hinterachse positioniert wurde (siehe **Abbildung 28**).



Abbildung 28: Beispielhafter Straßentransport von Genk nach Osnabrück – Position des Prüfings im Fahrzeug ([Sie14a], S. 30)

Es erfolgte erneut eine Auswertung der über einen dreistündigen Zeitraum gemessenen Beschleunigungen, wobei sich in Bezug auf die über die Längsachse auftretenden Schwingungen der in der **Abbildung 29** zu sehende Verlauf ergab.

#### Straßentransport – Beschleunigungen über die Längsachse

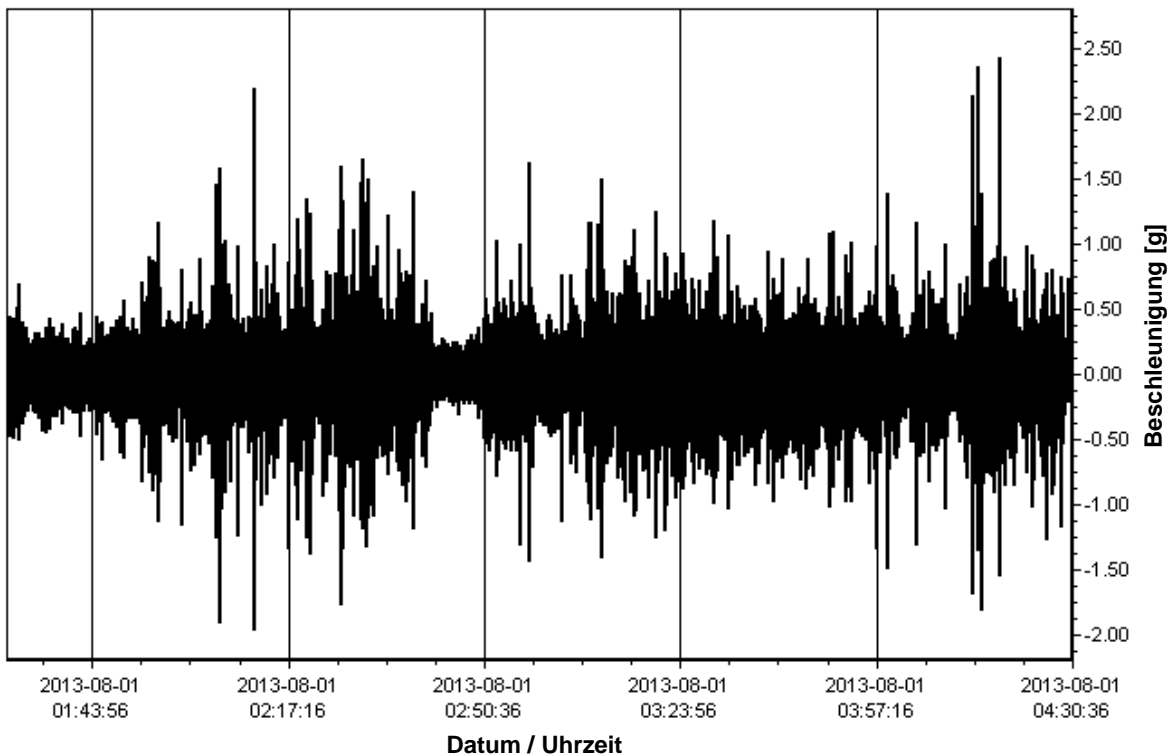
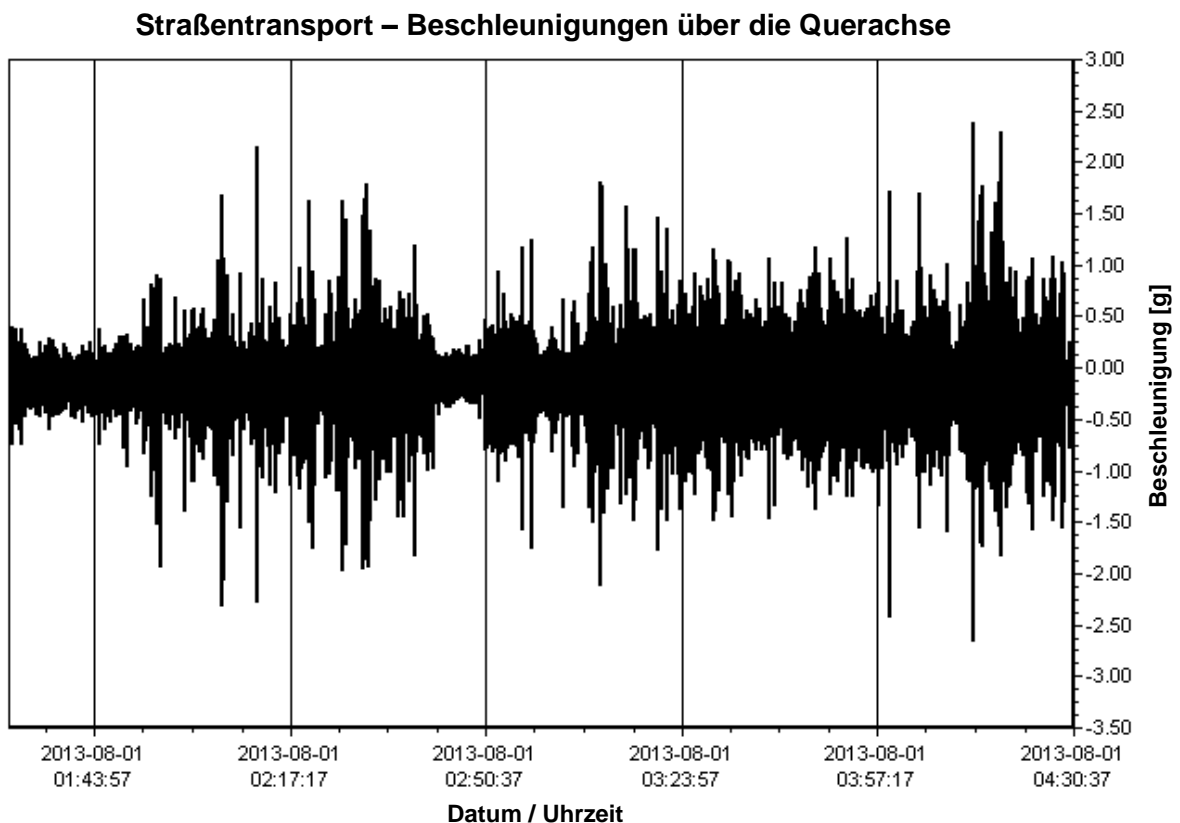


Abbildung 29: Lkw-Transport von Genk nach Osnabrück – Beschleunigungen über die Längsachse



Die über die Längsachse erfasste maximale negative Beschleunigung lag im Zusammenhang mit dieser Messfahrt bei -1,96 g und die maximale positive Beschleunigung bei 2,42 g. Für die Standardabweichung der Beschleunigung wurde wiederum ein Wert von 0,09 g ermittelt.

Die Beschleunigungsmesswerte, die indessen innerhalb des Betrachtungszeitraumes von drei Stunden über die Querachse aufgezeichnet wurden, sind in der folgenden **Abbildung 30** dargestellt:



**Abbildung 30: Lkw-Transport von Genk nach Osnabrück – Beschleunigungen über die Querachse**

Bezüglich der maximalen negativen bzw. positiven Beschleunigungen ergaben sich hierbei Messwerte von -2,65 g bzw. 2,38 g und für die Standardabweichung der Beschleunigung wurde im Hinblick auf die Querachse ein Wert von 0,11 g berechnet.

Über die vertikale Schwingachse traten bei der Messfahrt von Genk nach Osnabrück erneut deutlich höhere Beschleunigungsmesswerte als über die Längs- und Querachse auf. Die folgende **Abbildung 31** beinhaltet die diesbezüglich über den Betrachtungszeitraum von drei Stunden gemessenen Beschleunigungen:

### Straßentransport – Beschleunigungen über die vertikale Schwingachse

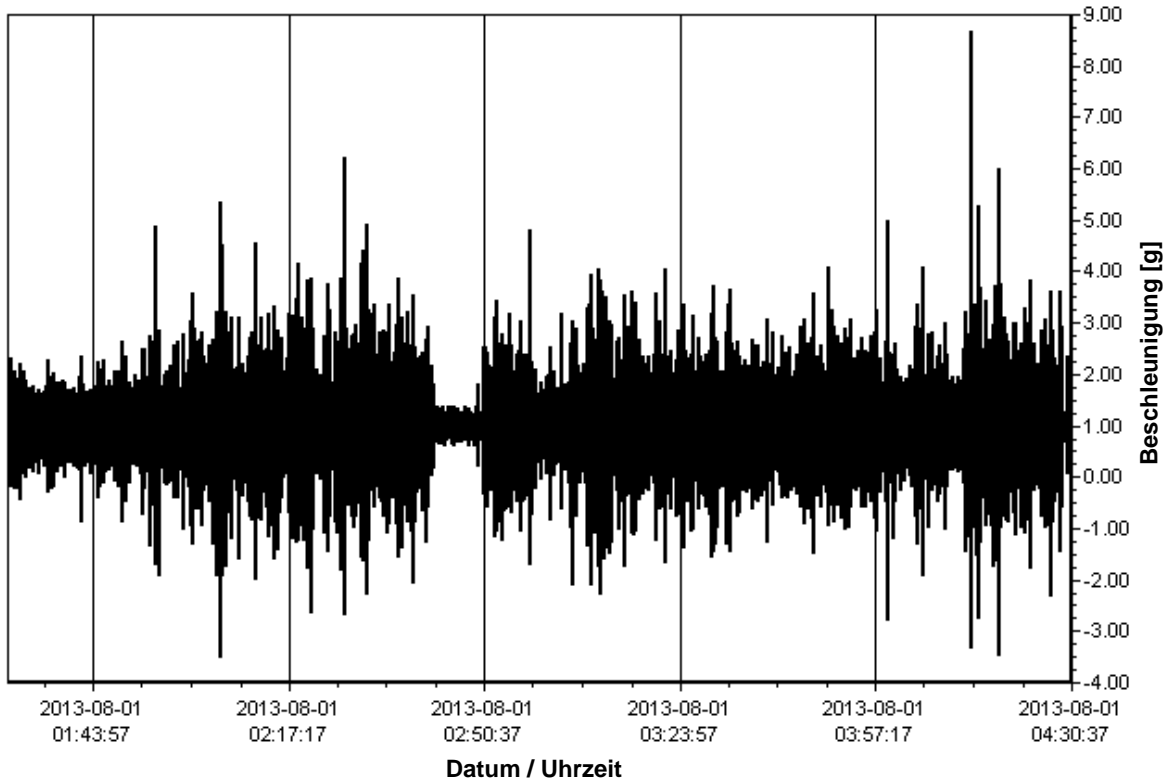


Abbildung 31: Lkw-Transport von Genk nach Osnabrück – Beschleunigungen über die vertikale Schwingachse

Hinsichtlich der maximalen negativen bzw. positiven Beschleunigungen ergaben sich in diesem Zusammenhang sehr hohe Werte von -4,50 g bzw. 7,69 g und die berechnete Standardabweichung der Beschleunigung betrug 0,22 g.

Einen zusammenfassenden Überblick bezüglich der im Rahmen der exemplarisch durchgeführten Straßentransporte erzielten wesentlichen Ergebnisse gibt die **Tabelle 13**. Diese beinhaltet zum einen die gemessenen maximalen negativen und positiven Beschleunigungen und zum anderen die errechneten Werte hinsichtlich der jeweils vorhandenen Standardabweichung der Beschleunigung, wobei zwischen der Längsachse, der Querachse und der vertikalen Schwingachse unterschieden wurde und zudem auf der Hin- und Rückfahrt unterschiedliche Transportbedingungen betrachtet werden konnten.

**Tabelle 13: Vorhandene Beschleunigungen im Rahmen beispielhafter Straßentransporte**

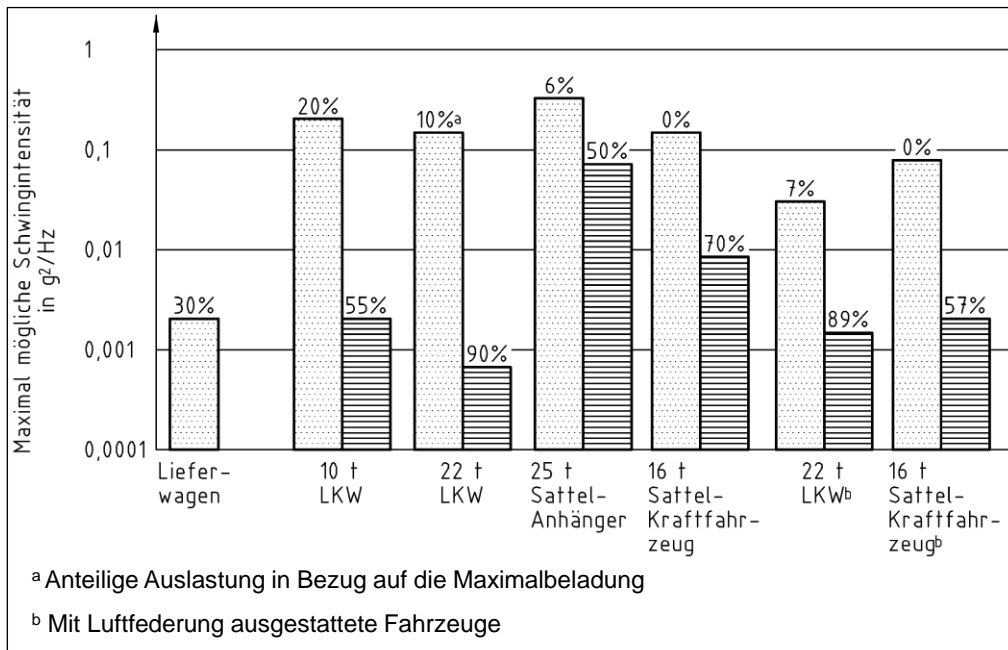
		Lkw-Transport von Osnabrück nach Genk	Lkw-Transport von Genk nach Osnabrück
<b>Längsachse</b>	Maximale negative Beschleunigung	-2,09 g	-1,96 g
	Maximale positive Beschleunigung	2,38 g	2,42 g
	Standardabweichung der Beschleunigung	0,04 g	0,09 g
<b>Querachse</b>	Maximale negative Beschleunigung	-2,02 g	-2,65 g
	Maximale positive Beschleunigung	3,04 g	2,38 g
	Standardabweichung der Beschleunigung	0,05 g	0,11 g
<b>Vertikale Schwingachse</b>	Maximale negative Beschleunigung	-3,88 g	-4,50 g
	Maximale positive Beschleunigung	4,79 g	7,69 g
	Standardabweichung der Beschleunigung	0,13 g	0,22 g

Aus den in der **Tabelle 13** dargestellten Ergebnissen lässt sich unter anderem ableiten, dass die größten Beschleunigungen – wie auch in der Norm DIN 30786-2 angegeben – über die vertikale Schwingachse auftraten und ein im Rahmen eines Straßentransportes zum Einsatz kommender Vibrationsgenerator dementsprechend auszurichten ist. Des Weiteren wird deutlich, dass mit Transportprozessen sehr hohe Maximalbelastungen von bis zu 7,69 g einhergehen, denen die einzusetzenden Energy-Harvesting-Module standhalten können müssen. Die Eigenschaft der Dauerfestigkeit spielt demnach – bezogen auf den Einsatz von Energy-Harvesting-Technologien innerhalb von TUL-Prozessen – eine entscheidende Rolle. ([Sie14a], S. 32 f.)

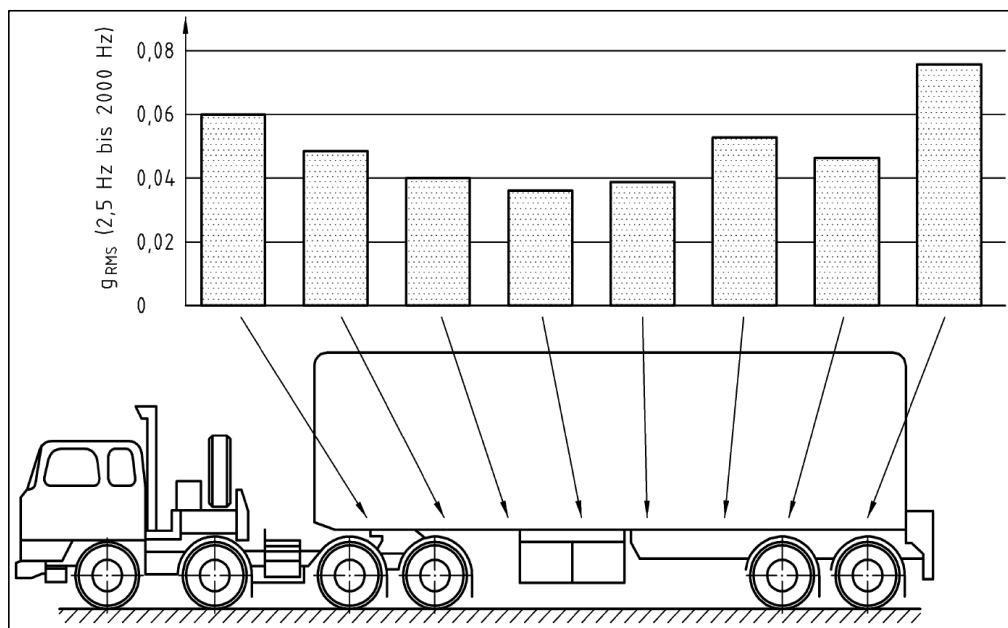
Ebenfalls auffällig ist die deutlich höhere Standardabweichung der Beschleunigung, die auf der Messfahrt von Osnabrück nach Genk im Vergleich zur Messfahrt von Genk nach Osnabrück aufgezeichnet wurde. Als mögliche Gründe hierfür wurden die geringere Beladung des Transportfahrzeuges auf der Rückfahrt sowie die veränderte Position des Prüflings innerhalb des Sattelauflegers identifiziert. ([Sie14a], S. 33)

## Untersuchung von TUL-Prozessen hinsichtlich potenziell vorhandener Umgebungsenergien auf Ladeeinheitenebene

Dieses ist auch mit den Normangaben aus der DIN 30786-2 vereinbar. Inwiefern die Schwingintensität auf der Ladefläche eines Transportfahrzeuges nach DIN 30786-2 von der Beladung des Fahrzeuges (siehe **Abbildung 32**) sowie der Position des Prüflings auf dem Fahrzeug (siehe **Abbildung 33**) abhängt, wird in den folgenden Grafiken veranschaulicht:



**Abbildung 32: Einfluss der Beladung auf die Intensität der Fahrzeugschwingungen ([DIN13], S. 46)**



**Abbildung 33: Schwingintensitäten an verschiedenen Orten eines Sattelschleppers ([DIN13], S. 47)**

Zunächst ist in der **Abbildung 32** zu erkennen, dass bei einem geringeren Beladungsgrad eines Fahrzeuges in der Regel höhere Schwingintensitäten auftreten. Des Weiteren wird bei Betrachtung der **Abbildung 33** deutlich, dass die größten Beschleunigungen bei einem Straßentransport in der Nähe der Achse des Transportfahrzeuges zu verzeichnen sind<sup>18</sup>, was wiederum mit den Ergebnissen einhergeht, die im Rahmen der eigens durchgeführten Praxismessungen erarbeitet und zuvor beschrieben wurden.

#### 4.2.1.2 Verkehrsträger Schiene

Auch bei der Untersuchung des Verkehrsträgers Schiene erfolgte eine Orientierung an der Norm DIN EN 15433-2, wobei – analog zur bereits beschriebenen Analyse des Verkehrsträgers Straße – zunächst Faktoren definiert wurden, die einen Einfluss auf die innerhalb von Schienentransporten vorhandenen Umgebungsenergien haben können. Wichtige nach der DIN 30786-2 zu berücksichtigende Einflussparameter sind in diesem Zusammenhang zum Beispiel:

- Die Streckenkategorie der Messstrecke (z. B. Hochgeschwindigkeitsstrecke, Ausbaustrecke oder Altstrecke)
- Die maximale Fahrgeschwindigkeit je Streckenkategorie
- Die Aufprallgeschwindigkeit beim Rangieren
- Die Beladung der Güterwagen
- Die Prüflingsmasse (in diesem Fall: Masse der Ladeinheit)
- Die Messpunkte im jeweiligen Transporthilfsmittel
- Die Position des Prüflings im Güterwagen
- Fahrdynamische Besonderheiten (z. B. Kuppelzustand oder Notbremsung)
- Die Richtung der Schwingung – Vertikalschwingung (i. d. R. am größten), Längsschwingung oder Querschwingung
- Klimatische Bedingungen während der Messfahrt (vgl. [DIN13], S. 51 ff.)

---

<sup>18</sup> Bezüglich der **Abbildung 33** gilt es anzumerken, dass die für den Frequenzbereich von 2,5 Hertz bis 2000 Hertz angegebenen Schwingintensitäten in  $g_{RMS}$  bemessen sind, wobei die Abkürzung „RMS“ für „Root Mean Square“ steht und  $g_{RMS}$  damit den quadratischen Mittelwert der über den betrachteten Frequenzbereich auftretenden Beschleunigungen darstellt (vgl. [ASTM12], S. 2).

Zur Bestimmung der während eines Schienentransportes an einer Ladeeinheit auftretenden Beschleunigungen, Beleuchtungsstärken und Temperaturdifferenzen wurde der mit dem angefertigten speziellen Messsystem ausgestattete thermoisolierte Rollbehälter per Bahn über eine Strecke von insgesamt 570 Kilometern von Osnabrück über Nürnberg nach Regensburg transportiert. Hierbei wurde eine Wechselbrücke (siehe **Abbildung 34**) auf einem Gelenk-Containertragwagen (siehe **Abbildung 35**) befördert. Die Höchstgeschwindigkeit des Gelenk-Containertragwagens lag bei 120 Kilometern pro Stunde, das Eigengewicht bei 30,84 Tonnen und das maximale Ladegewicht bei 104 Tonnen. ([Sie14a], S. 35 f.)



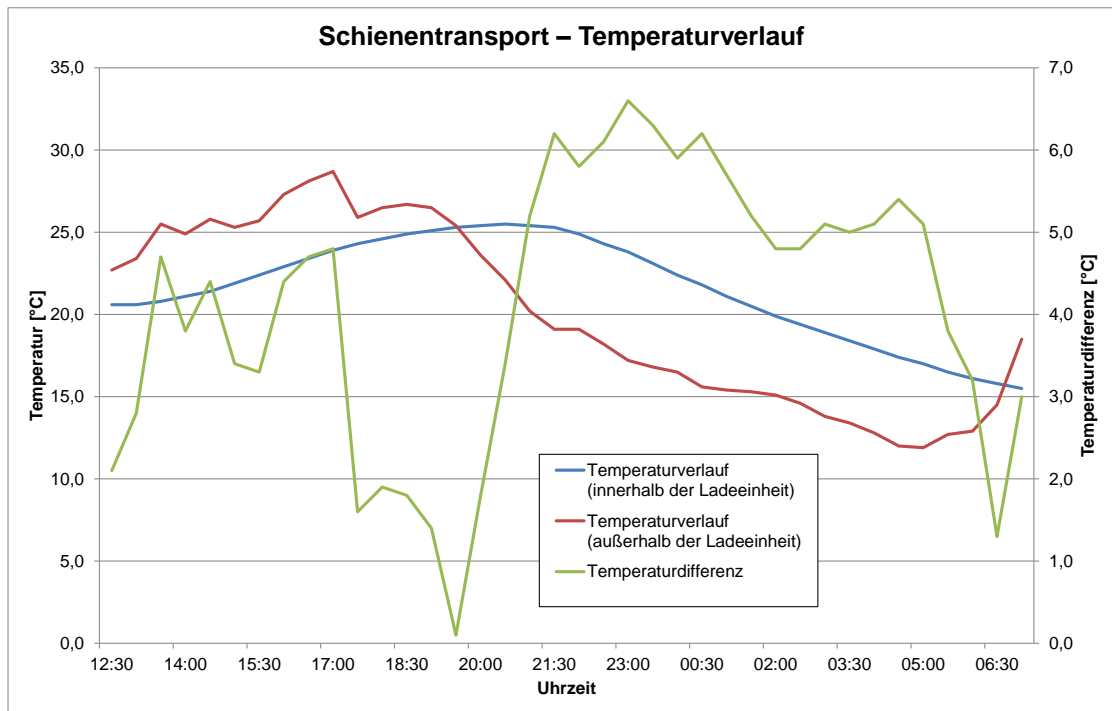
**Abbildung 34: Schienentransport – Eingesetzte Wechselbrücke ([Sie14a], S. 35)**



**Abbildung 35: Schienentransport – Eingesetzter Gelenk-Containertragwagen ([Sie14a], S. 36)**

Der Prüfling, d. h. der thermoisierte Rollbehälter, wurde vorne links in der Wechselbrücke positioniert, wobei dessen Eigengewicht, d. h. die Prüflingsmasse, 96 Kilogramm betrug. Im Rahmen der Beschleunigungsmessungen wurde auch hier aus den oben genannten Gründen eine hohe Messfrequenz von 800 Hertz gewählt. Die Außentemperatur während der durchgeführten Messungen lag tagsüber – bei leichter Bewölkung – bei durchschnittlich 22 Grad Celsius, wobei diese in der Nacht zwischenzeitlich auf bis zu neun Grad Celsius absank. ([Sie14a], S. 36)

Die Temperaturverläufe sowie die Temperaturdifferenzen, die sich im Zusammenhang mit dem durchgeführten Schienentransport innerhalb und außerhalb des Rollbehälters über einen Zeitraum von 18 Stunden ergeben haben, sind in der folgenden **Abbildung 36** dargestellt:



**Abbildung 36: Nutzbare Temperaturdifferenzen während eines beispielhaften Schienentransportes ([Sie14a], S. 37)**

Wie aus der **Abbildung 36** hervorgeht, lag die gemessene maximale Temperaturdifferenz zwischen der Innen- und Außentemperatur des Rollbehälters bei 6,6 Grad Celsius. Durchschnittlich ergaben sich über den Betrachtungszeitraum Temperaturunterschiede von 4,1 Grad Celsius. Das Potenzial zur Energieumwandlung mittels eines thermoelektrischen Generators war demnach höher als bei den durchgeführten

Lkw-Messfahrten, jedoch ist auch die durchschnittliche Temperaturdifferenz von 4,1 Grad Celsius als verhältnismäßig gering einzustufen. ([Sie14a], S. 37)

Die Lichteinstrahlung, die an der beispielhaft ausgewählten Ladeeinheit tagsüber im Rahmen der Lagerung sowie im Verlaufe des Schienentransportes aufgezeichnet wurde, zeigt die folgende Grafik:

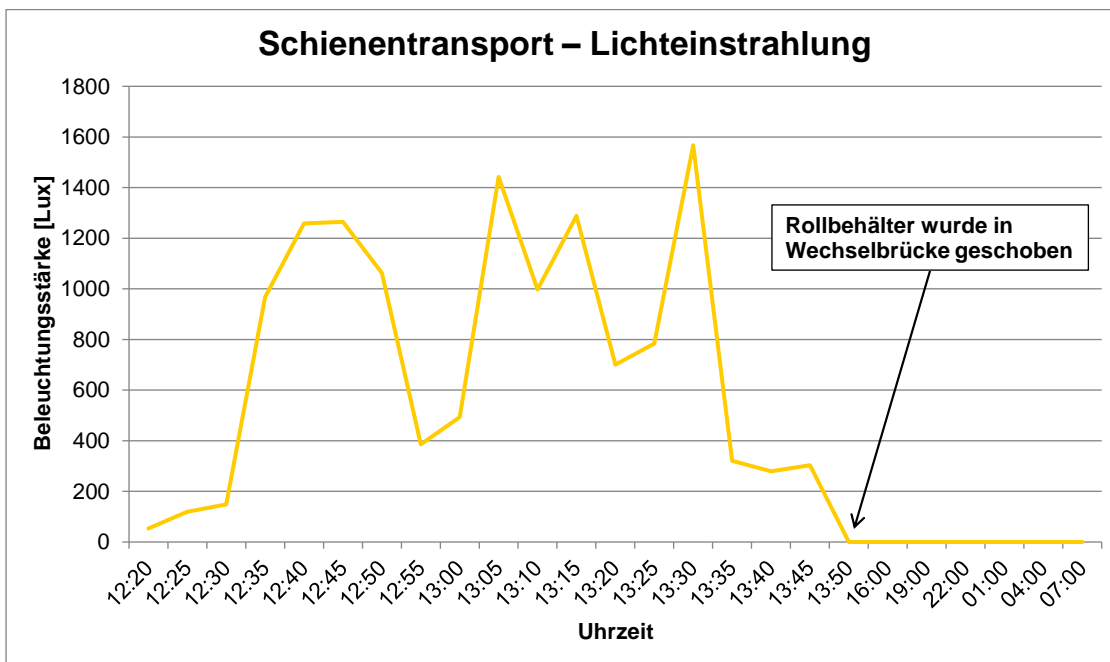


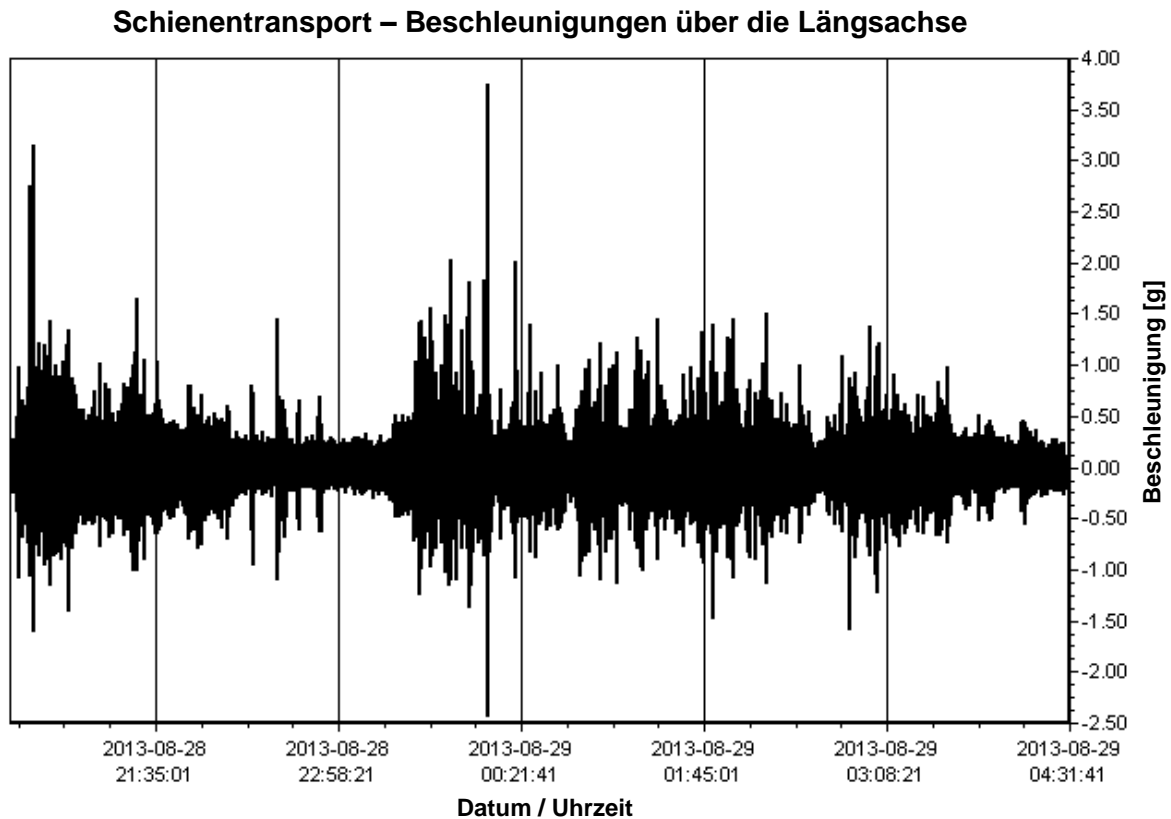
Abbildung 37: Lichteinstrahlung während eines beispielhaften Schienentransportes ([Sie14a], S. 38)

Aus der **Abbildung 37** geht hervor, dass im Zusammenhang mit der Lagerung tagsüber in der Regel hohe Beleuchtungsstärken zur Verfügung stehen, die – bezogen auf die Zwischenlagerung des Rollbehälters im Vorfeld des durchgeführten Schienentransportes – bei leichter Bewölkung durchschnittlich knapp 1000 Lux betragen. Im Hinblick auf den Transportprozess stand jedoch innerhalb der eingesetzten Wechselbrücke keinerlei Lichtstrahlung zur Verfügung, die zur Energieumwandlung mithilfe einer Solarzelle hätte genutzt werden können. ([Sie14a], S. 38)

Die Beschleunigungsmessungen für den Verkehrsträger Schiene erfolgten – wie bereits bei den Straßentransporten – über die Längsachse, die Querachse und die vertikale Schwingachse. Über die Längsachse in Fahrtrichtung wurden hierbei innerhalb des ausgewählten Betrachtungszeitraumes von acht Stunden mittels des Daten-



loggers „MSR165“ die in der folgenden **Abbildung 38** dargestellten Beschleunigungswerte gemessen:



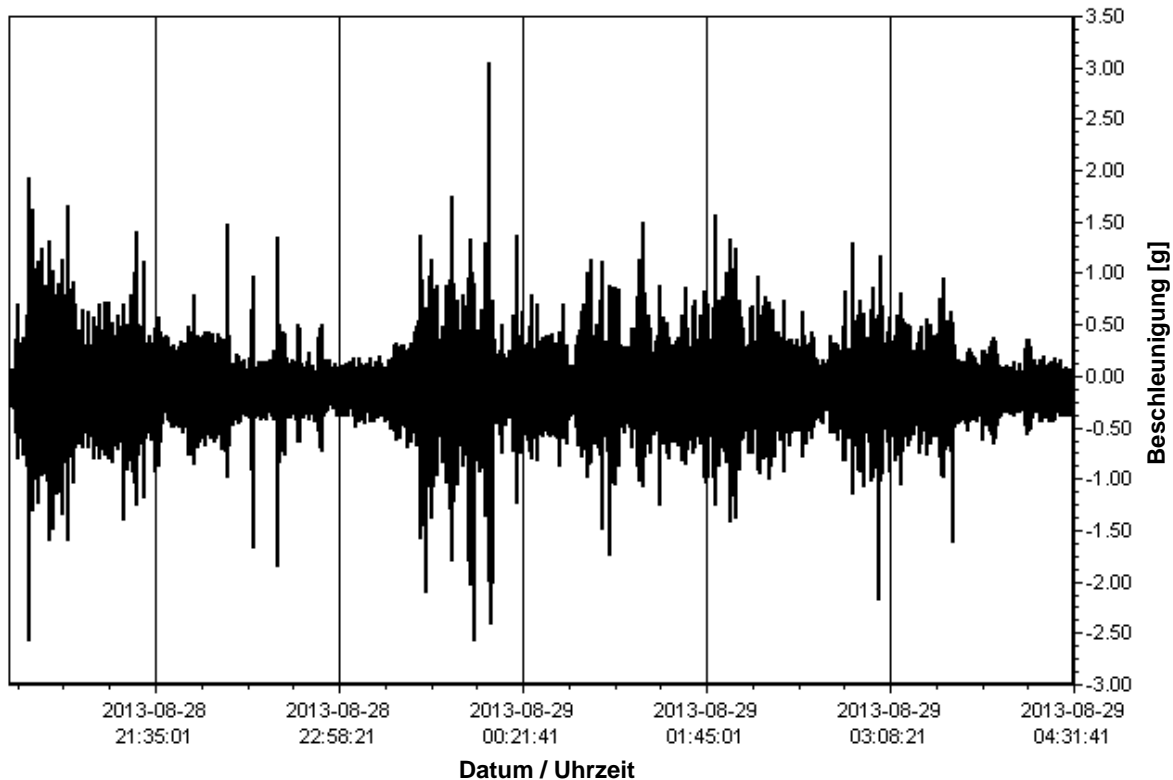
**Abbildung 38: Beispielhafter Schienentransport – Beschleunigungen über die Längsachse**

Bei der gewählten Messfrequenz von 800 Hertz ergab sich über den betrachteten Zeitraum von acht Stunden in Bezug auf die Auswertung der Beschleunigungsmessungen für den Verkehrsträger Schiene eine Anzahl von 23,04 Millionen Messwerten je untersuchter Schwingachse. Zudem gilt es zu erwähnen, dass im Rahmen des Schienentransportes insgesamt Stillstandzeiten von 39 Minuten zu verzeichnen waren, die unter anderem durch den kurzen Zwischenhalt des Güterzuges in Nürnberg zustande kamen.

Hinsichtlich der maximalen negativen bzw. positiven Beschleunigungen traten über die Längsachse Messwerte von -2,43 g bzw. 3,75 g auf und die Berechnung der Standardabweichung der Beschleunigung ergab einen Wert von 0,08 g.

Die Beschleunigungen, die im Verlaufe des Schienentransportes über die Querachse aufgezeichnet wurden, sind in der nachfolgenden **Abbildung 39** dargestellt:

### Schienentransport – Beschleunigungen über die Querachse



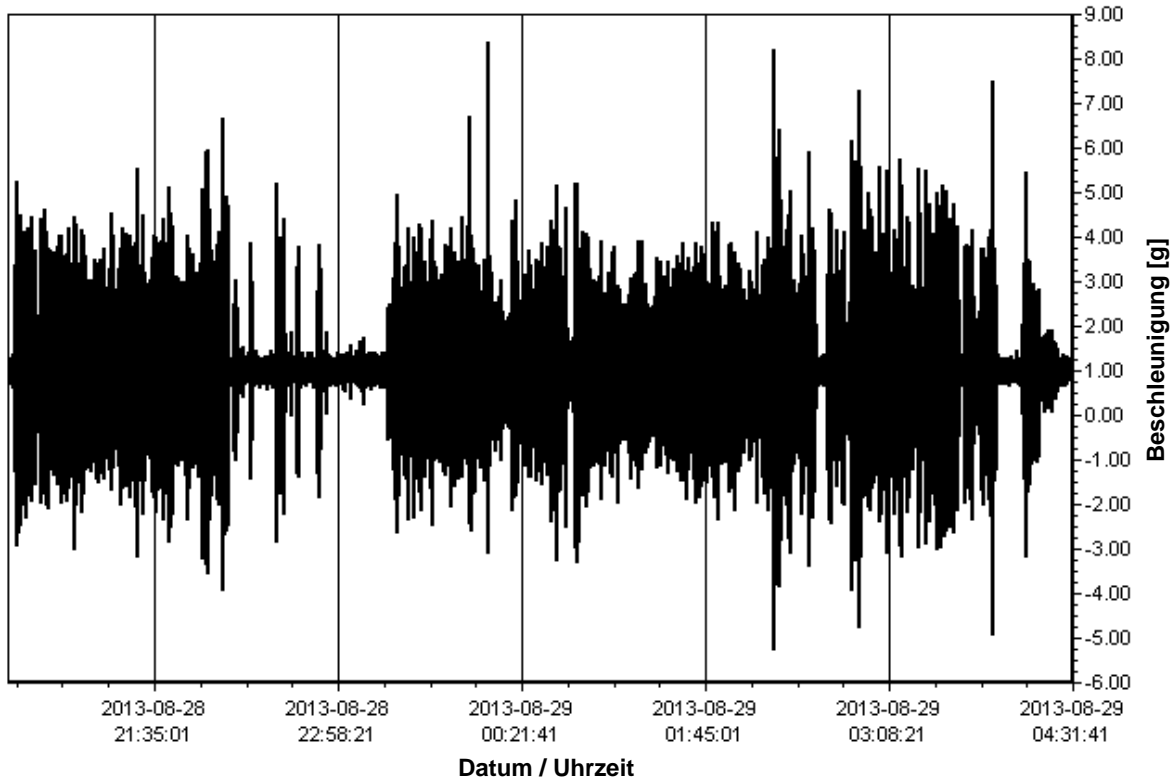
**Abbildung 39: Beispielhafter Schienentransport – Beschleunigungen über die Querachse**

Die maximalen negativen bzw. positiven Beschleunigungen, die während des Schienentransportes über die Querachse gemessen wurden, lagen bei -2,56 g bzw. 3,05 g, wobei die ermittelte Standardabweichung der Beschleunigung 0,09 g betrug.

Die Beschleunigungsmesswerte, die im Hinblick auf den Verkehrsträger Schiene über die vertikale Schwingachse erhoben wurden und in der **Abbildung 40** gezeigt werden, lagen – wie bereits bei den untersuchten Straßentransporten – im Vergleich zur Längs- und Querachse deutlich höher.

Bezüglich der maximalen negativen bzw. positiven Beschleunigungen ergaben sich hierbei gemessene Werte von -6,24 g bzw. 7,37 g und für die Standardabweichung der Beschleunigung ein errechneter Wert von 0,43 g.

**Schienentransport – Beschleunigungen über die vertikale Schwingachse**



**Abbildung 40: Beispielhafter Schienentransport – Beschleunigungen über die vertikale Schwingachse**

In der folgenden **Tabelle 14** sind die im Verlauf des exemplarischen Schienentransportes erfassten maximalen negativen und positiven Beschleunigungsmesswerte sowie die berechneten Standardabweichungen der Beschleunigung für die drei betrachteten Schwingachsen noch einmal zusammenfassend aufgeführt:

**Tabelle 14: Vorhandene Beschleunigungen während eines beispielhaften Schienentransportes**

		Schienentransport von Osnabrück nach Regensburg
<b>Längs- achse</b>	Maximale negative Beschleunigung	-2,43 g
	Maximale positive Beschleunigung	3,75 g
	Standardabweichung der Beschleunigung	0,08 g
<b>Quer- achse</b>	Maximale negative Beschleunigung	-2,56 g
	Maximale positive Beschleunigung	3,05 g
	Standardabweichung der Beschleunigung	0,09 g
<b>Vertikale Schwing- achse</b>	Maximale negative Beschleunigung	-6,24 g
	Maximale positive Beschleunigung	7,37 g
	Standardabweichung der Beschleunigung	0,43 g

Aus den in der **Tabelle 14** dargestellten Werten lässt sich ableiten, dass die größten Beschleunigungen abermals über die vertikale Schwingachse auftraten, wobei in Analogie zu den durchgeführten Straßentransporten sehr hohe Maximalbelastungen von bis zu 7,37 g zu verzeichnen waren. Ein im Rahmen eines Schienentransportes eingesetzter Vibrationsgenerator ist demnach ebenfalls auf die vertikale Schwingachse auszurichten und bedarf erneut einer sehr hohen Robustheit bzw. Dauerfestigkeit. Darüber hinaus lag die Standardabweichung der Beschleunigung – bezogen auf die relevante vertikale Schwingachse – mit einem Wert von 0,43 g deutlich höher als bei den beispielhaft durchgeführten Straßentransporten, wodurch sich für den Verkehrsträger Schiene ein sehr hohes Potenzial zur Energieumwandlung mittels eines elektromagnetischen Vibrationsgenerators ergibt.

#### **4.2.1.3 Verkehrsträger Wasser**

Bei der Untersuchung des Verkehrsträgers Wasser wurden – wie bereits bei der Analyse der Verkehrsträger Straße und Schiene – zunächst Faktoren definiert, die einen Einfluss auf die im Rahmen eines Seetransportes vorhandenen Umgebungsenergien haben können. Wesentliche Einflussparameter bei der Betrachtung des Verkehrsträgers Wasser sind nach der Norm DIN 30786-2 vor allem:

- Die Nutzlast des Frachters
- Die Geschwindigkeit des Frachters
- Die Transportbedingungen (ruhige, raue oder stürmische See)
- Die Wind- und Wellenrichtung
- Die Beladung des Frachters
- Die Prüflingsmasse (in diesem Fall: Masse der Ladeeinheit)
- Die Messpunkte im jeweiligen Transporthilfsmittel
- Klimatische Bedingungen während der Messfahrt (ggf. Durchquerung verschiedener Klimazonen)
- Die Position des Prüflings auf dem Frachter und im Container (vgl. [DIN13], S. 59 ff.)

Bei der Durchführung der Praxismessungen wurde auch für den Verkehrsträger Wasser die Norm DIN EN 15433-2 explizit berücksichtigt (vgl. [DIN08a]). Zur Bestimmung der im Zusammenhang mit einem Seetransport an einer Ladeeinheit vorhandenen Beschleunigungen, Beleuchtungsstärken und Temperaturdifferenzen wurde der mit dem speziellen Messsystem ausgestattete thermoisolierte Rollbehälter per Seeschiff über eine Strecke von insgesamt ca. 9700 Kilometern und eine Zeitdauer von knapp 24 Tagen von Bremerhaven nach Veracruz (Mexiko) transportiert. ([Sie14a], S. 40)

Die Temperaturverläufe sowie die Temperaturdifferenzen, die sich im Rahmen des Seetransportes innerhalb und außerhalb des Rollbehälters über den ausgewählten Zeitraum von einer Woche ergeben haben, sind in der folgenden **Abbildung 41** zu sehen:

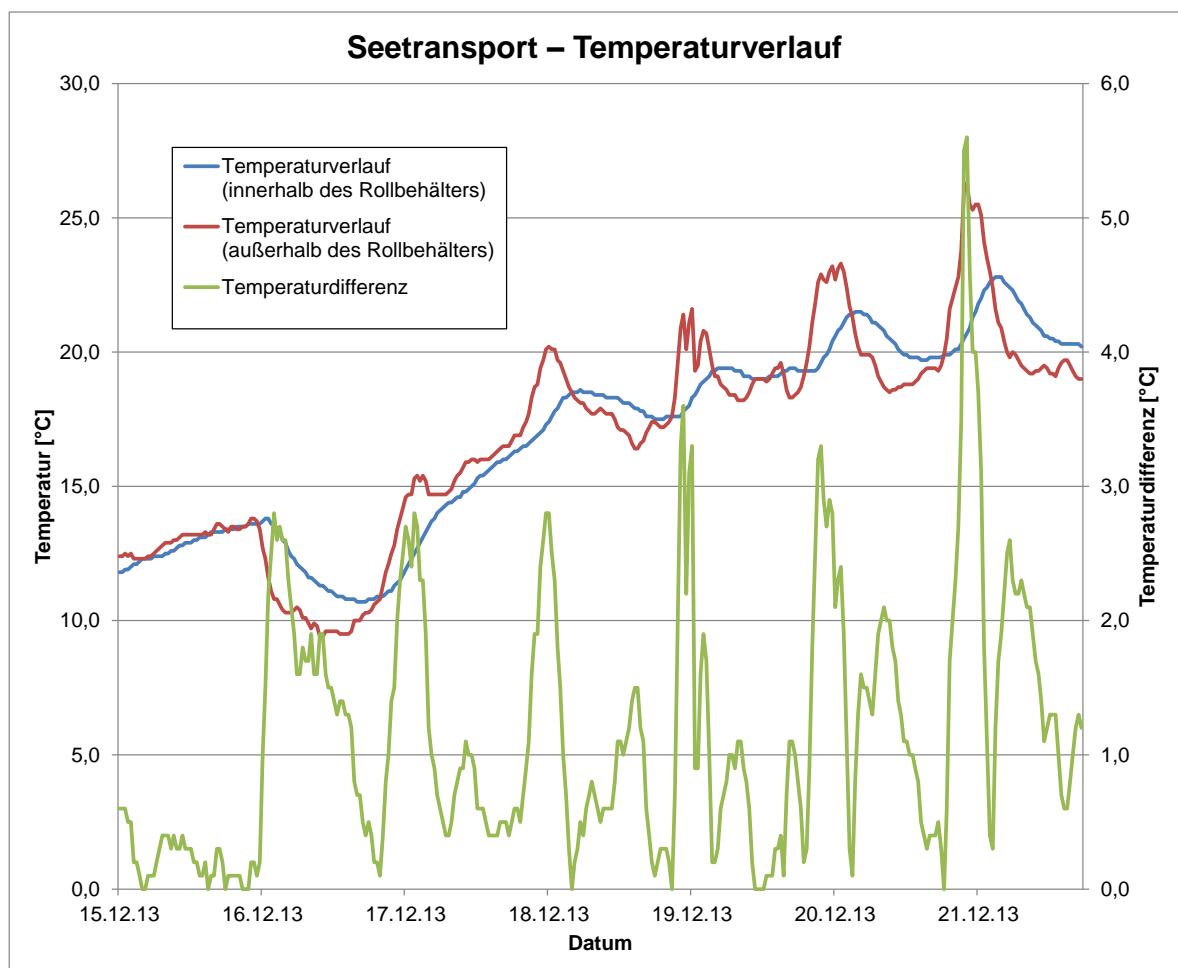


Abbildung 41: Nutzbare Temperaturdifferenzen im Verlaufe eines beispielhaften Seetransportes ([Sie14a], S. 41)

Wie aus der **Abbildung 41** abzuleiten ist, lag die maximale Differenz zwischen der Innen- und Außentemperatur des thermoisolierten Rollbehälters im Verlaufe des Seetransportes bei 5,6 Grad Celsius. Die durchschnittlichen Temperaturunterschiede, die über den Zeitraum von einer Woche gemessen wurden, fielen mit 1,15 Grad Celsius jedoch sehr gering aus, sodass auch für den Verkehrsträger Wasser die Schlussfolgerung gezogen werden muss, dass der Einsatz eines Seebeck-Elements zur Energieumwandlung wenig erfolgsversprechend ist. Auch in Form von Lichtstrahlung stand innerhalb des im Rahmen des Seetransportes verwendeten 20-Fuß-ISO-Containers keinerlei Energie zur Verfügung, die mittels einer Solarzelle in elektrische Energie hätte umgewandelt werden können. ([Sie14a], S. 41 f.)

Die Beschleunigungsmessungen wurden bei der Untersuchung des Verkehrsträgers Wasser aufgrund der begrenzten Speicherkapazität des Datenloggers „MSR165“ mit einer geringeren Messfrequenz als bei den Verkehrsträgern Straße und Schiene durchgeführt, um hierdurch einen möglichst langen Zeitraum des Seetransportes analysieren zu können. Da die Frequenzen der Beschleunigung bei einem Seetransport als relativ gering eingeschätzt werden konnten (siehe **Tabelle 12** auf der Seite 53), war eine Messfrequenz von 400 Hertz, bei der die Betrachtung eines Zeitraumes von zehn Tagen möglich war, in diesem Zusammenhang ausreichend, um alle relevanten Beschleunigungen aufzeichnen zu können.

Einen weiteren limitierenden Faktor bei der Durchführung des Seetransportes stellte die Kapazität des Akkumulators des Datenloggers „MSR165“ dar. Der interne Akkumulator dieses Datenloggers verfügt lediglich über eine Kapazität von 900 Milliamperestunden, was bei einer eingestellten Messfrequenz von 400 Hertz für einen Zeitraum von ca. vier Tagen ausgereicht hätte. Das angefertigte spezielle Messsystem wurde aus diesem Grund um einen externen Akkumulator mit einer Kapazität von 8400 Milliamperestunden erweitert, wodurch die Betrachtung des durch die Speicherkapazität des Datenloggers begrenzten Zeitraumes von zehn Tagen ermöglicht wurde. (vgl. [Sie14a], S. 40 f.)

In der **Abbildung 42** ist der während des Seetransportes über die Längsachse in Fahrtrichtung gemessene Beschleunigungsverlauf für den ausgewählten Zeitraum von 24 Stunden dargestellt:

Seetransport – Beschleunigungen über die Längsachse

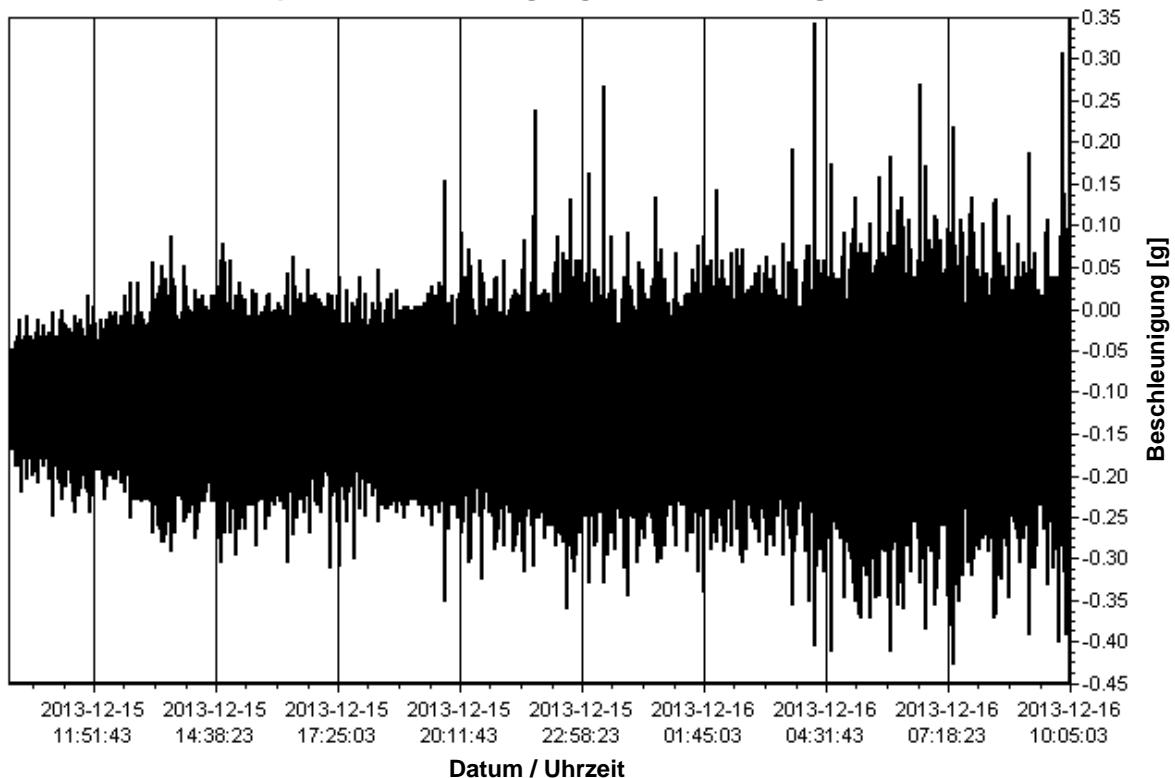


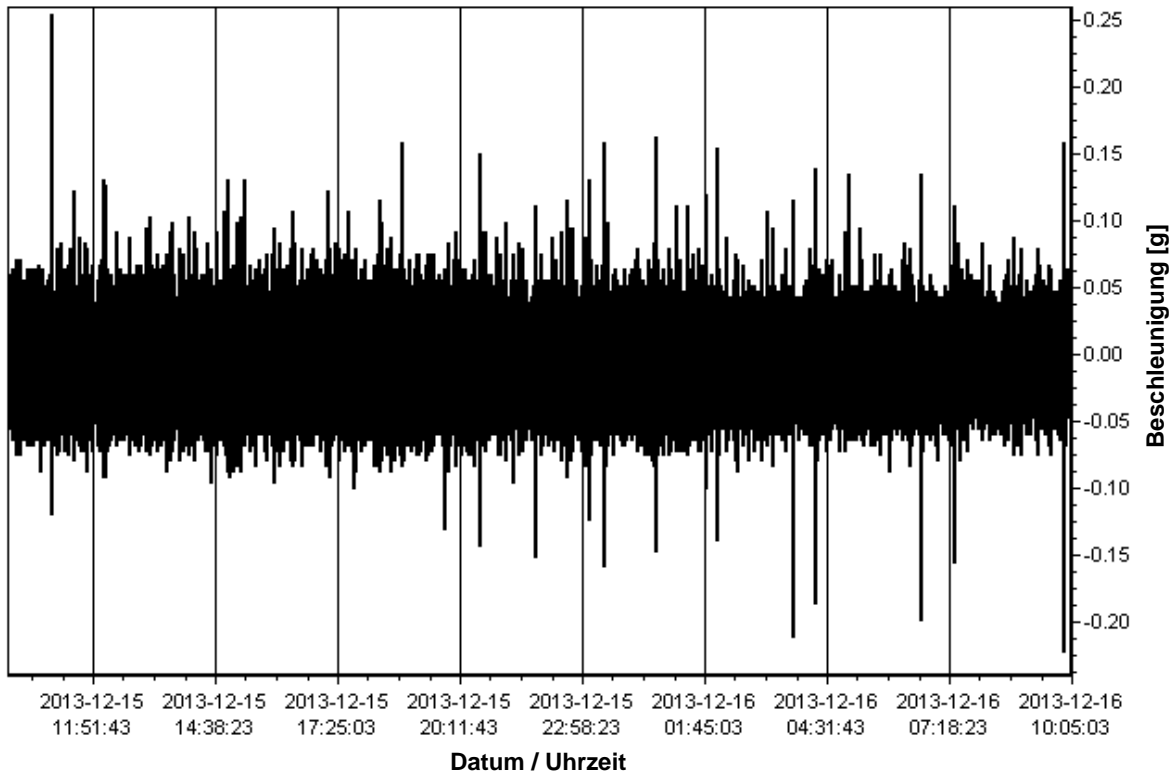
Abbildung 42: Beispielhafter Seetransport – Beschleunigungen über die Längsachse

Für den Betrachtungszeitraum von 24 Stunden galt es bei der gewählten Messfrequenz von 400 Hertz im Hinblick auf den exemplarischen Seetransport insgesamt eine Anzahl von 34,56 Millionen Beschleunigungsmesswerten je betrachteter Achse auszuwerten.

Hinsichtlich der über die Längsachse in Fahrtrichtung gemessenen maximalen negativen bzw. positiven Beschleunigungen ergaben sich hierbei Werte von -0,43 g bzw. 0,34 g und für die Standardabweichung der Beschleunigung wurde ein Wert von 0,05 g berechnet.

Die **Abbildung 43** zeigt die Beschleunigungen, die im Verlaufe des Seetransportes innerhalb der zugrunde gelegten Zeitdauer von 24 Stunden über die Querachse aufgezeichnet wurden, wobei die errechnete Standardabweichung der Beschleunigung bei 0,02 g lag und die erfassten maximalen negativen bzw. positiven Beschleunigungsmesswerte -0,22 g bzw. 0,25 g betragen.

### Seetransport – Beschleunigungen über die Querachse



**Abbildung 43: Beispielhafter Seetransport – Beschleunigungen über die Querachse**

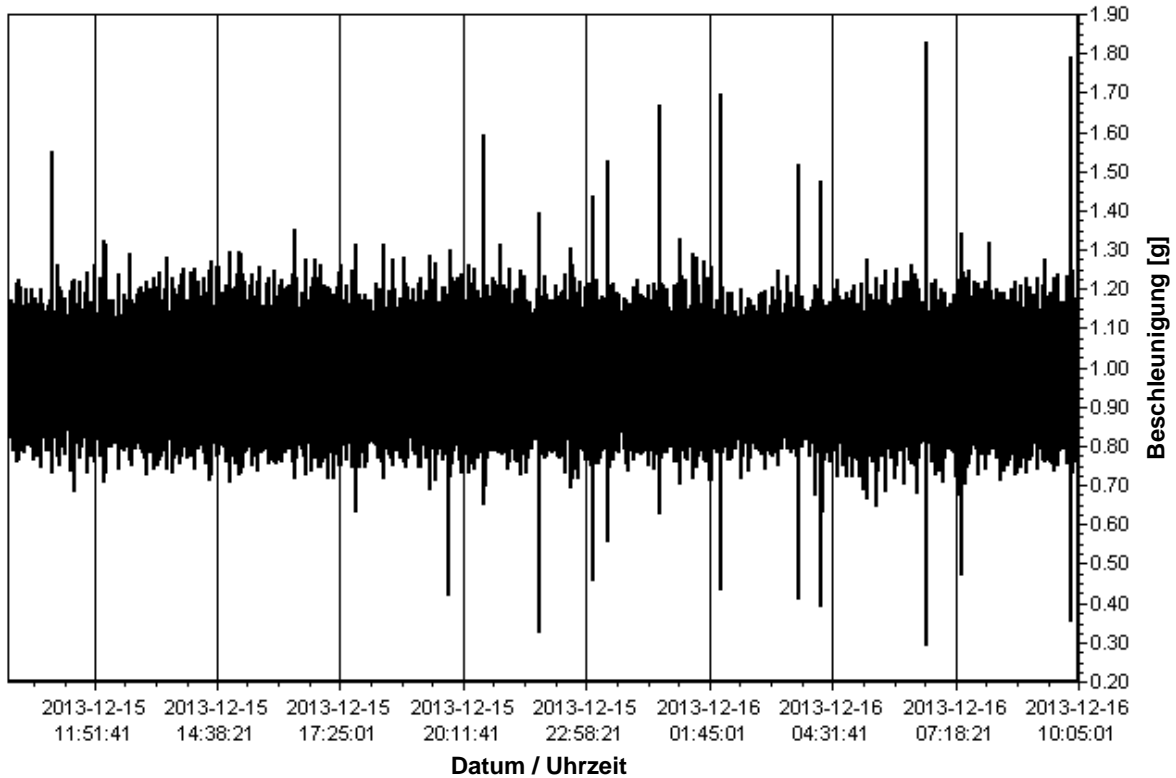
Auch beim Seetransport von Bremerhaven nach Veracruz traten die höchsten Beschleunigungen über die vertikale Schwingachse auf, wobei der Unterschied – insbesondere im Vergleich zur Längsachse in Fahrtrichtung – hier nicht so groß ausfiel wie bei den untersuchten Straßen- und Schienentransporten.

Die bezüglich der vertikalen Schwingachse berechnete Standardabweichung der Beschleunigung lag mit einem Wert von 0,06 g nur um 0,01 g höher als der für die Längsachse ermittelte Wert von 0,05 g. In Bezug auf die maximalen negativen bzw. positiven Beschleunigungen ergaben sich indessen Messwerte von -0,70 g bzw. 0,83 g.

Die im Rahmen des Seetransportes innerhalb des Betrachtungszeitraumes von 24 Stunden über die vertikale Schwingachse gemessenen Beschleunigungen werden in der folgenden **Abbildung 44** noch einmal visualisiert:



**Seetransport – Beschleunigungen über die vertikale Schwingachse**



**Abbildung 44: Beispielhafter Seetransport – Beschleunigungen über die vertikale Schwingachse**

Eine Zusammenfassung in Bezug auf die für den Verkehrsträger Wasser gemessenen maximalen negativen und positiven Beschleunigungen sowie die ermittelten Standardabweichungen der Beschleunigung – unterschieden nach den verschiedenen untersuchten Schwingachsen – gibt die **Tabelle 15**:

**Tabelle 15: Vorhandene Beschleunigungen im Rahmen eines beispielhaften Seetransportes**

		Seetransport von Bremerhaven nach Veracruz
<b>Längs- achse</b>	Maximale negative Beschleunigung	-0,43 g
	Maximale positive Beschleunigung	0,34 g
	Standardabweichung der Beschleunigung	0,05 g
<b>Quer- achse</b>	Maximale negative Beschleunigung	-0,22 g
	Maximale positive Beschleunigung	0,25 g
	Standardabweichung der Beschleunigung	0,02 g
<b>Vertikale Schwing- achse</b>	Maximale negative Beschleunigung	-0,70 g
	Maximale positive Beschleunigung	0,83 g
	Standardabweichung der Beschleunigung	0,06 g

Aus der **Tabelle 15** geht hervor, dass die Intensitäten der Beschleunigungen beim Seetransport im Vergleich zu den Verkehrsträgern Straße und Schiene insgesamt deutlich geringer ausfielen. Vor allem im Hinblick auf die Maximalbelastungen, die im Rahmen der durchgeführten Straßen- bzw. Schienentransporte aufgrund aufgetretener Stöße bei sehr hohen Werten von 7,69 g bzw. 7,37 g lagen, ergab sich ein enormer Unterschied. Schließlich betrug die höchste für den Verkehrsträger Wasser gemessene Beschleunigung lediglich 0,83 g. Die Anforderungen an die Robustheit der eingesetzten Energy-Harvesting-Technologien sind demnach bei einem Seetransport gegenüber den Verkehrsträgern Straße und Schiene als wesentlich geringer einzustufen.

Allerdings ergaben sich bei der Ermittlung der Standardabweichungen der Beschleunigung für den Verkehrsträger Wasser – im Vergleich zu den diesbezüglich aufgezeichneten maximalen Beschleunigungsmesswerten – verhältnismäßig hohe Werte. Diese lagen zwar unter den für die Verkehrsträger Straße und Schiene errechneten Werten, jedoch ist auch im Zusammenhang mit einem Seetransport durchaus Potenzial zur Energieumwandlung mittels eines elektromagnetischen Vibrationsgenerators vorhanden, wobei dieser – ebenso wie bei Straßen- und Schienentransporten – auf die vertikale Schwingachse auszurichten ist.

#### **4.2.2 Umschlagprozesse**

Auch bei der Untersuchung von Umschlagprozessen kam als exemplarische Ladeeinheit der mit dem speziellen Messsystem zur Erfassung von Temperaturgradienten, Beschleunigungen und Beleuchtungsstärken ausgestattete thermoisolierte Rollbehälter zum Einsatz (siehe **Abbildungen 19, 20 und 21**).

Allerdings lag das Ziel hierbei nicht in der Bestimmung der innerhalb von Umschlagprozessen vorhandenen Umgebungsenergien, sondern vielmehr in der Ermittlung der Maximalbelastungen, denen die einzelnen elektronischen Komponenten im Rahmen des Umschlages ausgesetzt sind. Dieses ist dadurch begründet, dass der Umschlagprozess zum einen im Vergleich zu Transport- und Lagerprozessen über eine sehr kurze Zeitdauer verfügt und damit bezüglich der Energiebereitstellung vernachlässigt werden kann und zum anderen sehr hohe Belastungen bzw. Beschleunigungen während des Umschlages von Ladeeinheiten bzw. Transporthilfs-

mitteln zu erwarten sind, die wiederum die Anforderungen an die Robustheit des angestrebten Zustandsüberwachungssystems stark beeinflussen.

Als der elementare Einflussparameter hinsichtlich der beim Umschlag des thermoisolierten Rollbehälters auftretenden maximalen Beschleunigungen wurde im Vorfeld der Untersuchungen der jeweilige Untergrund identifiziert, auf dem der Behälter befördert wird. Diesbezüglich erfolgten für die drei verschiedenen Untergründe eines Betonbodens in einer Lagerhalle, eines gepflasterten Werksgeländes sowie eines asphaltierten Werksgeländes umfangreiche Messreihen, bei denen die Beschleunigungen mittels des Datenloggers „MSR165“ mit der sehr hohen Messfrequenz von 1600 Hertz aufgezeichnet wurden, um hierdurch auch die im Rahmen des Umschlagprozesses zu erwartenden Stöße mit extrem kurzer Zeitdauer erfassen zu können.

Die maximalen negativen und positiven Beschleunigungen, die in diesem Zusammenhang über die Längsachse, die Querachse und die vertikale Schwingachse gemessen wurden, sind in der **Tabelle 16** aufgeführt. Es ist zu erkennen, dass während des Umschlages des thermoisolierten Rollbehälters insbesondere über die vertikale Schwingachse enorme Belastungen von bis zu 14,18 g zu verzeichnen waren, denen die Elektronikkomponenten des geplanten energieautarken multisensorischen RFID-Transponders – z. B. durch die Integration in ein massives Schutzgehäuse – dauerhaft standhalten können müssen.

**Tabelle 16: Maximale Belastungen im Zusammenhang mit Umschlagprozessen**

		Lagerhalle (betoniert)	Werksgelände (gepflastert)	Werksgelände (asphaltiert)
<b>Längs- achse</b>	Maximale negative Beschleunigung	-2,61 g	-5,88 g	-7,24 g
	Maximale positive Beschleunigung	4,39 g	6,30 g	5,74 g
<b>Quer- achse</b>	Maximale negative Beschleunigung	-2,19 g	-5,15 g	-4,37 g
	Maximale positive Beschleunigung	2,68 g	4,83 g	4,94 g
<b>Vertikale Schwing- achse</b>	Maximale negative Beschleunigung	-6,23 g	-9,73 g	-12,73 g
	Maximale positive Beschleunigung	5,98 g	13,89 g	14,18 g

### 4.2.3 Lagerprozesse

In Bezug auf die innerhalb von Lagerprozessen an einer Ladeeinheit verfügbaren Umgebungsenergien galt es ausschließlich, die vorhandenen Temperaturdifferenzen innerhalb und außerhalb des exemplarisch ausgewählten thermoisolierten Rollbehälters sowie die in Form von Lichtstrahlung auftretenden Energiemengen zu untersuchen, da in diesem Zusammenhang nicht mit Beschleunigungen gerechnet werden konnte, die durch einen Vibrationsgenerator genutzt werden können.

Diesbezüglich wurden in einer beispielhaft ausgewählten Lagerhalle drei unterschiedliche Szenarien der Lagerung jeweils für einen Zeitraum von zwei Wochen betrachtet. Im Rahmen der Analyse eines für die Entstehung von Temperaturgradienten und Lichteinstrahlung optimistischen Szenarios, bei dem der Rollbehälter bzw. die an diesem fixierten externen Sensoren des Datenloggers „MSR145“, die der Messung der Temperatur und der Beleuchtungsstärke außerhalb des Rollbehälters dienen (vgl. Kapitel 4.2, S. 54 ff.), so positioniert wurde(n), dass eine direkte Sonneneinstrahlung möglich war, ergab sich über den Betrachtungszeitraum von zwei Wochen der in der folgenden **Abbildung 45** gezeigte Temperaturverlauf:

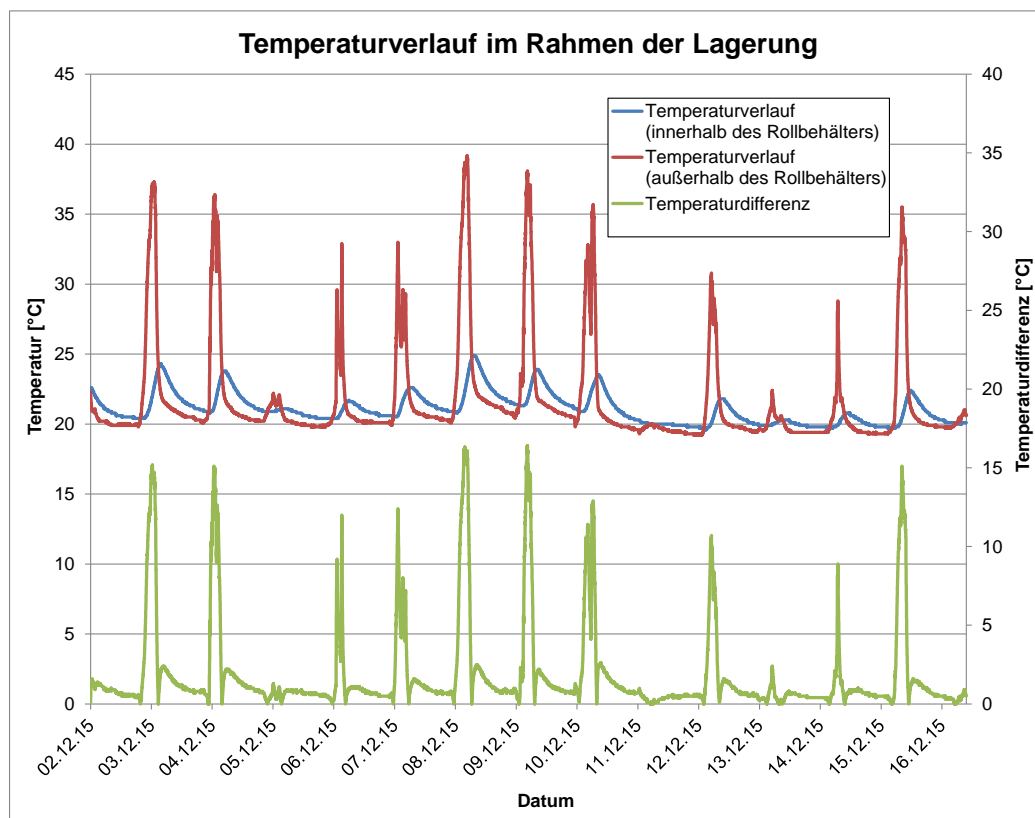


Abbildung 45: Lagerprozess – Temperaturverlauf im Rahmen des optimistischen Szenarios

Die hierbei gemessene maximale Temperaturdifferenz lag mit einem Wert von 16,4 Grad Celsius in einem für die Energieumwandlung mithilfe eines thermoelektrischen Generators vielversprechenden Bereich; jedoch ergab sich im Verlaufe der zweiwöchigen Messreihe lediglich eine durchschnittliche Temperaturdifferenz von 1,85 Grad Celsius.

Hinsichtlich der unterschiedlichen Szenarien der Lichteinstrahlung wurde ein Zeitraum von insgesamt 56 Stunden untersucht, der sich jeweils durch eine 14-tägige Betrachtung der tagsüber in der Zeit von 11 Uhr bis 15 Uhr vorhandenen Beleuchtungsstärken ergab. Für das optimistische Szenario wurden in diesem Zusammenhang eine minimale bzw. maximale Beleuchtungsstärke von 190 Lux bzw. 26574 Lux aufgezeichnet sowie eine durchschnittlich verfügbare Beleuchtungsstärke von 9154 Lux ermittelt, wobei innerhalb des Betrachtungszeitraumes von 56 Stunden in etwa 27 Sonnenstunden zu verzeichnen waren.

In einem weiteren „neutralen“ Szenario wurde der thermoisolierte Rollbehälter derartig in der Lagerhalle positioniert, dass nur im Ausnahmefall, d. h. bei einem bestimmten Einfallswinkel der Lichtphotonen, eine direkte Sonneneinstrahlung möglich war. Die diesbezüglich durchgeführte Untersuchung in Bezug auf die tagsüber verfügbaren Beleuchtungsstärken umfasste erneut einen Zeitraum von 56 Stunden, wobei insgesamt ca. 23 Sonnenstunden auftraten. Der Minimalwert, der hierbei für die Beleuchtungsstärke erfasst wurde, lag bei 6 Lux und der Maximalwert bei 20055 Lux. Die Berechnung der durchschnittlichen Beleuchtungsstärke ergab wiederum einen Wert von 619 Lux.

Der Temperaturverlauf sowie die Temperaturdifferenzen, die sich im Rahmen des neutralen Szenarios über den analysierten Zeitraum von zwei Wochen innerhalb und außerhalb des exemplarisch betrachteten Transporthilfsmittels ergaben, sind in der **Abbildung 46** dargestellt. Die maximale Temperaturdifferenz betrug in diesem Zusammenhang 5,3 Grad Celsius, wobei im Hinblick auf den durchschnittlich nutzbaren Temperaturgradienten lediglich ein Wert von 0,58 Grad Celsius errechnet werden konnte.

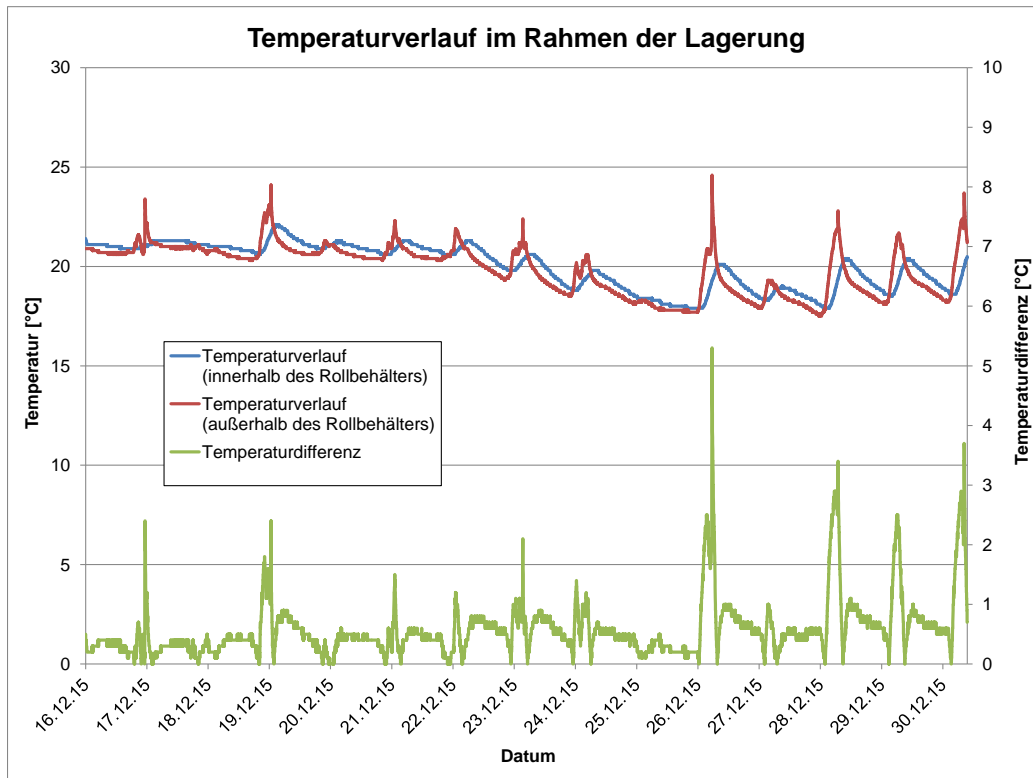


Abbildung 46: Lagerprozess – Temperaturverlauf im Rahmen des neutralen Szenarios

Innerhalb des dritten „pessimistischen“ Szenarios wurde der ungünstigste Fall hinsichtlich der Energieumwandlung mittels einer Solarzelle berücksichtigt, indem der Rollbehälter in einer Ecke der Lagerhalle ohne jegliche Möglichkeit der direkten Lichteinstrahlung positioniert wurde. Tagsüber ergaben sich hierbei über den Betrachtungszeitraum von 56 Stunden – bei einer Anzahl von insgesamt in etwa 15 Sonnenstunden – eine minimale Beleuchtungsstärke von 0 Lux und eine maximale Beleuchtungsstärke von 1199 Lux. Die durchschnittlich verfügbare Beleuchtungsstärke lag indessen bei 53 Lux.

Die **Abbildung 47** beinhaltet den Temperaturverlauf und die Temperaturdifferenzen, die – bezogen auf das pessimistische Szenario – über den untersuchten Zeitraum von zwei Wochen innerhalb und außerhalb der beispielhaft betrachteten Ladeinheit aufgezeichnet wurden, wobei die maximale Temperaturdifferenz 2,0 Grad Celsius und der durchschnittlich vorhandene Temperaturgradient 0,31 Grad Celsius betragen.

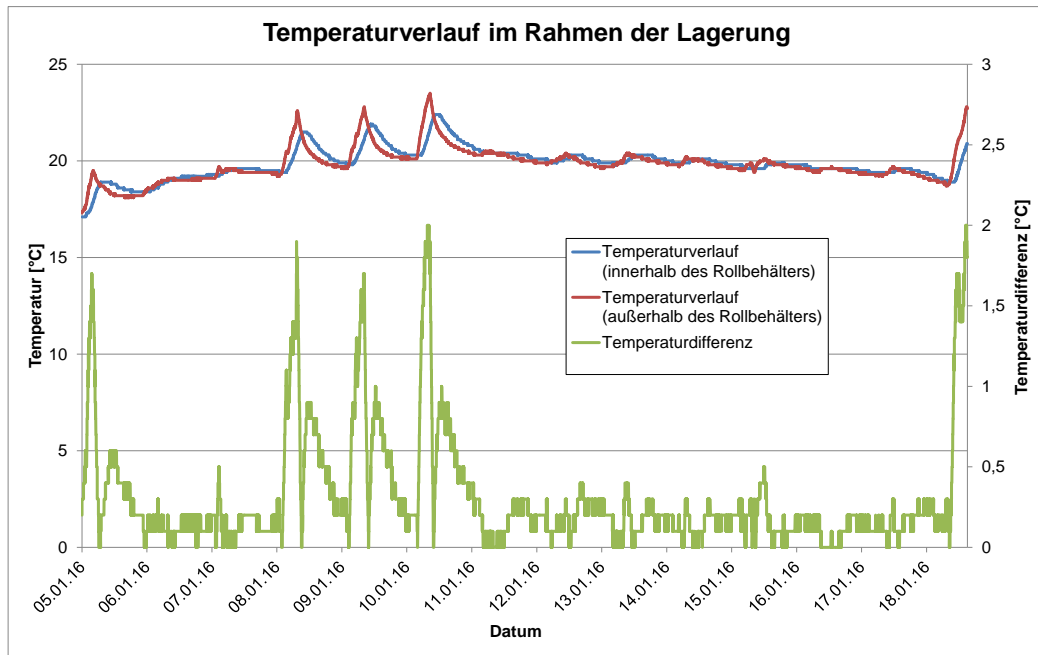


Abbildung 47: Lagerprozess – Temperaturverlauf im Rahmen des pessimistischen Szenarios

In der folgenden **Tabelle 17** sind die Ergebnisse der Praxismessungen bezüglich der im Zusammenhang mit Lagerprozessen auftretenden Temperaturdifferenzen und Beleuchtungsstärken noch einmal komprimiert zusammengefasst:

Tabelle 17: Verfügbare Umgebungsenergien im Rahmen der Lagerung

Umgebungsgröße	Optimistisches Szenario	Neutrales Szenario	Pessimistisches Szenario
Maximale Temperaturdifferenz [°C]	16,4	5,3	2,0
Durchschnittliche Temperaturdifferenz [°C]	1,85	0,58	0,31
Minimale Beleuchtungsstärke [Lux]	190	6	0
Maximale Beleuchtungsstärke [Lux]	26574	20055	1199
Durchschnittliche Beleuchtungsstärke [Lux]	9154	619	53

Aus den in der **Tabelle 17** aufgeführten Werten lässt sich ableiten, dass der Einsatz eines thermoelektrischen Generators im Rahmen von Lagerprozessen aufgrund der geringen durchschnittlich verfügbaren Temperaturdifferenzen innerhalb und außerhalb eines Transporthilfsmittels wenig erfolgsversprechend ist. Vielmehr sollte eine

Photovoltaikzelle Verwendung finden, da sich bei der Untersuchung der drei unterschiedlichen Szenarien der Lagerung ergab, dass hierbei durchaus hohe Beleuchtungsstärken zur Verfügung stehen, die zur Energieumwandlung herangezogen werden können.

### **4.3 Praxismessungen – Wesentliche Erkenntnisse**

Auf Grundlage der Ergebnisse der Praxismessungen ließ sich unter anderem ableiten, dass im Rahmen von Transportprozessen – sowohl in Sattelaufliegern als auch in Wechselbrücken und ISO-Containern – keinerlei Lichtstrahlung zur Verfügung steht. Des Weiteren waren die Temperaturdifferenzen, die zwischen dem Innenraum und der Außenwand des thermoisolierten Rollbehälters auftraten, als relativ gering einzustufen, sodass die Schlussfolgerung gezogen werden kann, dass der Einsatz von Solarzellen zur Energieumwandlung im Verlaufe von Transportprozessen – bezogen auf die Anwendung an einer sich innerhalb eines Laderaumes befindlichen Ladeinheit – ungeeignet ist und die Verwendung thermoelektrischer Generatoren nur für spezielle Anwendungsfälle (z. B. während eines temperaturgeführten Transportes) in Frage kommt. ([Sie14a], S. 43)

Da im Zusammenhang mit den bezüglich der Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasser durchgeführten Praxismessungen signifikante Beschleunigungsmesswerte aufgezeichnet wurden, kann festgehalten werden, dass die Energy-Harvesting-Technologie des Vibrationsgenerators bei Transportprozessen im Allgemeinen am besten zur Energieumwandlung geeignet ist. Darüber hinaus konnte aus den Ergebnissen der Praxismessungen heraus die Erkenntnis gewonnen werden, dass ein innerhalb von logistischen Prozessen eingesetzter Vibrationsgenerator auf die vertikale Schwingachse auszurichten ist, da über diese insgesamt die höchsten Beschleunigungsmesswerte aufgezeichnet wurden. ([Sie14a], S. 43)

Im Hinblick auf den Lagerprozess wurde die Lichtstrahlung als die am besten geeignete Energiequelle identifiziert. Tagsüber wurden hierbei – unter der Berücksichtigung unterschiedlicher klimatischer Bedingungen und Einflussparameter in Bezug auf den Lichteinfall an einer Ladeinheit – in einer exemplarisch betrachteten Lagerhalle signifikante Beleuchtungsstärken gemessen, die zum Beispiel im Rahmen eines optimistisch gewählten Szenarios, bei dem eine direkte Sonneneinstrahlung



möglich war, maximal bis zu 26574 Lux betragen und im Durchschnitt bei 9154 Lux lagen (vgl. Kapitel 4.2.3, S. 84 f.). Sogar bei reiner Nachtbeleuchtung waren zum Teil noch Beleuchtungsstärken von über 200 Lux vorhanden (siehe **Abbildung 23** auf der Seite 59), die als Energiequelle während der Lagerung von Transporthilfsmitteln genutzt werden können.

Für die Energieumwandlung im Zusammenhang mit TUL-Prozessen verfügen demnach die Energy-Harvesting-Technologien des Vibrationsgenerators und der Solarzelle über die beste Eignung und sind in Kombination einzusetzen, um einen multisensorischen RFID-Transponder mit der u. a. für den Mikrocontroller und die Sensorik benötigten elektrischen Energie zu versorgen ([Sie14a], S. 43).

Zudem ergab sich bei der Durchführung der Praxismessungen, dass die zu verwendenden Energy-Harvesting-Module dem Anspruch einer hohen Robustheit bzw. Dauerfestigkeit gerecht werden müssen, da insbesondere im Verlauf der analysierten Umschlagprozesse sehr hohe Maximalbelastungen von bis zu 14,18 g zu verzeichnen waren.

## **5 Entwicklung eines energieautarken multisensorischen RFID-Transponders als Funktionsmuster**

Innerhalb des fünften Kapitels gilt es als erstes, eine ausführliche Marktrecherche in Bezug auf geeignete Hardwarekomponenten zur Entwicklung eines Funktionsmusters des angestrebten energieautarken multisensorischen RFID-Transponders durchzuführen. Hierbei dienen die Ergebnisse der im Rahmen des vierten Kapitels vollzogenen Praxismessungen als wesentliche Grundlage.

Die als passend identifizierte Hardware ist anschließend – entsprechend des speziellen Anwendungsfalls der qualitativen Überwachung logistischer Prozesse – weiterzuentwickeln und zu einem funktionsfähigen Gesamtsystem zusammenzuführen.

Zur Verifizierung der Funktionsfähigkeit des zu entwickelnden energieautarken Zustandsüberwachungssystems gilt es darüber hinaus, eine Software bzw. Smartphone-Applikation auf einem entsprechenden Schreib-Lesegerät bzw. Smartphone bereitzustellen, mittels derer der Sensortransponder beschrieben und ausgelesen werden kann.

### **5.1 Auswahl geeigneter Hardwarekomponenten**

Die einzelnen Hardwarekomponenten, die es zunächst für die Entwicklung des geplanten energieautarken RFID-Sensortransponders zu beschaffen galt, waren ein Energiemanagement-Modul, welches die Anbindung mehrerer Energy-Harvesting-Quellen gleichzeitig ermöglicht, die im Zusammenhang mit den Praxismessungen als am besten zur Energieumwandlung innerhalb von TUL-Prozessen identifizierte Energy-Harvesting-Module des elektromagnetischen Vibrationsgenerators und der Solarzelle sowie ein multisensorischer RFID-Transponder, der über eine NFC-kompatible HF-Luftschnittstelle verfügt.

Die Ergebnisse der diesbezüglich durchgeführten Marktrecherche sowie der für die Auswahl eines passenden Vibrationsgenerators erforderlichen Spektralanalyse auf Basis der im Zuge der Praxisuntersuchungen erhobenen Beschleunigungsmesswerte werden in den nachfolgenden Kapiteln 5.1.1 bis 5.1.4 dargelegt.

### 5.1.1 Energiemanagement-Modul

Das Energiemanagement, welches von elementarer Bedeutung für die effiziente Nutzung der innerhalb von TUL-Prozessen vorhandenen Umgebungsenergien ist, stellte bei der Entwicklung des energieautarken multisensorischen RFID-Transponders einen zentralen Bestandteil dar (vgl. Kapitel 3.2, S. 40).

Da im Zusammenhang mit den im Kapitel 4 beschriebenen Praxismessungen festgestellt werden konnte, dass sowohl Licht- als auch Vibrationsenergie erforderlich ist, um eine durchgängige Energieversorgung eines Sensortransponders zu ermöglichen, ließ sich als entscheidender Parameter im Hinblick auf die Auswahl einer passenden Energiemanagement-Lösung ableiten, dass die Möglichkeit bestehen muss, mehrere Energy-Harvesting-Technologien gleichzeitig an das zu wählende Modul anschließen zu können.

Im Rahmen der diesbezüglich durchgeführten Marktrecherche wurde das in der **Abbildung 48** ausschnittsweise dargestellte Energiemanagement-Modul „DC2080A“ der Linear Technology Corporation, welches unter anderem über unabhängige Schaltkreise zur Anbindung von Vibrationsgeneratoren, Solarzellen und thermoelektrischen Generatoren verfügt (vgl. [Lin13]), als für den speziellen Anwendungsfall geeignet identifiziert und exemplarisch ausgewählt<sup>19</sup>.

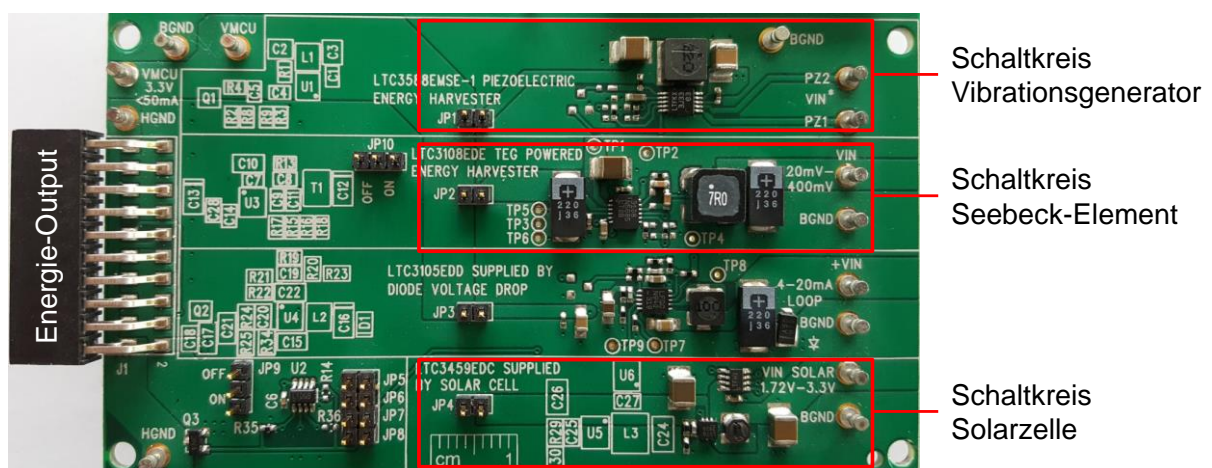


Abbildung 48: Unabhängige Schaltkreise des Energiemanagement-Moduls „DC2080A“

<sup>19</sup> Weitere auf dem Markt vorhandene Energiemanagement-Module zur Anbindung mehrerer Energy-Harvesting-Quellen sind bspw. die Lösung „CBC-EVAL-09“ der Cymbet Corporation oder das Modul „EH301A“ der Advanced Linear Devices Inc. (vgl. [BO15], S. 168).

Der unabhängige Schaltkreis, der oben in der **Abbildung 48** gezeigt wird und beispielsweise zur Anbindung eines elektromagnetischen Vibrationsgenerators genutzt werden kann, beinhaltet die integrierte Schaltung „LTC3588-1“, welche u. a. über die folgenden elementaren Funktionen verfügt:

- Betrieb bei eingehenden Wechselspannungen in einem Bereich von 2,7 Volt bis zu 20 Volt
- Wählbare ausgehende Gleichspannungen von 1,8 Volt, 2,5 Volt, 3,3 Volt oder 3,6 Volt
- Integrierter hocheffizienter Abwärtswandler (vgl. [Lin17a])

Der in der Mitte der **Abbildung 48** zu sehende unabhängige Schaltkreis des Energiemanagement-Moduls „DC2080A“, der für die Anbindung von Gleichspannungsquellen wie zum Beispiel einem thermoelektrischen Generator oder einer Solarzelle vorgesehen ist, umfasst indessen die integrierte Schaltung „LTC3108“, welche die im Folgenden aufgeführten wesentlichen Eigenschaften aufweist:

- Betrieb bereits ab Eingangsspannungen von 20 Millivolt
- Wählbare Ausgangsspannungen von 2,35 Volt, 3,3 Volt, 4,1 Volt oder 5 Volt
- Nutzung kompakter Aufwärtswandler (vgl. [Lin17b])

Besondere Merkmale der integrierten Schaltung „LTC3459“, die Teil des unabhängigen Schaltkreises zur Anbindung von Solarzellen ist (dieser ist unten in der **Abbildung 48** dargestellt), sind unter anderem:

- Betrieb bei eingehenden Gleichspannungen zwischen 1,5 Volt und 5,5 Volt
- Programmierbare Ausgangsspannung im Bereich von 2,5 Volt bis 10 Volt
- Integrierter hocheffizienter Aufwärtswandler (vgl. [Lin17c])

Zudem verfügt das Energiemanagement-Modul „DC2080A“ für Zeiträume einer hohen Energiebereitstellung durch die potenziellen Energy-Harvesting-Quellen über einen Energiespeicher, der aus insgesamt 15 Elektrolytkondensatoren besteht, die jeweils eine elektrische Kapazität von 100 Mikrofarad aufweisen (vgl. [Lin13], S. 8).

### 5.1.2 Elektromagnetischer Vibrationsgenerator

Ein entscheidender Faktor bei der Optimierung von Vibrationsgeneratoren ist die Kenntnis in Bezug auf die in verschiedenen Frequenzbereichen auftretenden Amplituden der Beschleunigung, da Analysen gezeigt haben, dass am meisten mechanische in elektrische Energie umgewandelt werden kann, wenn die Eigenfrequenz eines Generators auf eine der Frequenzen mit hoher Schwingungsamplitude abgestimmt wird ([Sch10c], S. 17).

Diesbezüglich wurde auf Basis der im Rahmen der Praxistests aufgezeichneten Beschleunigungsmesswerte in Anlehnung an die Norm DIN EN 15433-4 mittels einer Fast-Fourier-Transformation (FFT)<sup>20</sup> eine Spektralanalyse durchgeführt. Als Ergebnis einer Fast-Fourier-Analyse lassen sich die Amplituden der Beschleunigung über der Frequenz in Hertz in Form des sogenannten Linienspektrums abbilden und damit Aussagen darüber erzielen, in welchem Frequenzbereich die höchsten Schwingungsamplituden zu erwarten sind (vgl. [DIN08b], S. 17 ff.).

Die endliche Fourier-Transformierte eines gemessenen Signals  $x(t)$ ;  $0 \leq t \leq T$  wird hierbei wie folgt definiert:

$$X(f) = \int_0^T x(t)e^{-j2\pi ft} dt = \int_0^T x(t) \cos 2\pi ft dt - j \int_0^T x(t) \sin 2\pi ft dt$$

**Formel 6: Endliche Fourier-Transformierte eines gemessenen Signals ([DIN08b], S. 18)**

Die Funktion  $X(f)$  ist im Allgemeinen eine komplexe Zahl und beinhaltet dabei sowohl die positiven als auch die theoretisch negativen Frequenzen in Hertz, wobei der reale Teil der DFT als Kosinus-Transformierte und der imaginäre Teil als Sinus-Transformierte bezeichnet wird ([DIN08], S. 18).

Für digitale Berechnungen, bei denen  $x(t) = x(n\Delta t)$  und  $\Delta f = 1/T = 1/(N\Delta T)$  gilt, ergibt sich nach der DIN EN 15433-4 wiederum die im Folgenden aufgeführte endliche Fourier-Transformierte:

---

<sup>20</sup> Bei einer Familie von Berechnungsalgorithmen, die allgemein als FFT-Algorithmen bezeichnet werden, kann die diskrete Fourier-Transformation (DFT) sehr effektiv, d. h. mit einer geringeren Anzahl an Rechenoperationen sowie einem reduzierten Bedarf an Speicherplätzen, berechnet werden (vgl. [DIN08b], S. 18; [Wer12], S. 40).

$$X(k\Delta f) = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} x(n\Delta t) \exp \left[ -j2\pi k \frac{n}{N} \right]; k, n = 0, 1, \dots, N - 1$$

**Formel 7: Endliche Fourier-Transformierte für digitale Berechnungen ([DIN08b], S. 18)**

Der bei dynamischen Datenauswertungen am häufigsten zum Einsatz kommende FFT-Algorithmus setzt voraus, dass die Anzahl der auszuwertenden Datenwerte eine ganzzahlige Potenz von zwei, das heißt  $N = 2^P$ , ist. Die mittels einer einzigen FFT-Berechnung bearbeitete Sequenz von Datenwerten wird als Datenblock bezeichnet, wobei  $N$  die Blockgröße und  $T = N\Delta t$  die Blockdauer darstellt. ([DIN08], S. 18)

Die FFT-Funktion der für die Spektralanalyse verwendeten Software Microsoft Excel ist hierbei bspw. in der Lage, einen Datenblock der Größe  $2^{12}$ , d. h. 4096 Datenwerte, in einer Sequenz zu berechnen. Bei der im Rahmen der Praxismessungen bezüglich des Verkehrsträgers Straße gewählten Messfrequenz von 800 Hertz (vgl. Kapitel 4.2.1.1, S. 59), aus der sich im Zusammenhang mit der FFT für die Variable  $\Delta t$  ein Wert von 0,00125 Sekunden ergab, war demnach bei der diesbezüglich durchzuführenden Spektralanalyse eine Blockdauer  $T$  von 5,12 Sekunden zugrunde zu legen.

Bei der Spektralanalyse hinsichtlich der innerhalb von Straßentransporten in verschiedenen Frequenzbereichen vorhandenen Amplituden der Beschleunigung wurden sowohl die im Rahmen der Messfahrt von Osnabrück nach Genk als auch die auf der Rückfahrt von Genk nach Osnabrück über den relevanten Betrachtungszeitraum von insgesamt sechs Stunden erfassten Beschleunigungsmesswerte berücksichtigt (vgl. Kapitel 4.2.1.1, S. 59 ff.), was bei der ermittelten Blockdauer von 5,12 Sekunden einer Anzahl von 4218 auszuführenden einzelnen FFT-Berechnungen entsprach<sup>21</sup>.

Bei einer mittels der **Formel 7** durchgeführten FFT-Berechnung ergeben sich hierbei für einen Datenblock mit 4096 Datenwerten  $x(n\Delta t)$ ;  $n = 1, 2, \dots, 4096 - 1$ , insgesamt 4096 diskrete Frequenzwerte  $X(k\Delta f)$ ;  $k = 0, 1, \dots, 4096 - 1$ , wobei sich für die Variable

---

<sup>21</sup> Aufgrund der großen Datenmengen sowie der bei der Software Microsoft Excel beschränkten Anzahl von ca. 1 Millionen verfügbarer Zeilen pro Tabellenblatt war es an dieser Stelle zunächst nötig, die Beschleunigungsmesswerte mittels der Datenbank-Software Microsoft Access entsprechend zu strukturieren und anschließend in Excel zu importieren. Des Weiteren wurde in Excel ein Makro programmiert, mit dessen Hilfe die verschiedenen Schritte zur Durchführung einer einzelnen FFT-Berechnung automatisch für die gesamten aus Access importierten Daten sequenziell ausgeführt werden konnten.

$\Delta f$  bei einer Blockdauer von 5,12 Sekunden durch den oben bereits aufgezeigten Zusammenhang  $\Delta f = 1/T = 1/(N\Delta t)$  ein Wert von rund 0,195 Hertz berechnen lässt. Allerdings beinhalten in diesem Zusammenhang lediglich die ersten 2049 Frequenzwerte einer Sequenz eindeutige Informationen, da die letzten 2047 Frequenzwerte den theoretisch negativen Frequenzen entsprechen, die innerhalb eines Spektrums nicht dargestellt werden. (vgl. [DIN08b], S. 18 ff.)

Für digitale Berechnungen lässt sich ein Spektrum wie folgt bestimmen:

$$P_x(k\Delta f) = \frac{2}{N\Delta t} |X(k\Delta f)| ; k = 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1$$

$$= \frac{1}{N\Delta t} |X(k\Delta f)| ; k = 0, \frac{N}{2}$$

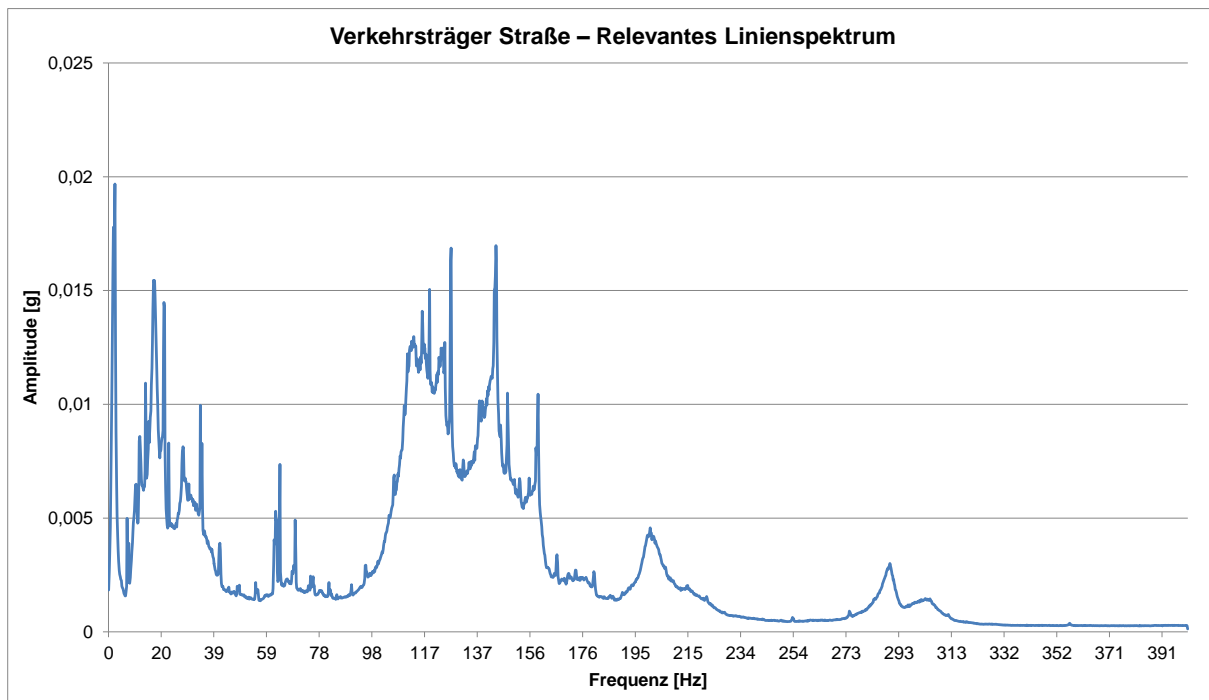
**Formel 8: Bestimmung eines Spektrums im Rahmen digitaler Berechnungen ([DIN08b], S. 21)**

Dabei stellt  $|X(k\Delta f)|$  die Amplitude der in den **Formeln 6 und 7** definierten Fourier-Transformation dar. Der Faktor 2 für  $k = 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1$  ist indessen erforderlich, um die theoretisch negativen Frequenzwerte zu berücksichtigen. Die grafische Darstellung von  $P_x(k\Delta f)$  über der Frequenz in Hertz mit der Amplitudeneinheit g wird als Linienspektrum bezeichnet. (vgl. [DIN08b], S. 21)

Da bei den Praxismessungen insgesamt die höchsten Beschleunigungsmesswerte über die vertikale Schwingachse in z-Richtung auftraten und ein im Zusammenhang mit TUL-Prozessen eingesetzter Vibrationsgenerator dementsprechend auszurichten ist, wurden im Rahmen der Fast-Fourier-Analyse die für die einzelnen Verkehrsträger über die vertikale Schwingachse aufgezeichneten Beschleunigungsmesswerte herangezogen und ausgewertet. Das Ergebnis der Spektralanalyse für den Verkehrsträger Straße wird in der **Abbildung 49** in Form des hierfür ermittelten Linienspektrums visualisiert<sup>22</sup>, wobei deutlich zu erkennen ist, dass die höchsten Amplituden der Beschleunigung in den Frequenzbereichen von in etwa 2 Hertz bis 34 Hertz und 112 Hertz bis 159 Hertz lagen. Die Eigenfrequenz eines zur Energieumwandlung innerhalb von Straßentransporten eingesetzten Vibrationsgenerators ist also dementsprechend auszuwählen. ([Sie14a], S. 45 f.)

---

<sup>22</sup> Aufgrund der bei den Straßentransporten gewählten Messfrequenz von 800 Hertz ergibt sich hierbei durch den in der **Formel 8** aufgezeigten Zusammenhang ein darstellbares Spektrum im Frequenzbereich von 0 Hertz bis 400 Hertz.

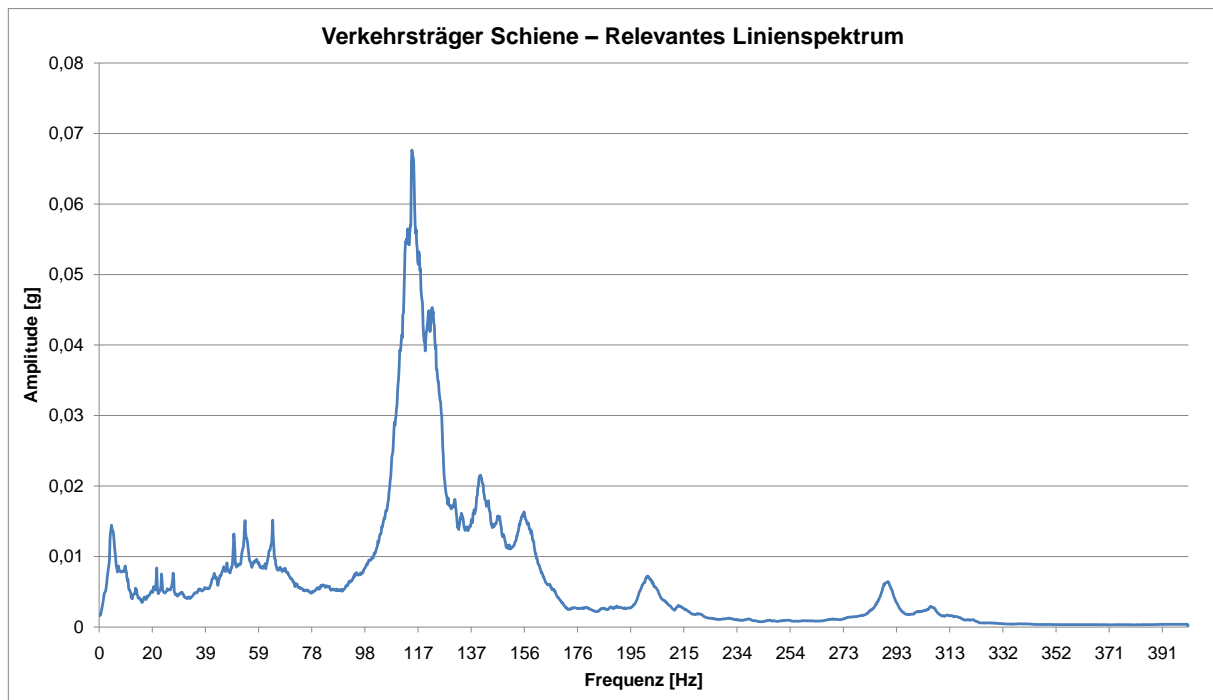


**Abbildung 49: Ermittelt Linienspektrum für beispielhafte Straßentransporte im Frequenzbereich von 0 Hertz bis 400 Hertz ([Sie14a], S. 45)**

Da für den Verkehrsträger Schiene in Bezug auf die Beschleunigungsmessungen dieselben Rahmenbedingungen wie bei den durchgeführten Straßentransporten gewählt wurden (vgl. Kapitel 4.2.1.2, S. 71), konnte die diesbezügliche Spektralanalyse in Analogie zu der oben beschriebenen Vorgehensweise für den Verkehrsträger Straße erfolgen.

Das Linienspektrum, das in diesem Zusammenhang im Hinblick auf den exemplarischen Schienentransport von Osnabrück nach Regensburg für den Frequenzbereich von 0 Hertz bis 400 Hertz ermittelt wurde, zeigt die **Abbildung 50**, aus der hervorgeht, dass die höchsten Amplituden der Beschleunigung im Frequenzbereich von in etwa 104 Hertz bis 156 Hertz vorhanden waren. Darüber hinaus sind auch im Frequenzbereich von ca. 4 Hertz bis 63 Hertz signifikante Beschleunigungsamplituden zu erwarten. Die Eigenfrequenz eines Vibrationsgenerators, der zur Bereitstellung elektrischer Energie im Zusammenhang mit einem Schienentransport verwendet wird, ist demnach auf einen dieser Frequenzbereiche abzustimmen. ([Sie14a], S. 46)





**Abbildung 50:** Ermitteltes Linienspektrum für einen beispielhaften Schienentransport im Frequenzbereich von 0 Hertz bis 400 Hertz ([Sie14a], S. 46)

Durch die beim Seetransport von Bremerhaven nach Veracruz eingestellte niedrigere Messfrequenz von 400 Hertz (vgl. Kapitel 4.2.1.3, S. 78) waren bei der Durchführung der Spektralanalyse für den Verkehrsträger Wasser gegenüber den Verkehrsträgern Straße und Schiene unterschiedliche Voraussetzungen zu beachten, sodass sich beispielsweise eine längere Blockdauer  $T$  von 10,24 Sekunden sowie für die Abstände der diskreten Frequenzwerte auf der horizontalen Koordinatenachse bzw. die Variable  $\Delta f$  ein geringerer Wert von rund 0,098 Hertz ergaben und die Darstellung des in der **Abbildung 51** gezeigten Linienspektrums aus diesem Grund einen kleineren Frequenzbereich von 0 Hertz bis 200 Hertz umfasste.

Bei Betrachtung der **Abbildung 51** wird deutlich, dass die höchsten Beschleunigungsamplituden im Rahmen des Seetransportes mit sehr geringen Frequenzen auftraten. Zur Verdeutlichung des Ergebnisses der Spektralanalyse für den Verkehrsträger Wasser ist das Linienspektrum in der **Abbildung 52** in Form eines Säulendiagramms noch einmal ausschnittsweise für den Frequenzbereich von 0 Hertz bis 2,148 Hertz dargestellt. ([Sie14a], S. 46 f.)

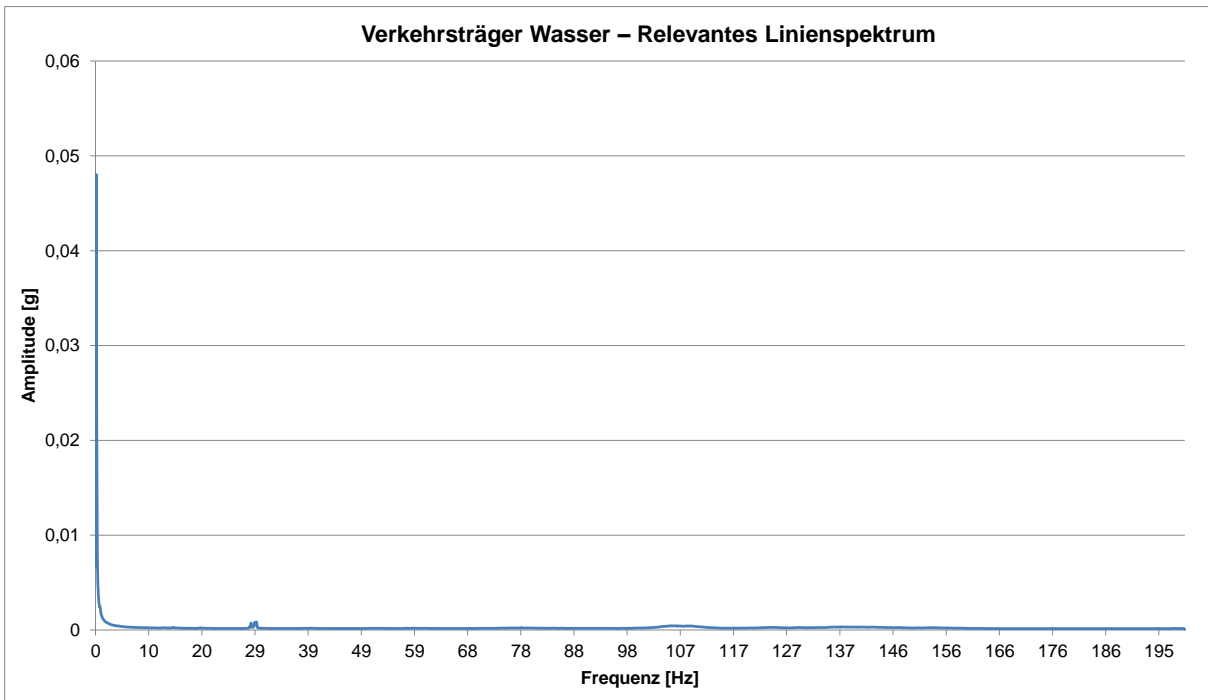


Abbildung 51: Ermitteltes Linienspektrum für einen beispielhaften Seetransport im Frequenzbereich von 0 Hertz bis 200 Hertz ([Sie14a], S. 47)

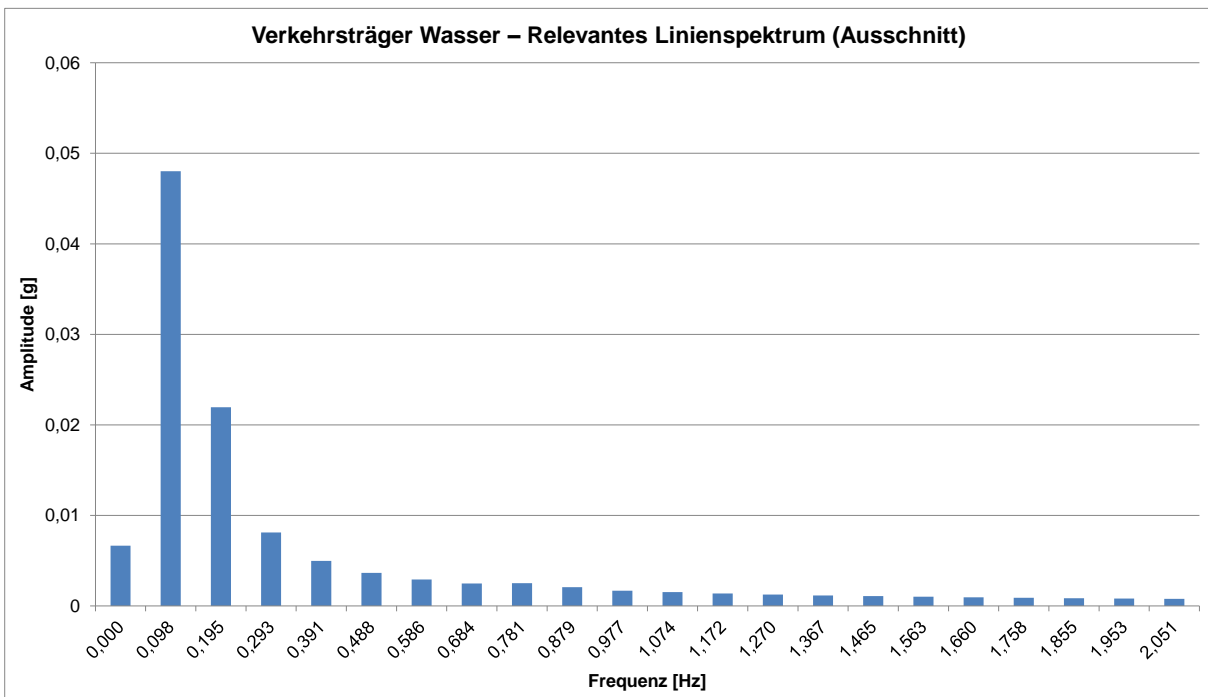


Abbildung 52: Ermitteltes Linienspektrum für einen beispielhaften Seetransport im Frequenzbereich von 0 Hertz bis 2,148 Hertz ([Sie14a], S. 47)

Aus der **Abbildung 52** heraus lässt sich der relevante Frequenzbereich für einen im Rahmen eines Seetransportes zum Einsatz kommenden Vibrationsgenerator ablei-

ten, der bei ca. 0,1 Hertz bis 0,3 Hertz liegt und damit im Vergleich zu den Verkehrsträgern Straße und Schiene deutlich niedriger ausfällt. ([Sie14a], S. 48)

Die wesentlichen Ergebnisse der Spektralanalyse sind in der **Tabelle 18** noch einmal zusammenfassend aufgeführt. Hierbei wurde zudem das jeweilige Potenzial der verschiedenen betrachteten Verkehrsträger zur Energieumwandlung mittels eines Vibrationsgenerators – unterschieden nach den jeweils relevanten Frequenzbereichen – eingeschätzt. Ausschlaggebend für die Einordnung des Potenzials zur Energieumwandlung als „hoch“, „mittel“ oder „gering“ waren in diesem Zusammenhang die jeweils zu erwartenden Amplituden der Beschleunigung, die wiederum aus den **Abbildungen 49 bis 52** hervorgehen. ([Sie14a], S. 48)

**Tabelle 18: Relevante Frequenzbereiche zur Energieumwandlung mittels eines an einem Transporthilfsmittel applizierten Vibrationsgenerators bei Straßen-, Schienen- und Seetransporten (i. A. a. [Sie14a], S. 48)**

Verkehrsträger	Relevanter Frequenzbereich [Hz]	Potenzial zur Energieumwandlung
Straße	2 bis 34	Mittel
	112 bis 159	Mittel
Schiene	4 bis 63	Gering bis mittel
	104 bis 156	Hoch
Wasser	0,1 bis 0,3	Hoch <sup>23</sup>

Auf Grundlage der zuvor dargestellten Ergebnisse der Spektralanalyse wurde im Rahmen einer umfangreichen Marktrecherche ein für die Entwicklung eines energieautarken multisensorischen RFID-Transponders zur qualitativen Überwachung von TUL-Prozessen geeigneter elektromagnetischer Vibrationsgenerator identifiziert und beschafft. Elementare Faktoren, die es hierbei zu beachten galt, waren die im Zusammenhang mit der Spektralanalyse ermittelten relevanten Frequenzbereiche für die Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasser sowie die Baugröße und der Preis des Generators. ([Sie14a], S. 48 f.)

Insgesamt stellte die Beschaffung eines für den Einsatz innerhalb logistischer Prozesse geeigneten Vibrationsgenerators eine große Herausforderung dar, da aktuell keine Generatoren auf dem Markt verfügbar sind, die explizit für diesen speziellen

<sup>23</sup> Es ist darauf hinzuweisen, dass sich das als „hoch“ eingeordnete Potenzial zur Energieumwandlung bei Seetransporten auf den sehr kleinen Frequenzbereich von 0,1 Hertz bis 0,3 Hertz beschränkt.

Anwendungsfall konstruiert wurden. Vielmehr zielen die Entwicklungen in diesem Bereich häufig auf die Energieumwandlung im industriellen Umfeld bzw. die Applikation an Maschinen ab (vgl. [Lan14b], S. 14).

Zwar bietet die Perpetuum Ltd. aus Großbritannien, bei der es sich weltweit um einen der Marktführer im Bereich der Entwicklung elektromagnetischer Vibrationsgeneratoren handelt<sup>24</sup>, einen Generator zur Energieumwandlung im Rahmen von Schienentransporten an; jedoch ist dieser auf die Applikation am Drehgestell eines Güterwaggon und nicht auf die Applikation an einer Ladeeinheit ausgerichtet, was wiederum für die in dieser Arbeit angestrebte Zustandsüberwachung auf Ladeeinheitenebene erforderlich wäre (vgl. [Per17]). Zudem ist die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes dieses Generators auf der Ebene der Ladeeinheit aufgrund des sehr hohen Nettopreises von umgerechnet ca. 630 Euro<sup>25</sup> nicht gegeben, und auch die verhältnismäßig große Bauweise mit einem Durchmesser von 8,7 Zentimetern und einer Höhe von 6,5 Zentimetern ist aus dem Blickwinkel des Praxiseinsatzes bedenklich, da hierdurch die Durchführung von TUL-Prozessen gestört werden könnte. Des Weiteren bietet die Perpetuum Ltd. keine Vibrationsgeneratoren an, deren Eigenfrequenz unter 25 Hertz liegt, was wiederum der Energieumwandlung im Zusammenhang mit Seetransporten entgegensteht (siehe **Tabelle 18**). (vgl. [Per13])

Unter anderem aus den o. g. Gründen wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein Prototyp eines Vibrationsgenerators der Precision Motors Deutsche Minebea GmbH ausgewählt (siehe **Abbildung 53**), der über eine kompakte Baugröße von 32 Kubikzentimetern sowie den für einen Prototypen verhältnismäßig geringen Nettopreis von 120 Euro verfügte. Ein weiterer Grund für die Entscheidung zugunsten des Generators „EHE-V1-1012“ war dessen Eigenfrequenz, die bei 12,3 Hertz liegt. Hierdurch sollte eine Energieumwandlung für alle betrachteten Verkehrsträger ermöglicht werden, um den Einsatz mehrerer verschiedener Generatoren zu vermeiden und damit die Baugröße und den Preis des zu entwickelnden Gesamtsystems in einem akzeptablen Rahmen zu halten. ([Sie14a], S. 49 f.)

---

<sup>24</sup> Weitere in diesem Zusammenhang zu erwähnende internationale Anbieter elektromagnetischer Energiewandler sind z. B. die Unternehmen LORD MicroStrain Inc., Lumedyne Technologies Inc. und Ferro Solutions Inc. (vgl. [Lor15]; [Lum15]; [Fer17]).

<sup>25</sup> An dieser Stelle ist anzumerken, dass sich der Preis auf die Abnahmemenge von 1 Stück bezieht.

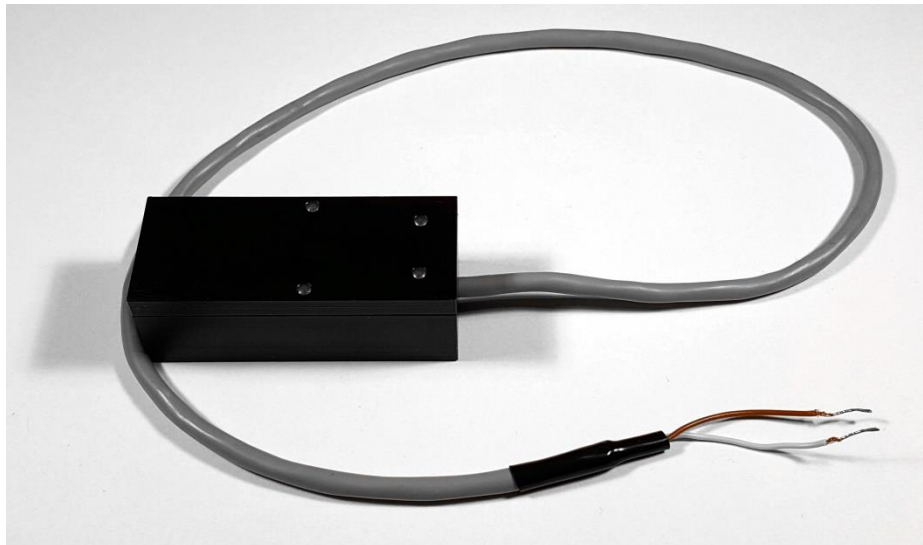


Abbildung 53: Elektromagnetischer Vibrationsgenerator des Typs „EHE-V1-1012“

### 5.1.3 Solarzellen

Im Rahmen der im Kapitel 4.2.3 dargelegten Untersuchung von Lagerprozessen wurde festgestellt, dass die Energy-Harvesting-Technologie der Solarzelle in diesem Zusammenhang über die beste Eignung zur Energieumwandlung verfügt. Dementsprechend galt es für die geplante Anfertigung eines Funktionsmusters eines energieautarken RFID-Sensortransponders – unter Beachtung der Kompatibilität zu dem im Kapitel 5.1.1 beschriebenen Energiemanagement-Modul – passende Photovoltaikzellen zu beschaffen.

Da es sich bei Solarzellen im Vergleich zu elektromagnetischen Vibrationsgeneratoren um eine Technologie mit einem deutlich höheren Entwicklungsstand handelt, erwies sich die Auswahl geeigneter Solarmodule, bei der insbesondere die Leerlaufspannung<sup>26</sup>, der Preis und die Abmessungen der verschiedenen Zellen zu berücksichtigen waren, als wesentlich einfacher. Das ausgewählte Energiemanagement-Modul „DC2080A“ verfügte hierbei bereits über die auf die integrierte Schaltung „LTC3459“ abgestimmte Solarzelle „AM-5412“ der Panasonic Corporation, welche eine Leerlaufspannung von 3,4 Volt, einen Bruttopreis von 9,13 Euro<sup>27</sup> und eine Fläche von 16,58 Quadratzentimetern aufweist (vgl. [Dig17]).

---

<sup>26</sup> Bei der Leerlaufspannung handelt es sich um die an den Klemmen einer offenen Spannungsquelle gemessene elektrische Spannung (vgl. [PP14], S. 56 ff.).

<sup>27</sup> Dieser Bruttopreis ergab sich beim Kauf von einer Solarzelle und kann ab einer Abnahmemenge von 1000 Stück auf rund fünf Euro pro Stück reduziert werden.

Neben der integrierten Schaltung „LTC3459“ umfasst das Energiemanagement-Modul „DC2080A“ zudem die integrierte Schaltung „LTC3108“ zur Anbindung von Gleichspannungsquellen, bei der durch die Verwendung kompakter Aufwärtswandler ein Betrieb bereits ab sehr geringen Eingangsspannungen von 20 Millivolt möglich ist (vgl. Kapitel 5.1.1). An dieser Stelle ergab sich die Möglichkeit, eine weitere Solarzelle an das Energiemanagement-Modul anzuschließen, um hierdurch das Maß an Energieautarkie des geplanten Zustandsüberwachungssystems weiter zu erhöhen. Diesbezüglich galt es eine Photovoltaikzelle mit einer möglichst geringen Leerlaufspannung zu wählen, wobei beispielhaft die Solarzelle „YH-46X76“ der Conrad Electronic SE beschafft wurde, die über eine sehr niedrige Leerlaufspannung von 0,59 Volt, einen Bruttopreis von 3,29 Euro<sup>28</sup> und eine Fläche von 34,96 Quadratzentimetern verfügt (vgl. [Con17]).

#### 5.1.4 Multisensorischer RFID-Transponder

Innerhalb des zweiten Kapitels wurde herausgearbeitet, dass semi-aktive RFID-Sensortransponder aufgrund ihres geringen Energiebedarfs im Verhältnis zu vergleichbaren Zustandsüberwachungslösungen hinsichtlich der Realisierbarkeit einer autarken Energieversorgung mittels Energy-Harvesting die Technologie mit den größten Erfolgchancen darstellen.

Im Zusammenhang mit der Auswahl eines geeigneten multisensorischen RFID-Transponders für das im Kapitel 5.2 anzufertigende Funktionsmuster war – neben einem möglichst geringen Preis und einer kompakten Baugröße – insbesondere sicherzustellen, dass der Transponder die folgenden grundlegenden funktionellen Eigenschaften erfüllt:

- Möglichkeit der Anbindung mehrerer unterschiedlicher Sensoren
- Kontinuierliche Aufzeichnung von Messwerten
- Verwendung eines nichtflüchtigen Speichers
- Datenübertragung via NFC-kompatibler HF-Luftschnittstelle

---

<sup>28</sup> Der angegebene Bruttopreis bezieht sich auf die Abnahmemenge von 1 Stück und sinkt z. B. bei einem Kauf von 50 Photovoltaikzellen auf einen Stückpreis von 2,87 Euro brutto.

Diesbezüglich wurde exemplarisch der in der folgenden **Abbildung 54** gezeigte semi-aktive HF-RFID-Sensortransponder „TELID<sup>®</sup>332.nfc“ der Micro-Sensys GmbH<sup>29</sup> ausgewählt, der mittels einer primären Li-Ion-Zelle betrieben wird und mit dessen Hilfe gleichzeitig die Parameter Feuchte und Temperatur kontinuierlich überwacht werden können:



**Abbildung 54: Semi-aktiver RFID-Sensortransponder des Typs „TELID<sup>®</sup>332.nfc“ [Mic17]**

Der „TELID<sup>®</sup>332.nfc“ verfügt hierbei über einen nichtflüchtigen EEPROM-Speicher, eine kompakte Baugröße von 9,72 Kubikzentimetern und bei der Abnahme von einem Transponder über einen Nettopreis von 78,70 Euro<sup>30</sup>. Um den „TELID<sup>®</sup>332.nfc“ jedoch auch im Rahmen des speziellen Anwendungsfalls der qualitativen Überwachung einzelner Ladeeinheiten innerhalb von logistischen Prozessen effizient einsetzen zu können und darüber hinaus eine externe Energieeinspeisung mithilfe geeigneter Energy-Harvesting-Module zu ermöglichen, gilt es diesen im Zusammenhang mit der im nachfolgenden Kapitel 5.2 beschriebenen Anfertigung eines Funktionsmusters eines energieautarken multisensorischen RFID-Transponders entsprechend weiterzuentwickeln.

---

<sup>29</sup> In Bezug auf weitere Anbieter von semi-aktiven RFID-Sensortranspondern sei auf das Kapitel 2.2.5 verwiesen.

<sup>30</sup> Der Stückpreis lässt sich z. B. bei einer Abnahmemenge von 2000 Stück auf einen Wert von 46,64 Euro netto vermindern.

## 5.2 Anfertigung eines energieautarken RFID-Sensortransponders in Form eines Funktionsmusters

Innerhalb dieses Kapitels sind die Hardwarekomponenten, die im Rahmen des Kapitels 5.1 für die Anfertigung des geplanten Funktionsmusters als am besten geeignet identifiziert wurden, entsprechend der speziellen Anwendung der Zustandsüberwachung einzelner Ladeeinheiten in der Distributionslogistik weiterzuentwickeln und zu einem funktionsfähigen Gesamtsystem zusammenzuführen.

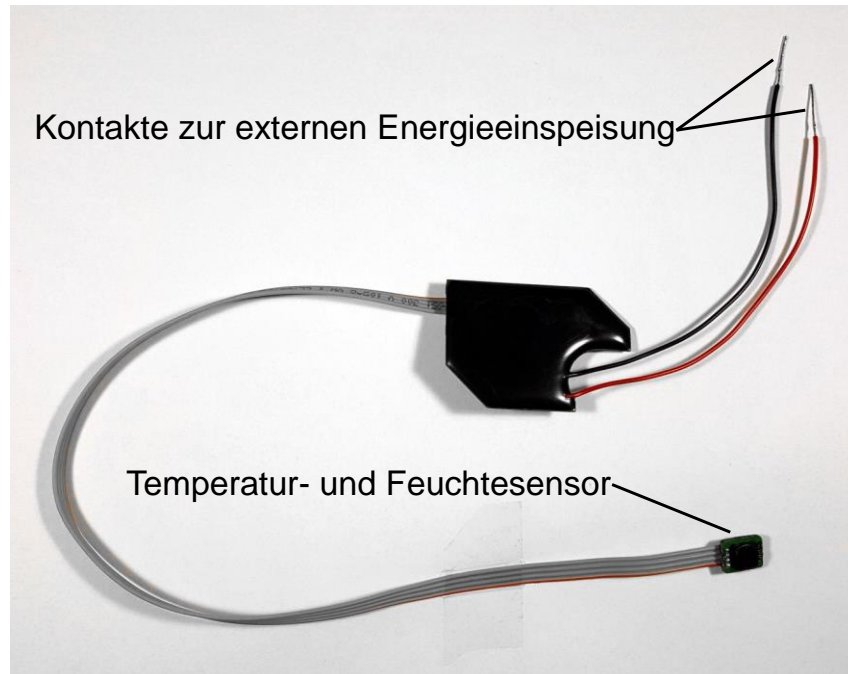
In einem ersten Schritt wurde hierbei der ausgewählte HF-RFID-Sensortransponder „TELID<sup>®</sup>332.nfc“ in Zusammenarbeit mit der Micro-Sensys GmbH derartig umgebaut, dass – anstelle der bisherigen Energieversorgung durch Primärzellen – eine externe Energieeinspeisung mittels Energy-Harvesting möglich wurde.

Bei Betrachtung der **Abbildung 54** wird zudem deutlich, dass sich die Sensorik und das HF-RFID-Frontend des „TELID<sup>®</sup>332.nfc“ bei der aktuell vorhandenen Konfiguration des Transponders in direkter Nähe zueinander befinden. Dieses kann wiederum beim Auslesen der auf dem Transponder gespeicherten Daten mithilfe des hierfür vorgesehenen NFC-fähigen Smartphones aufgrund der begrenzten Lesereichweite von maximal zehn Zentimetern zu Problemen führen. Appliziert man den Transponder beispielsweise innerhalb der im Rahmen der Praxismessungen exemplarisch ausgewählten Ladeeinheit des thermoisolierten Rollbehälters, um die Temperatur und die Feuchte während eines Transportes zu überwachen, so ist hier ein Auslesen des Sensortransponders durch die Behälterwand hindurch nicht möglich, sodass der Behälter im Zusammenhang mit dem Ausleseprozess geöffnet werden muss.

Zur Erreichung eines effizienten Ausleseprozesses ohne Einfluss auf die Ladeeinheit war es demnach notwendig, das HF-RFID-Frontend und die Sensorik des „TELID<sup>®</sup>332.nfc“ räumlich voneinander zu trennen, um hierdurch Sensormesswerte, die im Inneren einer Ladeeinheit aufgezeichnet wurden, auch von außen auslesen zu können. Dieses ließ sich dadurch umsetzen, dass beispielhaft ein externer Temperatur- und Feuchtesensor über eine I<sup>2</sup>C-Busschnittstelle mit dem Mikrocontroller des Transponders verbunden wurde.



Der an den speziellen in dieser Arbeit betrachteten Anwendungsfall angepasste multisensorische HF-RFID-Transponder, der einen elementaren Teil des zu entwickelnden Gesamtsystems darstellt, ist in der folgenden **Abbildung 55** zu sehen:



**Abbildung 55: Anwendungsgerechter NFC-kompatibler Sensortransponder**

Neben der Weiterentwicklung des Sensortransponders galt es im Rahmen der Anfertigung des angestrebten Funktionsmusters zudem, das innerhalb des Kapitels 5.1.1 beschriebene Energiemanagement-Modul „DC2080A“ hinsichtlich der speziellen Anwendung anzupassen.

Damit zur Energieversorgung des Sensortransponders sowohl die ausgewählten Solarzellen als auch der beschaffte elektromagnetische Vibrationsgenerator genutzt werden konnten, musste das Energiemanagement-Modul zunächst um passende Gleichrichterioden erweitert werden. Die Integration von Dioden war in diesem Zusammenhang notwendig, um Überspannungen bei mehreren angeschlossenen Energy-Harvesting-Generatoren zu verhindern. Ursprünglich konnten an das gewählte Energiemanagement-Modul zwar mehrere Generatoren angeschlossen, allerdings immer nur maximal ein Generator gleichzeitig genutzt werden. Durch das Verlöten geeigneter Dioden auf der Rückseite der Leiterplatte des Energiemanagement-Moduls wurde indessen die Nutzung mehrerer Generatoren zur gleichen Zeit ermöglicht. ([Sie14a], S. 54)

Zusätzlich zu den passenden Gleichrichterdiolen, war das Energiemanagement-Modul „DC2080A“ um einen anwendungsgerechten Energiespeicher zu erweitern. Dieses ist dadurch begründet, dass der „TELID<sup>®</sup>332.nfc“ mithilfe der vorhandenen Elektrolytkondensatoren, die insgesamt über eine elektrische Kapazität von 1500 Mikrofaraad verfügen (vgl. Kapitel 5.1.1, S. 92), bei geladenen Kondensatoren und dem für die logistische Praxis typischen Messintervall von vier Feuchte- und Temperaturmessungen pro Stunde (vgl. [Röc14], S. 19) innerhalb von praktischen Untersuchungen lediglich für einen Zeitraum von knapp drei Minuten ohne die Energiezufuhr über eine Energy-Harvesting-Quelle betrieben werden konnte. Da in der Praxis jedoch regelmäßig Fälle auftreten, im Rahmen derer auf der Ebene der Ladeinheit weder Licht- noch Vibrationsenergie zur Verfügung steht (dieses Problem tritt bspw. im Zusammenhang mit einem Verkehrsstau auf), wurde die ermittelte Zeitdauer von drei Minuten selbst für eine kurze Zwischenspeicherung innerhalb des Energiemanagements als nicht ausreichend eingestuft.

Um in solchen Fällen längere Zeiträume ohne verfügbare Umgebungsenergien überbrücken zu können, galt es einen zusätzlichen Energiespeicher mit einer deutlich höheren Speicherkapazität in das Energiemanagement-Modul zu integrieren, wobei hier entweder ein Doppelschicht- bzw. Superkondensator mit einer möglichst hohen Leistungsdichte oder ein klassischer Elektrolytkondensator mit einer möglichst hohen Energiedichte bzw. Speicherkapazität in Frage kamen (vgl. Kapitel 3.2.2, S. 46). Weitere entscheidende Faktoren bei der Auswahl eines geeigneten Energiespeichers waren – neben der möglichst hohen Speicherkapazität und Leistungsdichte – die Baugröße, die Nennspannung und der Preis.

Zur Erweiterung des Energiemanagement-Moduls „DC2080A“ wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit der klassische Elektrolytkondensator „EEU-HD1A223“ der Panasonic Corporation ausgewählt, welcher einen Bruttopreis von 4,31 Euro<sup>31</sup>, eine Nennspannung von zehn Volt, einen Durchmesser und eine Höhe von 18 Millimetern bzw. 36 Millimetern sowie eine im Verhältnis zur Baugröße sehr hohe elektrische Kapazität von 22000 Mikrofaraad aufweist (vgl. [Pan12]).

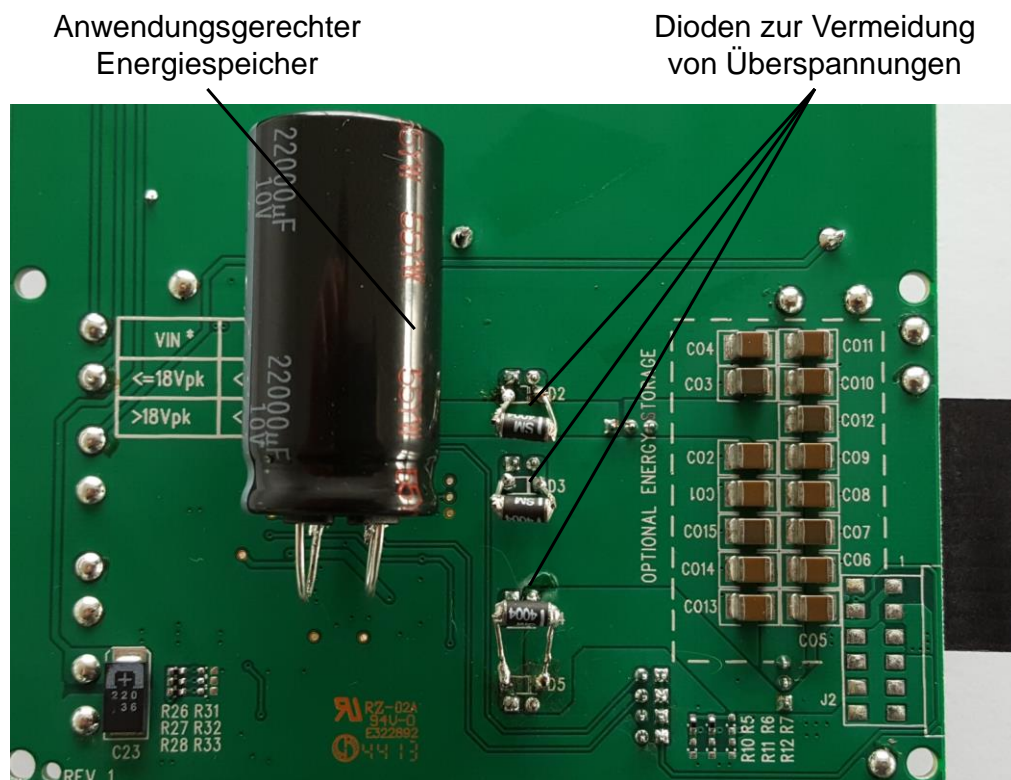
Weitere durchgeführte praktische Untersuchungen ergaben in diesem Zusammenhang, dass die Zeitdauer, die der „TELID<sup>®</sup>332.nfc“ bei einem Messintervall von vier

---

<sup>31</sup> Der Bruttopreis bezieht sich auf die Abnahmemenge von 1 Stück und kann z. B. bei einer Menge von 10 Stück auf einen Stückpreis von 4,10 Euro brutto reduziert werden.

Feuchte- und Temperaturmessungen pro Stunde ohne verfügbare Umgebungenergie betrieben werden kann, durch die Integration des zusätzlichen Elektrolytkondensators „EEU-HD1A223“ von zuvor knapp drei Minuten auf rund 38 Minuten erhöht werden konnte. Diese Zeitspanne wurde wiederum für die kurzzeitige Zwischenspeicherung im Rahmen des Energiemanagements als grundsätzlich ausreichend eingeordnet.

Die Integration der Gleichrichterdiode sowie des anwendungsgerechten Elektrolytkondensators „EEU-HD1A223“ in das Energiemanagement-Modul „DC2080A“ ist in der folgenden **Abbildung 56** dargestellt:

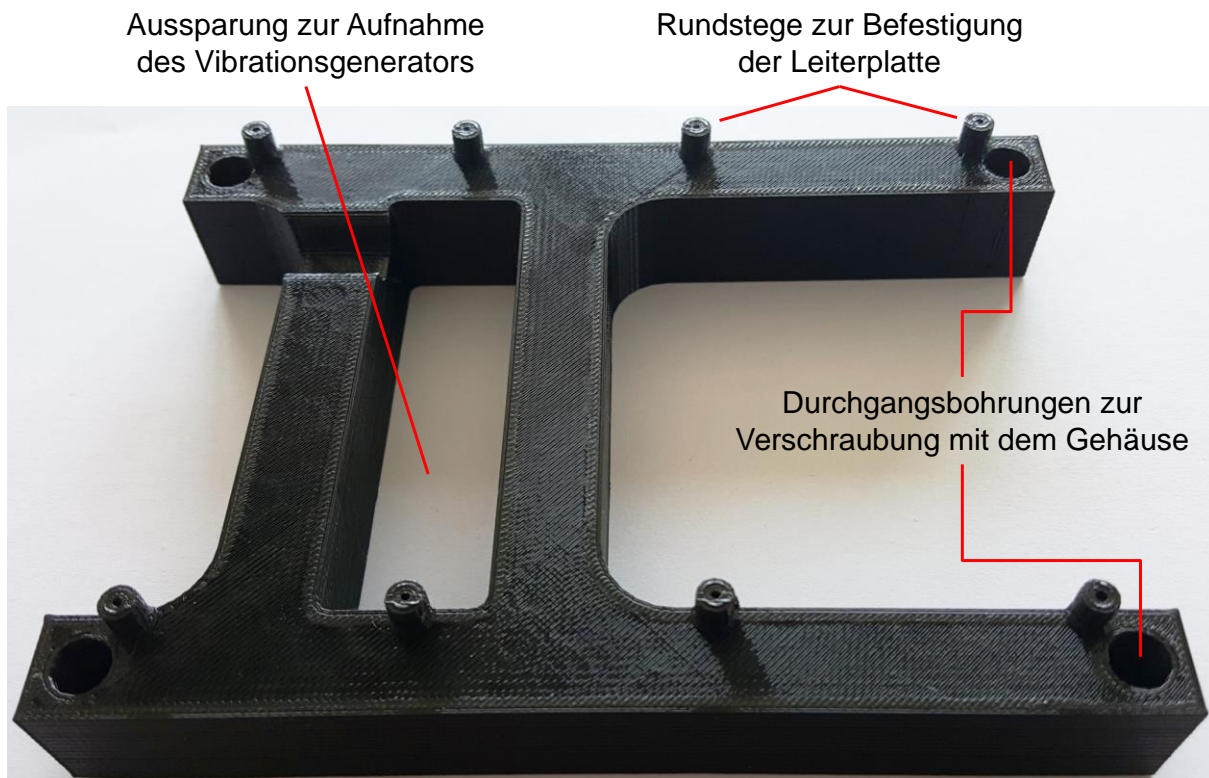


**Abbildung 56:** Erweiterung des Energiemanagement-Moduls um passende Gleichrichterdiode und einen anwendungsgerechten Energiespeicher

Zum Schutz vor im Zusammenhang mit TUL-Prozessen potenziell auftretenden mechanischen und klimatischen Belastungen wie mechanischem Stoß oder Niederschlag (siehe **Abbildung 1** auf der Seite 1) wurden die einzelnen Komponenten des Zustandsüberwachungssystems in das Industriegehäuse „7200-214C“ der AXXATRONIC GmbH integriert, welches insbesondere über die Schutzklasse

„IP65“<sup>32</sup> sowie einen transparenten Gehäusedeckel verfügt, welcher den erforderlichen Lichteinfall für die Solarzellen ermöglicht.

Zur Fixierung der unterschiedlichen Komponenten innerhalb des Gehäuses galt es darüber hinaus ein passendes Verbindungsstück zu konstruieren, welches in der **Abbildung 57** zu sehen ist und eigens mittels additiver Fertigung im Schmelzschichtverfahren hergestellt wurde.



**Abbildung 57:** Verbindungsstück zur Fixierung der Einzelkomponenten des Zustandsüberwachungssystems innerhalb des Industriegehäuses

Das finale Funktionsmuster des angefertigten energieautarken RFID-Sensortransponders zur beispielhaften Überwachung der Parameter Feuchte und Temperatur ist in der folgenden **Abbildung 58** dargestellt:

---

<sup>32</sup> Die Schutzart von Gehäusen mit den sogenannten International Protection Codes (IP-Codes) ist z. B. in der Norm DIN EN 60529 definiert. Die Schutzklasse „IP65“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die im Gehäuse befindliche Elektronik staubdicht gegen Fremdkörper geschützt ist, ein vollständiger Schutz gegen Berührung besteht und ein Schutz gegen Strahlwasser aus beliebigem Winkel gewährleistet ist. (vgl. [DIN14b])

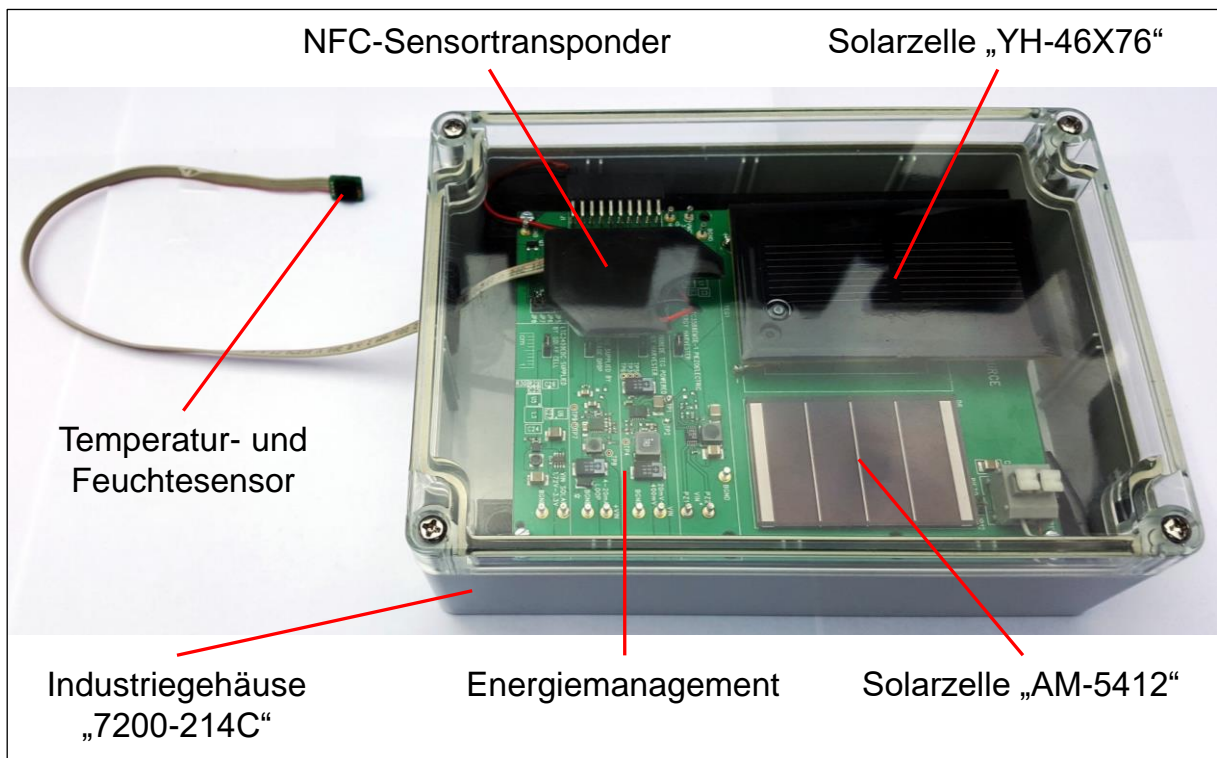


Abbildung 58: Funktionsmuster eines energieautarken multisensorischen RFID-Transponders zur Überwachung der Parameter Feuchte und Temperatur

### 5.3 Bereitstellung einer anwendungsgerechten Smartphone-Applikation

Um die grundsätzliche Funktionsfähigkeit des entwickelten energieautarken RFID-Sensortransponders nachweisen zu können, galt es in einem weiteren Schritt, eine Software bzw. Smartphone-Applikation auf einem entsprechenden Schreib-Lesegerät bzw. Smartphone bereitzustellen, mithilfe derer der Transponder im Zusammenhang mit den im Kapitel 6 durchzuführenden Laboruntersuchungen beschrieben und ausgelesen werden kann.

Diesbezüglich wurde in Zusammenarbeit mit der Micro-Sensys GmbH eine anwendungsgerechte Applikation für Smartphones mit einem Android-Betriebssystem entwickelt, mit welcher beim Beschreiben des „TELID<sup>®</sup>332.nfc“ unter anderem das Messintervall sowie kritische Schwellenwerte, deren Über- bzw. Unterschreitung einer expliziten Hervorhebung bedarf, je nach Anwendungsfall programmiert werden können (siehe **Abbildung 59**).

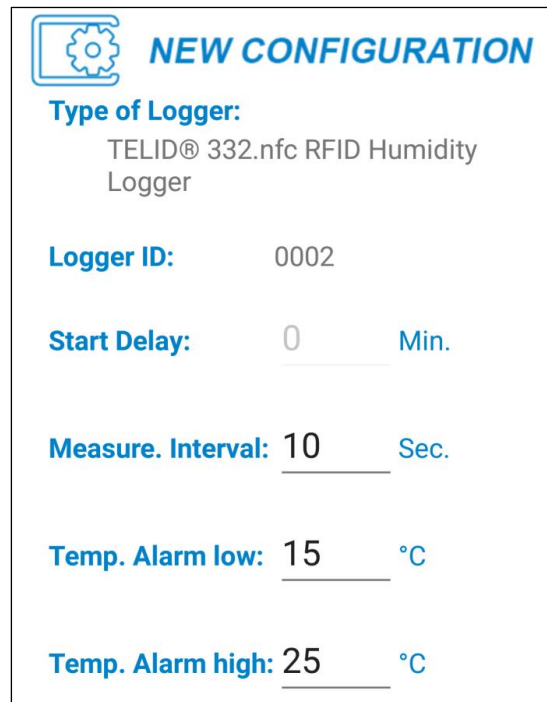


Abbildung 59: Smartphone-Applikation – Menü zur Konfiguration einer Messung

Des Weiteren besteht bei der entwickelten Smartphone-Applikation – wie in der folgenden **Abbildung 60** zu sehen – die Möglichkeit, sich im Verlaufe einer bereits gestarteten Messung den aktuellen Status, das heißt u. a. das gewählte Messintervall, die Anzahl bereits durchgeführter Messungen oder die eventuelle Über- bzw. Unterschreitung definierter Schwellenwerte, anzeigen zu lassen:

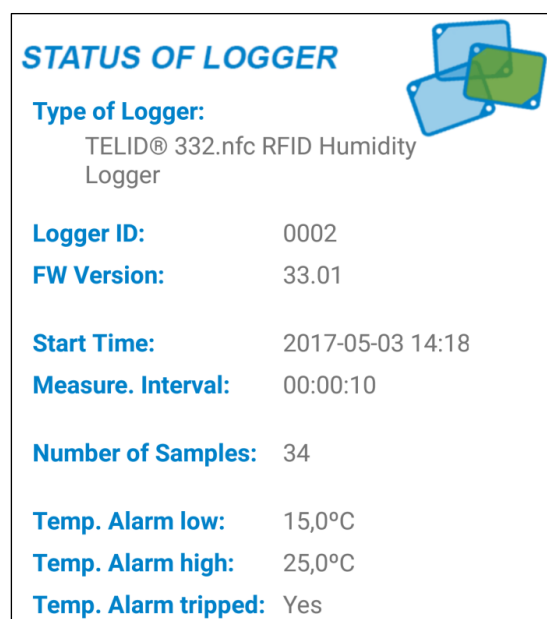
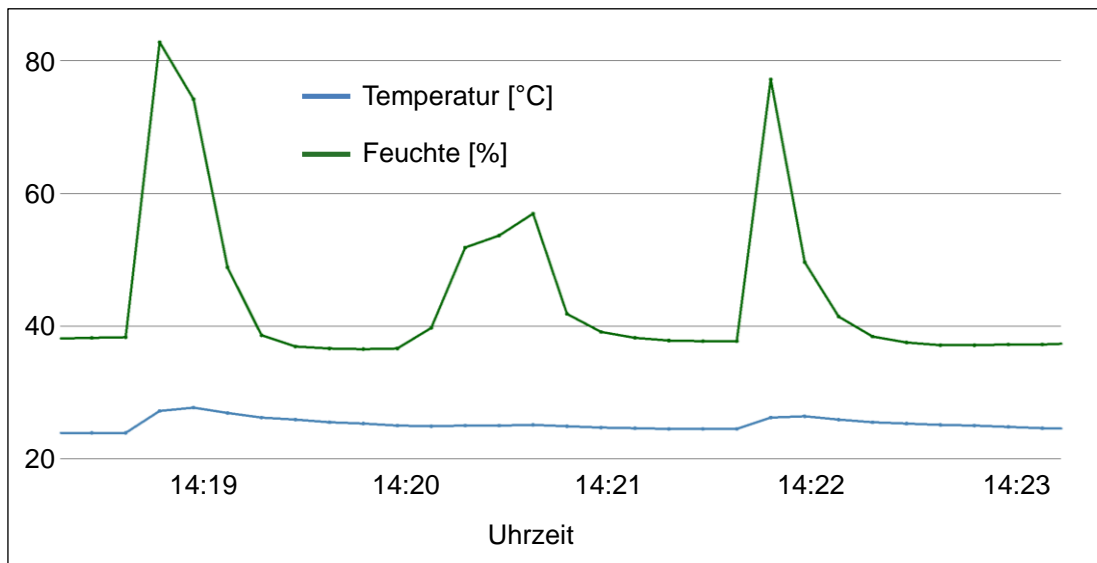



Abbildung 60: Smartphone-Applikation – Statusanzeige

Zudem verfügt die bereitgestellte Smartphone-Applikation über die Funktionen des Auslesens und des Löschsens aufgezeichneter Sensormesswerte. Beim Auslesen der jeweils gemessenen Zustandsparameter kann hierbei der Verlauf über die Zeit sowohl in grafischer (siehe **Abbildung 61**) als auch in tabellarischer Form (siehe **Abbildung 62**) auf dem für das Auslesen der Sensordaten verwendeten Smartphone angezeigt werden.



**Abbildung 61: Smartphone-Applikation – Grafische Darstellung von Sensormesswerten**

 <b>LIST OF SENSOR DATA</b>		
Timestamp	Humid (%)	Temp (°C)
2017-05-03 14:18:28	38,1	23,9
2017-05-03 14:18:38	38,2	23,9
2017-05-03 14:18:48	38,3	23,9
2017-05-03 14:18:58	82,7	27,2
2017-05-03 14:19:08	74,1	27,7
2017-05-03 14:19:18	48,8	26,9
2017-05-03 14:19:28	38,6	26,2
2017-05-03 14:19:38	36,9	25,9
2017-05-03 14:19:48	36,6	25,5
2017-05-03 14:19:58	36,5	25,3
2017-05-03 14:20:08	36,6	25
2017-05-03 14:20:18	39,7	24,9
2017-05-03 14:20:28	51,8	25
2017-05-03 14:20:38	53,6	25
2017-05-03 14:20:48	56,9	25,1
2017-05-03 14:20:58	41,8	24,9
2017-05-03 14:21:08	39,1	24,7
2017-05-03 14:21:18	38,2	24,6

**Abbildung 62: Smartphone-Applikation – Tabellarische Darstellung von Sensormesswerten**

## 6 Validierung des entwickelten Funktionsmusters im Prüflabor

In diesem Kapitel sollen grundlegende Erkenntnisse bezüglich der Funktionsfähigkeit energieautarker multisensorischer RFID-Transponder im Hinblick auf die spezielle Anwendung der qualitativen Überwachung einzelner Ladeeinheiten im Zusammenhang mit logistischen Prozessen gewonnen werden, indem im Rahmen von Laboruntersuchungen zunächst der Leistungsbedarf des „TELID<sup>®</sup>332.nfc“ bestimmt und dieser anschließend der Leistung, die mittels der beschafften Energy-Harvesting-Module unter praxisnahen Umgebungsbedingungen erzielt werden kann, gegenübergestellt wird.

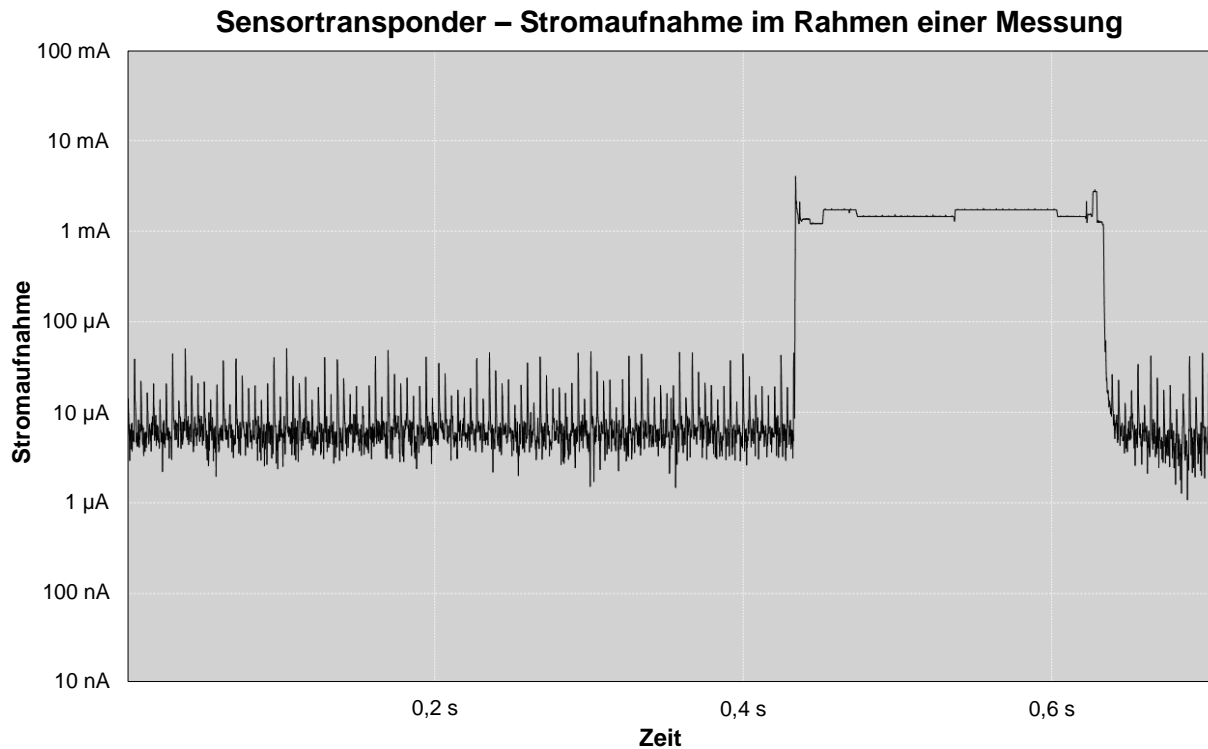
### 6.1 Leistungsaufnahme des ausgewählten RFID-Sensortransponders

Zur Bestimmung der durchschnittlichen Leistungsaufnahme des exemplarisch ausgewählten Sensortransponders, bezüglich derer umfangreiche Messreihen durchgeführt wurden, kamen der „EFM32GG-STK3700“ der Silicon Laboratories Inc. (hierbei handelt es sich um eine Plattform zur Evaluierung, Prototypenanfertigung und Anwendungsentwicklung) sowie die hierfür vorgesehene Software „Simplicity Studio“ zum Einsatz (vgl. [Sil13]).

Der „Advanced Energy Monitor“ des „EFM32GG-STK3700“, welcher die Speicherung von Echtzeitdaten in Bezug auf den Stromverbrauch bzw. die Stromerzeugung einer zu untersuchenden Anwendung ermöglicht, vollzog hierbei 6250 Strommessungen pro Sekunde in einem Bereich von 0,1 Mikroampere bis 50 Milliampere, wobei die Genauigkeit der Messungen bei einem Strom von über 250 Mikroampere bei einer maximalen Abweichung von 0,1 Milliampere und bei einem Strom von unter 250 Mikroampere bei einer maximalen Abweichung von 1 Mikroampere lag (vgl. [Sil13]).

In der nachfolgenden **Abbildung 63** ist die Stromaufnahme des „TELID<sup>®</sup>332.nfc“ im Rahmen einer exemplarischen Messung der Zustandsparameter Feuchte und Temperatur dargestellt, bei der die zur Berechnung der Leistungsaufnahme erforderliche Betriebsspannung des Transponders 3,3 Volt betrug:





**Abbildung 63: Stromaufnahme des „TELID<sup>®</sup>332.nfc“ im Rahmen einer beispielhaften Messung der Parameter Feuchte und Temperatur**

Der durchschnittliche Leistungsbedarf des Sensortransponders, der sich im Zusammenhang mit den durchgeführten umfangreichen Messreihen im Betriebsmodus bei der Aufzeichnung jeweils eines Feuchte- und Temperaturmesswertes für die hierfür benötigte durchschnittliche Zeitdauer von 0,2 Sekunden ergab, lag bei 5,07 Milliwatt und die maximal gemessene Leistungsaufnahme bei 15,54 Milliwatt. Im Ruhemodus zwischen den jeweiligen Messungen trat wiederum eine durchschnittliche Leistungsaufnahme von 6,97 Mikrowatt auf, sodass sich bezüglich des in der logistischen Praxis typischen Messintervalls von vier Messungen pro Stunde (vgl. Kapitel 5.2, S. 106) für den „TELID<sup>®</sup>332.nfc“ ein durchschnittlicher Leistungsbedarf von 8,1 Mikrowatt ergibt.

Die hinsichtlich der Leistungsaufnahme des beispielhaft ausgewählten RFID-Sensortransponders mit NFC-kompatibler HF-Luftschnittstelle ermittelten Werte sind in der folgenden **Tabelle 19** noch einmal zusammenfassend aufgeführt:

Tabelle 19: Leistungsaufnahme des ausgewählten multisensorischen RFID-Transponders

Modus	Durchschnittlicher Leistungsbedarf	Dauer einer Messung	Durchschnittlicher Leistungsbedarf während einer Messung	Maximaler Leistungsbedarf während einer Messung
Ruhemodus (zwischen den Messungen)	6,97 $\mu$ W	-	-	-
Betriebsmodus (Beispiel: Vier Feuchte- und Temperaturmessungen pro Stunde)	8,10 $\mu$ W	0,20 s	5,07 mW	15,54 mW

## 6.2 Leistungsabgabe der ausgewählten Energy-Harvesting-Module

Bei der Ermittlung der mithilfe der ausgewählten Energy-Harvesting-Module unter praxisnahen Umgebungsbedingungen erzielbaren Leistungen wurden erneut der „EFM32GG-STK3700“ sowie die dazugehörige Software „Simplicity Studio“ verwendet, wobei die im Rahmen der durchgeführten Praxisversuche aufgezeichneten Messwerte in diesem Zusammenhang als wesentliche Grundlage dienen.

Die Leistungen wurden hierbei jeweils am Energie-Output des Energiemanagement-Moduls „DC2080A“ (siehe **Abbildung 48** auf der Seite 91) gemessen, da vorhandene Energieverluste im Rahmen des Energiemanagements auf diese Weise bereits berücksichtigt und somit die Leistungen bestimmt wurden, die dem angeschlossenen elektronischen Verbraucher (in diesem Fall dem multisensorischen RFID-Transponder) tatsächlich zur Verfügung stehen.

Zunächst erfolgten in diesem Kontext Untersuchungen hinsichtlich der Leistungsabgabe des elektromagnetischen Vibrationsgenerators „EHE-V1-1012“, die auf einem elektrohydraulischen Schwingtisch zur Transportsimulation durchgeführt wurden. Um Aussagen zu dem Frequenzbereich treffen zu können, innerhalb welchem der untersuchte Vibrationsgenerator überhaupt Energie liefert, wurde als erstes der Frequenzbereich von 0 Hertz bis 200 Hertz mit einer relativ hohen Beschleunigung von 0,65 g durchlaufen. Als Ergebnis dieser Versuche ergab sich der sehr enge Fre-

quenzbereich von 11 Hertz bis 15 Hertz. Dieses ist darauf zurückzuführen, dass die Entwicklungen bzw. Produkte im Bereich elektromagnetischer Vibrationsgeneratoren häufig auf die Energieumwandlung im industriellen Umfeld und in diesem Zusammenhang auf die Applikation an Maschinen abzielen (vgl. Kapitel 5.1.2, S. 99 f.). Da die an Maschinen auftretenden Schwingungen in der Regel über relativ konstante Frequenzen verfügen, ist der Frequenzbereich, in dem diese technischen Lösungen Energie bereitstellen, auf eine sehr kleine Bandbreite um die Eigenfrequenz des Generators herum begrenzt. ([Sie14a], S. 51)

Des Weiteren galt es einen Schwellenwert der Beschleunigung zu ermitteln, ab dem der betrachtete Vibrationsgenerator bei seiner Eigenfrequenz von 12,3 Hertz Energie bereitstellt. Dieser liegt bei einer Beschleunigung von 0,15 g ([Sie14a], S. 51 f.). Bei den Werten von 0,06 g bzw. 0,13 g, die bezüglich der Standardabweichung der Beschleunigung im Rahmen des durchgeführten Seetransportes bzw. des Straßentransportes von Osnabrück nach Genk über die für die Energieumwandlung relevante vertikale Schwingachse ermittelt wurden (vgl. Kapitel 4), konnte mittels des ausgewählten Vibrationsgenerators demnach keine für den elektronischen Verbraucher nutzbare Leistung bereitgestellt werden, da eine Anregung des Generators erst ab dem Schwellenwert von 0,15 g zu verzeichnen ist.

Für die Beschleunigungsintensitäten 0,15 g (Schwellenwert der Beschleunigung), 0,22 g (Standardabweichung der Beschleunigung über die vertikale Schwingachse im Zusammenhang mit dem Straßentransport von Genk nach Osnabrück) sowie 0,43 g (Standardabweichung der Beschleunigung über die vertikale Schwingachse im Rahmen des Schienentransportes) wurden im weiteren Verlauf die jeweils mithilfe des Generators erzielbaren durchschnittlichen Leistungen – zum einen für die Eigenfrequenz von 12,3 Hertz und zum anderen für den Bereich von 11 Hertz bis 15 Hertz – bestimmt. (vgl. [Sie14a], S. 52)

Die diesbezüglich erzielten Ergebnisse sind in der **Tabelle 20** aufgeführt, wobei anzumerken ist, dass sich für die Beschleunigungsintensitäten von 0,15 g und 0,22 g beim Durchlaufen des Frequenzbereiches von 11 Hertz bis 15 Hertz eine weitere Einschränkung ergab, da die Leistungsabgabe bei diesen Beschleunigungswerten auf noch engere Frequenzbereiche von lediglich 11,9 Hertz bis 13,3 Hertz bzw. 11,7 Hertz bis 13,7 Hertz beschränkt ist ([Sie14a], S. 52). Stellt man die hierbei er-

zielbaren durchschnittlichen Leistungen von 0,34 Milliwatt bzw. 0,73 Milliwatt jedoch dem durchschnittlichen Leistungsbedarf des „TELID®332.nfc“ gegenüber, der bei vier auszuführenden Feuchte- und Temperaturmessungen pro Stunde lediglich bei 8,1 Mikrowatt liegt, so sind auch diese Leistungswerte in Bezug auf die Energieversorgung des ausgewählten RFID-Sensortransponders durchaus als sehr vielversprechend einzuordnen.

**Tabelle 20: Leistungsabgabe des ausgewählten elektromagnetischen Vibrationsgenerators (i. A. a. ([Sie14a], S. 51)**

Frequenz / Frequenzbereich	Beschleunigung	Durchschnittliche Leistung
12,3 Hz	0,15 g	1,08 mW
12,3 Hz	0,22 g	1,58 mW
12,3 Hz	0,43 g	1,89 mW
11 Hz bis 15 Hz	0,15 g	0,34 mW
11 Hz bis 15 Hz	0,22 g	0,73 mW
11 Hz bis 15 Hz	0,43 g	1,74 mW

Die in der **Tabelle 20** angegebenen Werte bezüglich der mittels des „EHE-V1-1012“ im Rahmen von Transportprozessen potenziell realisierbaren durchschnittlichen Leistungen beziehen sich jeweils auf Frequenzen bzw. Frequenzbereiche innerhalb derer der Generator bei einer Mindestbeschleunigung von 0,15 g angeregt wird.

Da Beschleunigungen bei realen Transportprozessen allerdings in den unterschiedlichsten Frequenzbereichen auftreten (siehe **Abbildungen 49 bis 52**, S. 96 ff.), galt es zur Erreichung praxisgerechter Ergebnisse hinsichtlich der potenziellen Leistungsabgabe des untersuchten elektromagnetischen Vibrationsgenerators, die im Zusammenhang mit den eigens auf Ladeeinheitenebene durchgeführten Straßen-, Schienen- und Seetransporten erhobenen Messwerte auf den hierfür vorgesehenen elektrohydraulischen Schwingtisch zur Transportsimulation zu übertragen.

Im Hinblick auf die Simulation eines Straßentransportes, bei welcher – in Analogie zu der im Kapitel 5.1.2 vollzogenen Spektralanalyse – die innerhalb der eigens durchgeführten Straßentransporte über den relevanten Betrachtungszeitraum von insgesamt sechs Stunden aufgezeichneten Beschleunigungsmesswerte herangezogen wurden, ergab sich hierbei eine Leistung von rund 235 Mikrowatt, die mithilfe des ausgewählten Generators durchschnittlich bereitgestellt werden konnte.

Begründet durch den sehr engen Frequenzbereich von 11 Hertz bis 15 Hertz, in dem eine Energiebereitstellung durch den „EHE-V1-1012“ möglich ist, traten bezüglich der Verkehrsträger Wasser und Schiene allerdings Probleme auf, da im Rahmen des ausgeführten Seetransportes in erster Linie Beschleunigungen im Frequenzbereich von 0,1 Hertz bis 0,3 Hertz auftraten und die höchsten Beschleunigungsamplituden beim Schienentransport in einem Bereich von 104 Hertz bis 156 Hertz zu verzeichnen waren (vgl. Kapitel 5.1.2, S. 96 ff.). Bei den Simulationen von See- und Schienentransporten, die ebenfalls auf Basis der im Zusammenhang mit der Spektralanalyse für diese Verkehrsträger zugrunde gelegten Beschleunigungsmesswerte erfolgten, konnte der Vibrationsgenerator aus diesem Grund keinerlei elektrische Energie zur Verfügung stellen. (vgl. [Sie14a], S. 58)

Zur Durchführung umfangreicher Analysen in Bezug auf die mit den Photovoltaikzellen „AM-5412“ und „YH-46X76“ erreichbaren Leistungswerte wurde zunächst ein Versuchsaufbau verwirklicht, der es ermöglichte, die Leistung der Solarzellen in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke zu messen. Zur Bestimmung der Beleuchtungsstärke kam in diesem Zusammenhang der hierfür geeignete externe Sensor des angefertigten speziellen Messsystems zur Erfassung der an einer Ladeeinheit vorhandenen Temperaturgradienten, Beschleunigungen und Beleuchtungsstärken (siehe **Abbildung 19** auf der Seite 54) zum Einsatz, der jeweils in unmittelbarer Nähe zu der zu untersuchenden Solarzelle fixiert wurde. Zudem ließen sich durch einen selbstgebauten graduellen Filter im Hinblick auf Transparenz bzw. Opazität unterschiedliche durchschnittliche Beleuchtungsstärken im Bereich von 52 Lux bis 32023 Lux realisieren. (vgl. [Sie14a], S. 52)

Die Ergebnisse, die sich hinsichtlich der mittels der Photovoltaikzellen „AM-5412“ und „YH-46X76“ erzielbaren durchschnittlichen Leistungen ergaben, sind in der folgenden **Tabelle 21** dargestellt, wobei deutlich zu erkennen ist, dass die jeweils erreichten durchschnittlichen Leistungswerte nahezu linear von der vorhandenen Beleuchtungsstärke abhängen und die Solarzelle „YH-46X76“ erst ab dem ermittelten Schwellenwert von 3250 Lux Leistungen am Output des Energiemanagements bereitstellt, die durch einen elektronischen Verbraucher genutzt werden können.

Tabelle 21: Leistungsabgabe der beschafften Photovoltaikzellen

Durchschnittliche Beleuchtungsstärke während der Messung	Durchschnittliche Leistung der Solarzelle „AM-5412“	Durchschnittliche Leistung der Solarzelle „YH-46X76“
52 Lux	0,031 mW	-
612 Lux	0,49 mW	-
1551 Lux	1,20 mW	-
3250 Lux	2,71 mW	0,28 mW
9146 Lux	7,80 mW	0,83 mW
14710 Lux	13,82 mW	1,36 mW
32023 Lux	28,92 mW	3,13 mW

### 6.3 Laboruntersuchungen – Ableitung grundlegender Erkenntnisse bezüglich der Funktionsfähigkeit energieautarker RFID-Sensortransponder

Stellt man die mit den ausgewählten Energy-Harvesting-Modulen unter praxisnahen Umgebungsbedingungen erreichbaren Leistungen der Leistungsaufnahme des Sensortransponders „TELID<sup>®</sup>332.nfc“ gegenüber, so ergibt sich bezüglich der Leistungs- bzw. Funktionsfähigkeit des entwickelten Funktionsmusters das in der folgenden **Tabelle 22** zu sehende theoretische Ergebnis, welches auch im Rahmen praktischer Untersuchungen validiert werden konnte:

Tabelle 22: Leistungsfähigkeit des entwickelten Funktionsmusters

	Mögliche Feuchte- und Temperaturmessungen / min		
	Solarzelle „AM-5412“	Solarzelle „YH-46X76“	Elektromagnetischer Vibrationsgenerator
Lagerung (pessimistisches Szenario)	1	0	0
Lagerung (neutrales Szenario)	28	0	0
Lagerung (optimistisches Szenario)	60	48	0
Straßentransport	0	0	13
Schienentransport	0	0	0
Seetransport	0	0	0

Die Ergebnisse, die im Hinblick auf die potenzielle Energieversorgung des Sensortransponders mithilfe der ausgewählten Solarzellen erzielt wurden, fielen sehr vielversprechend aus. Als Grundlage dienten hierbei die für ein pessimistisches, ein neutrales und ein optimistisches Szenario bestimmten durchschnittlichen Beleuchtungsstärken, die tagsüber in einer beispielhaft betrachteten Lagerhalle vorhanden waren und bei 53 Lux, 619 Lux bzw. 9154 Lux lagen (vgl. Kapitel 4.2.3, S. 84 ff.).

Durch die alleinige Energieversorgung mittels der Solarzelle „YH-46X76“ konnten im Rahmen der Simulation des optimistischen Lagerszenarios die mehr als ausreichende Anzahl von 48 Feuchte- und Temperaturmessungen pro Minute erfolgen, wodurch sich in diesem Zusammenhang wiederum die Möglichkeit der Energiespeicherung ergibt, indem beim Beschreiben des Transponders ein Messintervall mit einem höheren zeitlichen Abstand gewählt wird. Aufgrund des Schwellenwertes von 3250 Lux, ab dem die Solarzelle „YH-46X76“ nutzbare Leistungen am Output des Energiemanagements bereitstellt, waren bei den Simulationen der weiteren Szenarien jedoch keine Temperatur- und Feuchtemessungen möglich.

Unter Verwendung der Solarzelle „AM-5412“ konnten bereits ab sehr geringen Beleuchtungsstärken nutzbare Leistungen am Output des Energiemanagement-Moduls zur Verfügung gestellt werden, sodass sich im Zusammenhang mit der Simulation des pessimistischen Szenarios die Möglichkeit der Aufzeichnung jeweils eines Temperatur- und Feuchtemesswertes pro Minute ergab. Bezogen auf das neutrale Szenario wurde indessen eine Anzahl von 28 möglichen Temperatur- und Feuchtemessungen pro Minute ermittelt. Bei der Simulation des optimistischen Szenarios, bei der mittels des ausgewählten RFID-Sensortransponders 60 Temperatur- und Feuchtemessungen pro Minute durchgeführt werden konnten, stellte nicht die verfügbare Energie, sondern das mit dem kürzesten zeitlichen Abstand einstellbare Messintervall von einer Messung pro Sekunde den limitierenden Faktor dar. Die Leistungsaufnahme des Transponders liegt bei der Aufzeichnung von 60 Temperatur- und Feuchtemesswerten pro Minute durchschnittlich bei 1,02 Milliwatt. Demgegenüber kann durch die Solarzelle „AM-5412“ bei einer durchschnittlichen Beleuchtungsstärke von 9146 Lux eine nutzbare Leistung von 7,80 Milliwatt im Durchschnitt erzielt werden (siehe **Tabelle 21**), wodurch sich an dieser Stelle im Besonderen ein Potenzial zur Zwischenspeicherung der überschüssigen Energie ergibt, welche nicht direkt zur Versorgung des multisensorischen RFID-Transponders benötigt wird.

Die bezüglich des Lagerprozesses erzielten Ergebnisse zeigen, dass mithilfe des gleichzeitigen Einsatzes der zwei beschafften Solarmodule tagsüber in einer Lagerhalle selbst im Rahmen des pessimistischen Szenarios, bei welchem die exemplarisch ausgewählte Ladeeinheit in einer Ecke der Lagerhalle ohne jegliche Möglichkeit der direkten Lichteinstrahlung positioniert wurde (vgl. Kapitel 4.2.3, S. 86), ausreichend Energie für den Betrieb eines Sensortransponders bereitgestellt werden konnte. Darüber hinaus besteht in vielen Fällen ein erhebliches Potenzial zur Speicherung überschüssiger Energie, die wiederum in Phasen einer niedrigen Energieverfügbarkeit zur Versorgung des Transponders genutzt werden kann.

Hinsichtlich der Untersuchung von Transportprozessen, bei denen auf Ladeeinheitenebene keinerlei verwertbare Lichtstrahlung vorhanden war (vgl. Kapitel 4.2.1, S. 56 ff.), ergab sich für den Verkehrsträger Straße, dass durch die Energieversorgung mittels eines elektromagnetischen Vibrationsgenerators eine Anzahl von 13 Temperatur- und Feuchtemessungen pro Minute möglich ist, wohingegen bei den Verkehrsträgern Schiene und Wasser aufgrund des begrenzten Frequenzbereiches von 11 Hertz bis 15 Hertz, in dem der Generator „EHE-V1-1012“ Leistung am Output des Energiemanagements bereitstellt (vgl. Kapitel 6.2, S. 114 f.), Probleme auftraten bzw. im Rahmen praktischer Untersuchungen keine Temperatur- und Feuchtemesswerte mit dem entwickelten energieautarken Sensortransponder aufgezeichnet werden konnten.

Aus der Norm DIN 30786-2 heraus wurde zunächst abgeleitet, dass innerhalb von Seetransporten nicht nur im Frequenzbereich von 0,1 Hertz bis 0,25 Hertz, sondern auch im Frequenzbereich von 6 Hertz bis 20 Hertz signifikante Beschleunigungen zu erwarten sind (vgl. Kapitel 4.1, S. 53). In Bezug auf die eigens auf Ladeeinheitenebene durchgeführten praktischen Untersuchungen musste für den Verkehrsträger Wasser allerdings festgehalten werden, dass die auf dem Markt verfügbaren elektromagnetischen Vibrationsgeneratoren – inklusive des ausgewählten Generators „EHE-V1-1012“, der bereits über die verhältnismäßig geringe Eigenfrequenz von 12,3 Hertz verfügt – zur Energieumwandlung innerhalb von Seetransporten ungeeignet sind. Es ist demnach nicht möglich, wie ursprünglich zur Reduzierung der Gesamtgröße des Zustandsüberwachungssystems angestrebt, nur einen Vibrationsgenerator einzusetzen, der für die Energieumwandlung im Rahmen der Transportprozesse aller drei betrachteten Verkehrsträger geeignet ist. Im Hinblick auf eine poten-



zielle Weiterentwicklung des energieautarken multisensorischen RFID-Transponders bis hin zu einem marktreifen Produkt gilt es daher, für den Verkehrsträger Wasser einen speziellen Generator zu entwickeln, der auf den im Zusammenhang mit der im Kapitel 5.1.2 vollzogenen Spektralanalyse ermittelten sehr niedrigen Frequenzbereich von 0,1 Hertz bis 0,3 Hertz optimiert ist. (vgl. [Sie14a], S. 59)

Betrachtet man das Linienspektrum, das für den Verkehrsträger Schiene ermittelt wurde (siehe **Abbildung 50** auf der Seite 97), so ist zu erkennen, dass der Vibrationsgenerator „EHE-V1-1012“ zur Energieumwandlung im Rahmen von Schienentransporten nicht gänzlich ungeeignet ist, da die Beschleunigungsamplituden innerhalb des relevanten Frequenzbereiches von 11 Hertz bis 15 Hertz hier nur knapp unter denen des Straßentransportes (siehe **Abbildung 49** auf der Seite 96) liegen. Die minimale Beschleunigungsintensität von 0,15 g, die zur Anregung des elektromagnetischen Vibrationsgenerators erforderlich ist, wurde bei der Simulation des Schienentransportes demnach nur knapp unterschritten. ([Sie14a], S. 59)

Aufgrund des Erkenntnisgewinns, dass für den Verkehrsträger Wasser ein spezieller Generator entwickelt werden muss und demnach zur Energieversorgung des Sensortransponders innerhalb von Transportprozessen zwei unterschiedliche Vibrationsgeneratoren benötigt werden, lässt sich aus den **Abbildungen 49 und 50** schließen, dass ein auf die Verkehrsträger Straße und Schiene optimierter elektromagnetischer Vibrationsgenerator zur Energieumwandlung auf Ladeeinheitenebene eine Eigenfrequenz von ca. 115 Hertz aufweisen sollte. Insbesondere im Rahmen von Schienentransporten wäre durch einen solchen Generator das „Ernten“ sehr hoher Energiemengen möglich. ([Sie14a], S. 59)

Eine solche Anpassung der Eigenfrequenz kann bei der Herstellung elektromagnetischer Vibrationsgeneratoren zum Beispiel durch Änderungen der Masse oder der Federsteifigkeit erreicht werden (vgl. [Sch13], S. 43 ff.). Zusätzlich zur Anpassung der Eigenfrequenz ist es für einen im Zusammenhang mit Straßen- und Schienentransporten zum Einsatz kommenden Vibrationsgenerator empfehlenswert, die Frequenzbandbreite, innerhalb derer eine Energieumwandlung möglich ist, im Vergleich zu dem sehr engen Frequenzbereich des untersuchten Generators „EHE-V1-1012“ entsprechend zu vergrößern. Dieses lässt sich bei Vibrationsgeneratoren zum Beispiel durch die Vergrößerung der Dämpfung realisieren ([Sch13], S. 49).

Insgesamt konnte im Rahmen der Laboruntersuchungen die grundsätzliche Funktionsfähigkeit des entwickelten energieautarken multisensorischen RFID-Transponders für Lagerprozesse sowie Transportprozesse des Verkehrsträgers Straße nachgewiesen werden. Bezüglich der Verkehrsträger Schiene und Wasser, bei denen im Hinblick auf die Energieversorgung durch den gewählten elektromagnetischen Vibrationsgenerator Probleme auftraten, wurden darüber hinaus wichtige Handlungsempfehlungen abgeleitet, die es bei der potenziellen Entwicklung eines marktreifen Produktes umzusetzen gilt.

## 7 Wirtschaftlichkeitsanalyse

Neben der technischen Realisierbarkeit gilt es auch die Wirtschaftlichkeit eines potenziellen Praxiseinsatzes energieautarker multisensorischer RFID-Transponder zu bewerten, indem die hierdurch entstehenden Kosten bzw. Aufwendungen dem erzielbaren Nutzen bzw. Ertrag gegenübergestellt werden.

Die VDI-Richtlinie 4472 (Blatt 4) beinhaltet eine standardisierte und strukturierte Vorgehensweise hinsichtlich der Kosten-Nutzenbewertung von RFID-Systemen in der Logistik, die in diesem Zusammenhang als passende Orientierungshilfe dienen kann (vgl. [VDI09], S. 19 ff.).

Dieser Standard wird innerhalb des siebten Kapitels zunächst auf die sehr spezielle und im Hinblick auf ökonomische Aspekte bislang noch nicht im Detail untersuchte Technologie des RFID-Sensortransponders projiziert. Anschließend erfolgt eine exemplarische Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bezüglich der im Rahmen der Funktionsmusterentwicklung (vgl. Kapitel 5) definierten Systemkomponenten, bei der insbesondere der Vergleich der neuartigen Energy-Harvesting-Lösung mit bereits vorhandenen batteriebetriebenen RFID-Sensortranspondern sowie die Gegenüberstellung zur Nullalternative, d. h. der Nicht-Anwendung der Zustandsüberwachungstechnologie in der Distributionskette, im Mittelpunkt stehen.

### 7.1 Kosten-Nutzenbewertung von RFID-Systemen in der Logistik – Allgemeine Vorgehensweise

Um im Zusammenhang mit einer Kosten-Nutzenbewertung fundierte Ergebnisse zu erhalten, auf deren Grundlage ein potenzieller Anwender eine Investitionsentscheidung treffen kann, ist eine systematische Vorgehensweise erforderlich. Ein geeignetes diesbezügliches Vorgehensmodell findet sich in der VDI-Richtlinie 4472 (Blatt 4) in Form einer 6-stufigen Methodik, welche die in der **Abbildung 64** dargestellten und im Folgenden näher erläuterten Teilschritte der Zieldefinition, der Prozess- und Potenzialanalyse, der Systemdimensionierung, der Auswirkungsanalyse, des Business Case sowie der Ergebnisbewertung umfasst und den jeweiligen Anwender individuell bei der ökonomischen Bewertung des Einsatzes von RFID-Systemen in der Logistik unterstützt. (vgl. [VDI09], S. 19 ff.)



Abbildung 64: Vorgehensmodell zur Bewertung des RFID-Einsatzes ([VDI09], S. 20)

## 7.1.1 Zieldefinition

Nach der VDI-Richtlinie 4472 (Blatt 4) ist der erste Schritt zur Bewertung der ökonomischen Auswirkungen eines RFID-Einsatzes in der Definition klarer Zielstellungen zu sehen, die mit der Einführung der neuen Technologie innerhalb eines Unternehmens verfolgt werden, da diese die Basis für die Bestimmung möglicher Systemalternativen sowie die korrekte Interpretation von im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsanalyse erzielten Berechnungsergebnissen darstellen (vgl. [VDI09], S. 19).

Die Ziele, die ein Unternehmen mit der Einführung der RFID-Technologie verbinden kann, sind sehr vielschichtig und unternehmensspezifisch; grundsätzlich lassen sie sich jedoch – wie in der folgenden **Abbildung 65** veranschaulicht – in die drei Ebenen der logistischen Teilziele, der Zwischenziele und der übergeordneten Unternehmensziele einordnen:

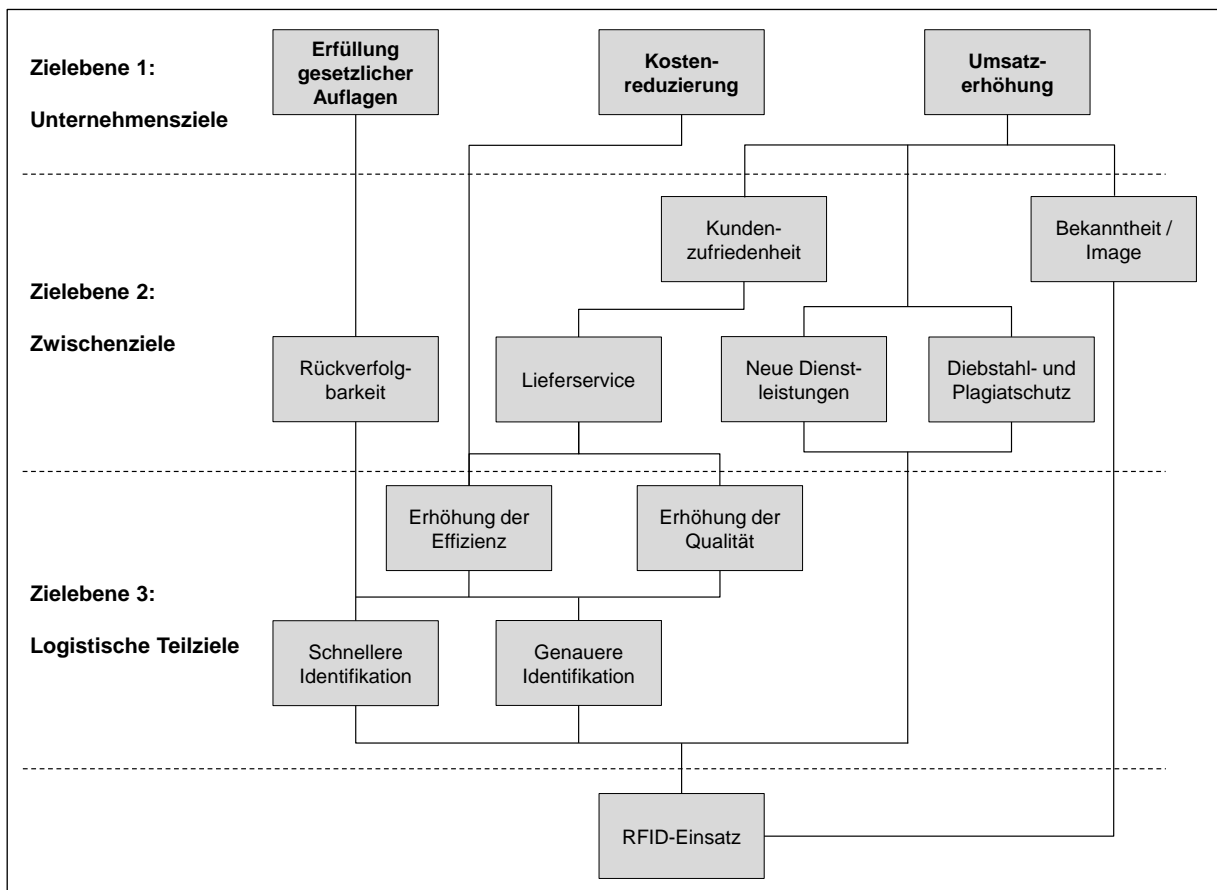


Abbildung 65: Exemplarische Zielhierarchie eines RFID-Einsatzes (i. A. a. [Man06], S. 118)

Wie aus der **Abbildung 65** hervorgeht, sind strategische Unternehmensziele, die regelmäßig im Zusammenhang mit der Implementierung von RFID in einem Unternehmen stehen, z. B. die Kostenreduzierung, die Umsatzerhöhung oder die Erfüllung gesetzlicher Auflagen. Die Generierung eines höheren Umsatzes wird hierbei bspw. durch die Zwischenziele eines verbesserten Lieferservices und der damit in der Regel verbundenen gesteigerten Kundenzufriedenheit erreicht. Das Niveau des Lieferservices wird indessen sehr stark von den logistischen Teilzielen der Prozesseffizienz und -qualität beeinflusst, die durch den Einsatz der RFID-Technologie zu meist eine Optimierung in Form einer schnelleren und genaueren Identifikation erfahren können. (vgl. [Man06], S. 118 ff.)

Bezogen auf den speziellen Einsatz von RFID-Sensortranspondern steht insbesondere die Zielsetzung der Erhöhung der Prozessqualität und -transparenz im Vordergrund, welche neben den oben beschriebenen positiven Auswirkungen auf den Umsatz eines Unternehmens unter anderem zur Reduzierung von Fehlerquellen, zur Eindämmung von Diebstählen, zur Erfüllung gesetzlicher Auflagen, zur Erhöhung

des Bekanntheitsgrades, zur Imagepflege oder zur Erreichung der Technologieführerschaft beitragen kann (vgl. [FSG08], S. 4; [VDI09], S. 19; [Man06], S. 118 ff.).

### 7.1.2 Prozess- und Potenzialanalyse

Der zweite Schritt im Rahmen des Vorgehensmodells zur Kosten-Nutzenbewertung von RFID-Systemen in der Logistik umfasst zunächst eine detaillierte quantitative und qualitative Erfassung von Logistikprozessen ([VDI09], S. 21). In diesem Zusammenhang sind insbesondere die zu betrachtenden Stufen innerhalb einer Distributionskette zu identifizieren sowie die jeweils relevante Ebene der logistischen Einheit<sup>33</sup> zu berücksichtigen (vgl. [Man06], S. 121; [VW08], S. 281).

Ein geeignetes Instrument zur systematischen Erfassung von Logistikprozessen ist die Prozesskettenmethodik, mithilfe derer prinzipiell jeder Prozess abgebildet werden kann und die sich vor allem dadurch auszeichnet, dass die Prozesse der jeweiligen Logistikkette „selbstähnlich“ modelliert werden, das heißt, dass jedes Prozesskettenelement in sich wieder eine Prozesskette birgt, wodurch die Detaillierungstiefe der Modellierung beliebig variiert werden kann ([Kuh95], S. 42 ff.; [Alt09], S. 94). In der **Abbildung 66** werden die Eigenschaft der „Selbstähnlichkeit“ der Prozesskettenmethodik verdeutlicht sowie die einzelnen Modellierungselemente der Quellen, Senken, Prozesskettenelemente, Konnektoren usw. hervorgehoben.

Im Zusammenhang mit der Prozessanalyse sind unter anderem eventuell notwendige Prozessanpassungen, die mit dem effizienten Einsatz von RFID einhergehen, sowie eine mögliche Beschleunigung, Vereinfachung, Qualitätserhöhung oder Substitution einzelner Prozesse bzw. Prozessabläufe unternehmensspezifisch zu erheben. Dieses kann beispielsweise durch mittels der Prozesskettenmethodik durchgeführte Prozessaufnahmen hinsichtlich des IST-Zeitbedarfes oder der IST-Fehlerquote eines Prozesses erfolgen, welche wiederum den Parametern des „RFID-Zeitbedarfes“ bzw. der „RFID-Fehlerquote“, die z. B. im Rahmen von Feldtests ermittelt werden können, gegenübergestellt werden. (vgl. [Man06], S. 120 ff.)

---

<sup>33</sup> Nach [VW08] stellt eine logistische Einheit ein Prozessobjekt bzw. einen physischen Gegenstand dar, an welchem ein RFID-Transponder appliziert werden kann ([VW08], S. 280 f.). Innerhalb dieser Arbeit gilt es diesbezüglich zwischen den im Kapitel 2.1 (S. 9 f.) definierten Zustandsüberwachungsebenen der Laderaum-, Ladeeinheiten-, Transportverpackungs- und Produktverpackungsebene zu unterscheiden.

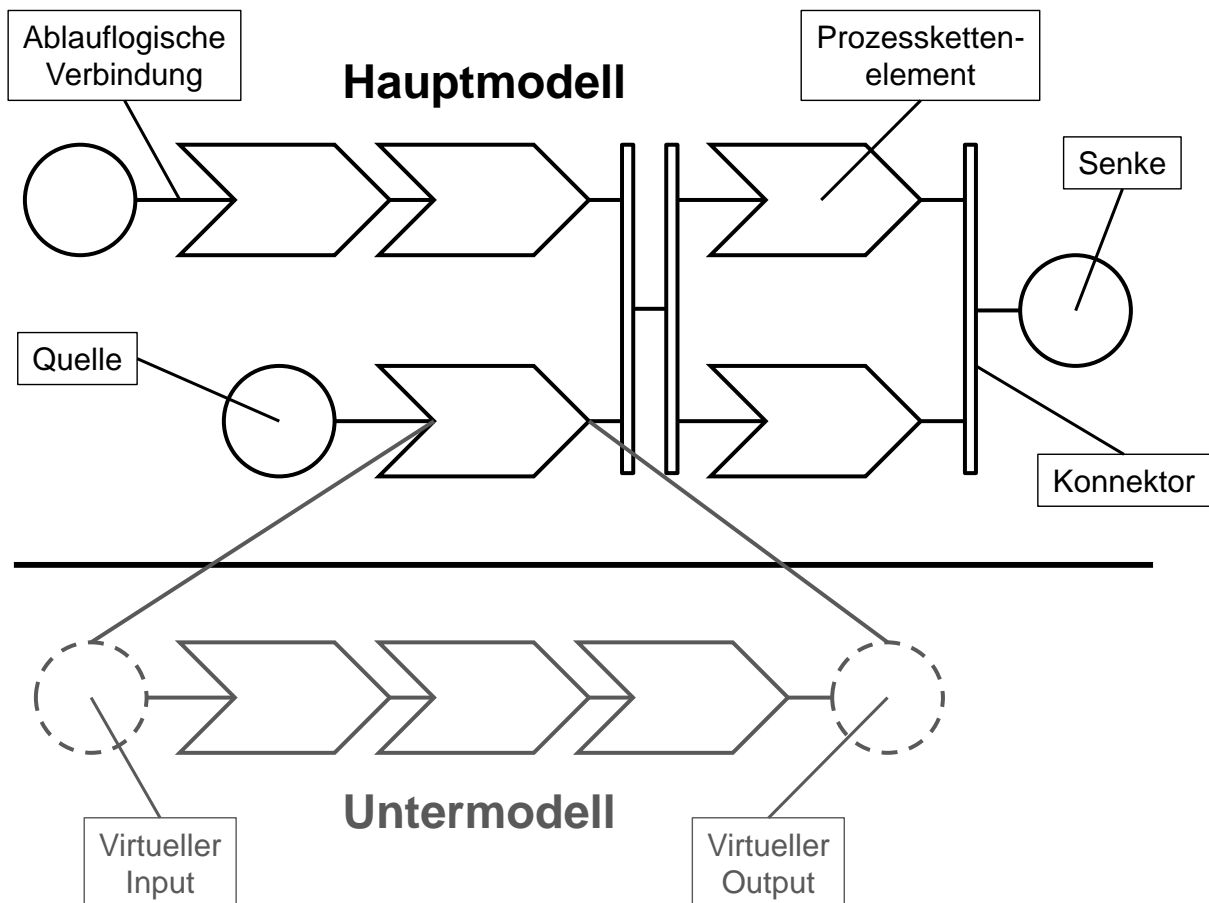


Abbildung 66: Elemente der Prozesskettenmethodik (i. A. a. [Alt09], S. 94 f.)

Die Potenzialanalyse beinhaltet die Analyse und Bewertung der Auswirkungen bzw. Nutzenpotenziale eines RFID-Einsatzes in der Logistik, wobei zwischen Prozess- und Netzwerkeffekten unterschieden werden kann. Die lokal auftretenden Prozesseffekte und die Netzwerkeffekte sind hierbei untereinander durch Interdependenzen gekennzeichnet, die sich – wie in der **Abbildung 67** zu sehen – durch Ursache-Wirkungsbeziehungen ausdrücken lassen. ([VDI09], S. 5)

Wie in der **Abbildung 67** zu erkennen ist, können beide Auswirkungsbereiche über einen optimierten Lieferservice, eine erhöhte Warenverfügbarkeit und / oder eine gesteigerte Kundenzufriedenheit unmittelbare Auswirkungen auf den Kunden und dadurch mittelbaren, aber auch – zum Beispiel durch eine Reduzierung der Logistikkosten – unmittelbaren Einfluss auf die finanzielle Ertragslage eines Unternehmens haben (vgl. [Man06], S. 59).

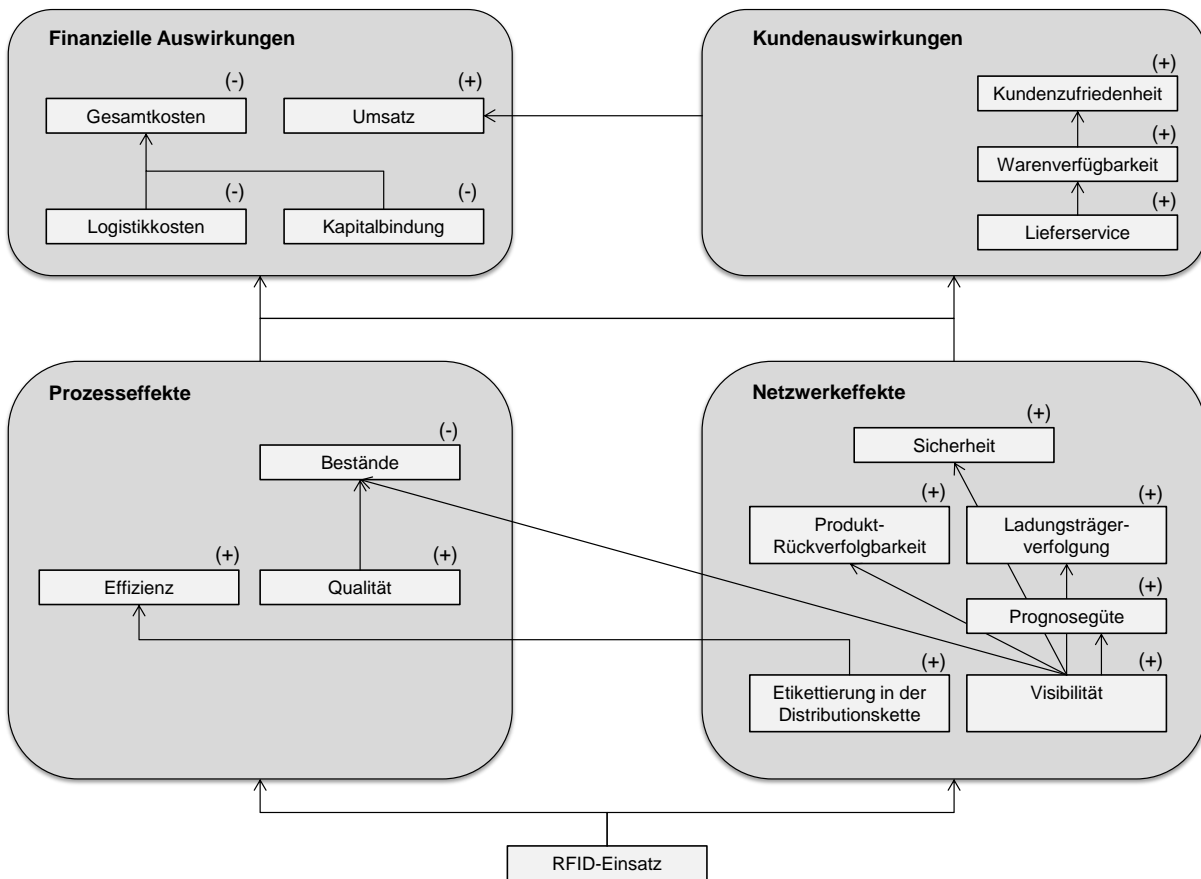


Abbildung 67: Ursache-Wirkungskette des RFID-Einsatzes in der Logistik ([VDI09], S. 5)

Eine Methodik zur quantitativen Bewertung von Prozesseffekten ist z. B. die auf der Prozesskettenmethodik basierende Prozesskostenrechnung, die im Kapitel 7.2.1.2 (S. 135 ff.) dieser Arbeit näher beschrieben wird. Instrumente, die in Ergänzung hierzu eine qualitative Bewertung ermöglichen, sind beispielsweise die Nutzwertanalyse (vgl. Kapitel 7.2.1.3, S. 138 f.) oder die Netzwerk-Balanced Scorecard (vgl. Kapitel 7.2.1.5, S. 140 ff.), die speziell für auf Kooperationen basierende Unternehmensnetzwerke entwickelt wurde und mittels derer zudem Netzwerkeffekte Berücksichtigung finden können (vgl. [Sch10d], S. 182 f.).

### 7.1.3 Systemdimensionierung

Innerhalb des Arbeitsschrittes der Systemdimensionierung ist es erforderlich, die Ausprägung des RFID-Systems sowohl unter der Berücksichtigung unternehmensspezifischer Präferenzen als auch in Abhängigkeit des in der jeweiligen Branche bevorzugten Systems oder Frequenzbereiches festzulegen sowie die damit verbundenen Kosten zu ermitteln ([VDI09], S. 21).



Die Kosten eines RFID-Projektes lassen sich in die drei Phasen der Planung, der Realisierung und des Betriebs unterteilen, wobei jeweils Sachmittel- und Personalkosten auftreten können. In der Planungsphase fallen beispielsweise Kosten für die Beschaffung von Informationen, die System- bzw. Herstellerselektion oder die eventuelle Inanspruchnahme von externen Beratungsleistungen an. Die Realisierungsphase umfasst in erster Linie die Investitionen, die für den Systembetrieb notwendig sind, wobei in diesem Zusammenhang unter anderem Kosten für die Schnittstellenprogrammierung und Systemimplementierung, für Mitarbeiterschulungen sowie für die Beschaffung von Datenträgern<sup>34</sup>, Serversystemen, Antennensystemen und Readersystemen entstehen. In der Betriebsphase treten Kosten zum Beispiel in Form von eventuell notwendigen Ersatzinvestitionen, Kosten für die Wartung und Instandhaltung von Hard- und Software, Energiekosten oder Kosten für die wiederkehrende Beschaffung von Einwegdatenträgern auf. ([Man06], S. 52 ff.)

Die bei der Implementierung und dem Betrieb eines RFID-Systems entstehenden Kosten hängen hierbei sehr stark mit der Zieldefinition zusammen, aus der u. a. die Anzahl der Identifikationspunkte, die Anzahl der einbezogenen Partner, die Ebene der logistischen Einheit sowie das zu verwendende RFID-System hervorgehen. Weiterhin werden die Kosten bzw. die Anzahl der benötigten RFID-Komponenten wesentlich durch das jeweilige Mengengerüst der bzw. des Anwender(s) beeinflusst. ([VDI09], S. 21 f.)

Bei einer retrospektiven Evaluation der Wirtschaftlichkeit, d. h. einer projektbegleitenden oder nachträglichen Wirtschaftlichkeitsberechnung, bei der in erster Linie die Kontrolle der Zielerreichung, die Rechtfertigung der Projektkosten oder die Ableitung von Entscheidungsregeln für zukünftige Investitionen im Mittelpunkt stehen, liegen die hinter den oben genannten Kostengruppen stehenden Zahlenwerte in der Regel vor (vgl. [Gil10], S. 15; [VDI09], S. 22). Bei einer prospektiven bzw. einer im Vorfeld eines Projektes zu vollziehenden Evaluation der Wirtschaftlichkeit, die vor allem die Vorbereitung und Unterstützung von Entscheidungen in Bezug auf einen RFID-Einsatz zum Ziel hat, stehen hingegen keine konkreten Zahlenwerte zur Verfügung,

---

<sup>34</sup> Die für die Datenträger anfallenden Kosten sind nur dann als Investition zu behandeln, wenn es sich um Mehrwegtransponder handelt, wobei in diesem Fall Transponderkosten und Umlaufkosten unterschieden werden, die jeweils auf die Anzahl der Umläufe pro Transponder bzw. pro Jahr umgelegt werden. Kommen Einwegtransponder zum Einsatz, so sind diese der Betriebsphase bzw. den Betriebskosten zuzuordnen, da sie wiederkehrend neu zu beschaffen sind. ([Man06], S. 55)

was dazu führt, dass häufig Schätzungen hinsichtlich der voraussichtlich auftretenden Kosten in Anlehnung an vergleichbare Projekte als Datenbasis herangezogen werden (vgl. [Gil10], S. 14; [VDI09], S. 22). Hiermit gehen wiederum Unsicherheiten einher, die es im Rahmen des Vorgehensmodells bei der im sechsten Schritt durchzuführenden Ergebnisbewertung (vgl. Kapitel 7.1.5, S. 131 ff.) in Form einer Sensitivitätsanalyse zu berücksichtigen gilt (vgl. [Man06], S. 31).

### 7.1.4 Auswirkungsanalyse und Business Case

Der vierte Schritt des Vorgehensmodells zur Kosten-Nutzenbewertung von RFID-Systemen in der Logistik beinhaltet eine Auswirkungsanalyse, mithilfe derer ermittelt werden kann, in welchen Bereichen welche Veränderungen zu erwarten sind. Auf diese Weise können für den Fall, dass die mit dem RFID-Einsatz angestrebten Effekte im Zusammenhang mit verschiedenen Prozessen ausbleiben<sup>35</sup>, bereits zu diesem Zeitpunkt z. B. eine Korrektur der Systemdimensionierung oder die Erstellung eines neuen Szenarios erfolgen. ([VDI09], S. 22)

Ein Business Case repräsentiert ein Szenario zur betriebswirtschaftlichen Bewertung einer Investition. Bei der Erstellung eines Business Case werden sämtliche Kostenfaktoren und Nutzenaspekte eines spezifischen Projektes für einen festgelegten Zeitraum von zumeist fünf oder zehn Jahren erhoben, quantifiziert, dokumentiert und einander gegenübergestellt. Bezüglich der voraussichtlichen Projektkosten sowie der zu erwartenden Ertragsauswirkungen und Kosteneinsparungen gilt es in diesem Zusammenhang Annahmen bzw. Abschätzungen zu treffen, die idealerweise auf detaillierten Planungen in Bezug auf die Gesamtkosten sowie einer Faktensammlung und -analyse hinsichtlich der möglichen Nutzenaspekte basieren. ([Bru09], S. 11 f.)

Auf der Grundlage der getroffenen Annahmen bzw. Abschätzungen ist anschließend eine Analyse der Zahlungsreihe über den relevanten Betrachtungszeitraum zu vollziehen ([VDI09], S. 22 f.). Diese kann bspw. mittels klassischer Verfahren der betriebswirtschaftlichen Investitionsrechnung wie der Kapitalwertmethode (vgl. Kapitel

---

<sup>35</sup> An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass die einzelne Auswirkung immer im Gesamtkontext zu bewerten ist. Beispielsweise kann die Auswirkung in einem Prozessschritt weniger stark ausgeprägt sein, der Einsatz der Technologie in diesem Bereich jedoch die Bedingung für eine Auswirkung in einem späteren Prozessschritt darstellen. ([Man06], S. 125)

7.2.2.1, S. 143 f.) oder der Amortisationsrechnung (vgl. Kapitel 7.2.2.2, S. 144 f.) erfolgen und ermöglicht z. B. die Beantwortung der folgenden Fragen:

- Wie hoch sind die erforderlichen Anfangsinvestitionen des Projektes?
- In welcher Höhe treten pro Periode zusätzliche Kosten auf?
- Welche durchschnittlichen Ergebnisbeiträge gewährleistet ein RFID-Einsatz?
- Wie hoch sind der barwertige und der endwertige Überschuss der Investition?
- Welche Rendite ist über den Betrachtungszeitraum zu erwarten?
- Wie hoch fällt die durchschnittliche Rentabilität pro Periode aus?
- Nach welcher Zeitdauer amortisieren sich die Anfangsinvestitionen zuzüglich der laufenden Betriebskosten? ([Man06], S. 126)

Durch eine kombinierte Verwendung der unterschiedlichen Kennzahlen können aus den Ergebnissen der Leistungsverrechnung konzentrierte Aussagen abgeleitet werden, die einen ersten Überblick über die ökonomische Vorteilhaftigkeit einer Investition geben bzw. als Entscheidungshilfe dienen können ([VDI09], S. 23).

Im Hinblick auf die Vorteilhaftigkeit einer Investition sind hierbei grundsätzlich die absolute und die relative Vorteilhaftigkeit zu unterscheiden. Ist eine Durchführungsentscheidung in Bezug auf eine Einzelinvestition zu treffen, so ist die Bestimmung der absoluten Vorteilhaftigkeit bzw. eindeutiger Kennzahlen erforderlich, die eine klare Aussage dahingehend ermöglichen, ob ein Projekt wirtschaftlich sinnvoll ist oder nicht. Die Ermittlung der relativen Vorteilhaftigkeit einer Investition ist indessen bei zu fällenden Auswahlentscheidungen von Relevanz, d. h. es werden Kennzahlen bereitgestellt, mit deren Hilfe ein Vergleich unterschiedlicher Handlungsalternativen erfolgen kann. ([Bru09], S. 14)

### **7.1.5 Ergebnisbewertung**

Innerhalb der VDI-Richtlinie 4472 (Blatt 4) wird empfohlen, in einem letzten Schritt der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung eine Sensitivitätsanalyse durchzuführen, mithilfe derer ermittelt werden kann, wie sich das erzielte Ergebnis bei der Variation verschiedener Parameter verändert. Dieser Arbeitsschritt ist erforderlich, da die Darstellung der Ergebnisse einer Investitionskostenrechnung aufgrund der zumeist nicht

ausreichenden Berücksichtigung vorhandener Projektrisiken dem Anspruch einer fundierten Beurteilung einer potenziellen Investition in vielen Fällen nicht gerecht wird. (vgl. [VDI09], S. 23)

Unterschieden nach Projektphasen können bei einem RFID-Projekt in der Planungsphase bspw. Risiken in Form einer Fehleinschätzung der Technologiepotenziale oder einer Unterschätzung technologischer Restriktionen auftreten. In der Realisierungsphase bestehen wiederum die Risiken, dass die Projektkosten – z. B. aufgrund einer sehr komplexen Systemintegration – höher ausfallen als ursprünglich angenommen oder die Technologie auf eine fehlende Akzeptanz bei den Mitarbeitern stößt. Mögliche Projektrisiken, die mit dem Betrieb der RFID-Technologie in einem Unternehmen verbunden sein können, sind zum Beispiel der Verlust oder die mangelnde Funktionsfähigkeit der eingesetzten Datenträger, eine ausbleibende Umsatzsteigerung oder die Unterschreitung des für den Technologieeinsatz kritischen Mengenvolumens. ([Man06], S. 128 f.)

Um diese Unsicherheiten im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsanalyse zu berücksichtigen, existieren beispielsweise die im Folgenden aufgeführten Verfahren der Sensitivitätsanalyse, auf die innerhalb des Kapitels 7.2.3 näher eingegangen wird:

- Kritische-Werte-Rechnung
- Dreifachrechnung
- Zielgrößenänderungsrechnung ([Pog15], S. 264)

Neben der Berücksichtigung potenzieller Projektrisiken gilt es im Rahmen der Bewertung der erzielten Berechnungsergebnisse insbesondere die unternehmensspezifischen Ziele, die mit dem Einsatz der RFID-Technologie verfolgt werden, einzubeziehen. Diesbezüglich sollte zunächst auf der Grundlage der Ergebnisse der Investitionsrechnung hinterfragt werden, ob die im Zusammenhang mit der Zieldefinition festgelegten Unternehmensziele erreicht werden können und darüber hinaus die möglichen Auswirkungen bei einer Unterlassung oder Verschiebung des Projektes bzw. der Investition bedacht werden. Nicht realisierte Kosteneinsparungen oder Umsatzsteigerungen haben in diesem Zusammenhang zwar keine direkte Auswirkung auf den Ertrag eines Unternehmens, jedoch können nicht verwirklichte Rationalisie-

rungspotenziale mittel- bis langfristig zu einem Wettbewerbsnachteil führen. ([VDI09], S. 24)

## **7.2 Bestehende Ansätze der Wirtschaftlichkeitsanalyse**

Zur Durchführung der zuvor beschriebenen Arbeitsschritte des Vorgehensmodells zur Wirtschaftlichkeitsanalyse von RFID-Systemen in der Logistik sind vorhandene Methoden zur Kosten- und Nutzenbewertung, zur betriebswirtschaftlichen Bewertung von Investitionen sowie zur Berücksichtigung von Investitionsunsicherheiten in Kombination anzuwenden, da kein einzelnes Verfahren existiert, das dieser komplexen Aufgabe in vollem Umfang gerecht wird (vgl. [Gil10], S. 75 f.).

Ausgewählte Ansätze, die in diesem Kontext über eine Relevanz verfügen, werden im Folgenden in komprimierter Form beschrieben und bezüglich ihrer Eignung zur speziellen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des potenziellen Praxiseinsatzes energieautarker multisensorischer RFID-Transponder bewertet.

Insgesamt sollten im Rahmen einer solchen Wirtschaftlichkeitsanalyse die folgenden elementaren Anforderungen erfüllt werden:

- Ex-ante-Bewertung
- Evaluation der Investitionskosten
- Objektivität der Bewertung
- Transparenz der Berechnung
- Evaluation der Leistungen einer Investition
- Berücksichtigung monetärer Faktoren
- Ermittlung der absoluten Vorteilhaftigkeit
- Berücksichtigung der Investitionsunsicherheit
- Einbeziehung dynamischer Elemente
- Berücksichtigung qualitativer Faktoren (vgl. [Man06], S. 28 ff.; [Gil10], S. 75)

## **7.2.1 Methoden zur Kosten- und Nutzenbewertung**

Im zweiten Schritt des Vorgehensmodells zur Wirtschaftlichkeitsanalyse von RFID-Systemen gilt es im Rahmen einer Potenzialanalyse, die Nutzenpotenziale eines RFID-Einsatzes – unterschieden nach Prozess- und Netzwerkeffekten – quantitativ und qualitativ zu bewerten (vgl. Kapitel 7.1.2, S. 126 ff.). Des Weiteren ist innerhalb des dritten Schrittes eine Systemdimensionierung zu vollziehen, d. h. es sind sämtliche Kosten zu bestimmen, die mit der Einführung und dem Betrieb eines definierten Zielsystems verbunden sind (vgl. Kapitel 7.1.3, S. 128 ff.).

Bezüglich der Kosten- und Nutzenbewertung von Investitionen existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Methoden, von denen eine Auswahl im Folgenden zunächst kurz vorgestellt und anschließend kritisch bewertet wird.

### **7.2.1.1 Total Cost of Ownership**

Der Total Cost of Ownership (TCO)-Ansatz ist ein Controlling-Instrument, das in den achtziger Jahren von der Gartner Incorporated speziell zur Erfassung der Gesamtkosten von IT-Investitionen entwickelt wurde, das heißt, es werden sowohl der Anschaffungsaufwand als auch die im laufenden Betrieb entstehenden Kosten in die Analyse einbezogen (vgl. [GW08], S. 259; [Gil10], S. 55; [Man06], S. 38).

Die in den verschiedenen Projektphasen anfallenden Kosten werden hierbei grundsätzlich in direkte Kosten, die zum Beispiel für die Beschaffung und Anwendung von Hard- und Software, das operative Management oder Verwaltungsaufgaben aufgewendet werden müssen, sowie indirekte Kosten, die beispielsweise in Form von Schulungsmaßnahmen oder etwaigen Ausfallzeiten auftreten, unterteilt (vgl. [WH00], S. 12 ff.).

Die umfassende Analyse sämtlicher mit einer IT-Investition einhergehender Kosten und die damit zusammenhängende weitgehende Kostentransparenz ermöglicht in vielen Fällen das Ableiten von Maßnahmen zur Prozessverbesserung und Kostensenkung; die Evaluation der Leistungen einer Investition werden beim TCO-Ansatz hingegen konsequent ausgeklammert, was wiederum den Hauptkritikpunkt an dieser Methode darstellt (vgl. [Man06], S. 38 f.; [Gil10], S. 57; [WH00], S. 27).

Da sich die grundlegenden Kostenkategorien des TCO-Ansatzes jedoch sehr gut auf RFID-Systeme übertragen lassen, hat diese Methode im Kontext der Wirtschaftlichkeitsanalyse von RFID-Anwendungen im Hinblick auf eine objektive, transparente und ex ante erfolgende Evaluation der Investitionskosten bereits Einzug in die Praxis gefunden (vgl. [Gil10], S. 58 ff.; [Stra05], S. 143).

Aufgrund der einseitigen Fokussierung auf die Kostenerfassung eignet sich eine ausschließliche Verwendung des TCO-Ansatzes allerdings nicht zur Begründung strategischer Entscheidungen ([Stra05], S. 144). Vielmehr sollte die TCO-Methode in diesem Zusammenhang von Verfahren der Leistungsquantifizierung wie z. B. der Prozesskostenrechnung (vgl. Kapitel 7.2.1.2, S. 135 ff.) flankiert sowie in ein übergeordnetes Bewertungskonzept wie z. B. die Kapitalwertmethode (vgl. Kapitel 7.2.2.1, S. 143 f.) eingebettet werden ([Gil10], S. 59).

### 7.2.1.2 Prozesskostenrechnung

Die auf der Prozesskettenmethodik (vgl. Kapitel 7.1.2, S. 126 ff.) basierende Prozesskostenrechnung (PKR) wurde Mitte der achtziger Jahre mit dem Ziel der Bereitstellung einer transparenten und verursachungsgerechten Kostenrechnung konzipiert (vgl. [Pul09], S. 128). Im RFID-Kontext wird dieses Verfahren jedoch in erster Linie als ein der Investitionsrechnung vorgelagertes Instrument zur Leistungsprognose genutzt, mit dessen Hilfe positive Zahlungsströme (Einzahlungen) berechnet werden können, die im Zuge einer Investition in die RFID-Technologie z. B. in Form von Prozesskostenreduktionen realisiert werden können ([Gil10], S. 59).

Die Hauptaufgabe der logistischen PKR „...ist die Erfassung, Zuordnung und angemessene Verrechnung der Logistikkosten und -leistungen auf die Kostenträger...“ ([Pul09], S.128). Dabei stellt die PKR allerdings „...kein völlig neues, alternatives Kostenrechnungssystem...“ dar, sondern ist als Ergänzung der „klassischen“ Kostenrechnungssysteme zu verstehen, wobei auf der Kostenarten- und Kostenstellenrechnung aufgebaut wird (vgl. [Rau10], S. 167; [Bro08], S. 144; [Web12], S. 54 f.; [HHU11], S. 47; [Pul09], S. 128). Dieser Zusammenhang wird in der folgenden **Abbildung 68** veranschaulicht:

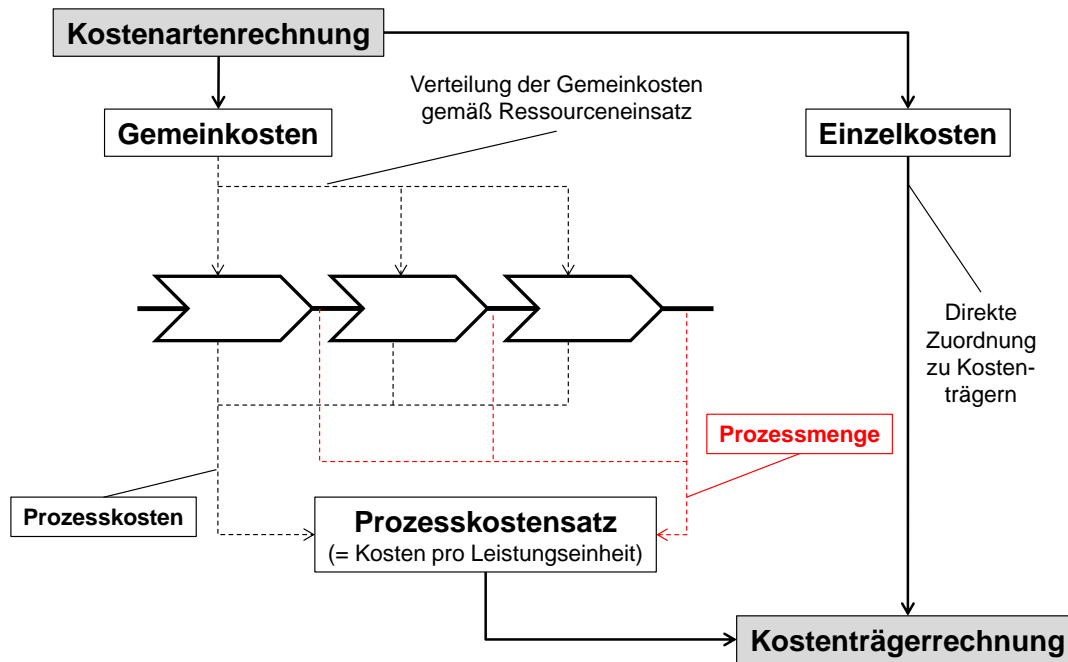


Abbildung 68: Grundlegende Struktur der Prozesskostenrechnung (i. A. a. [Pul09], S. 129)

Die zentralen Bezugs- und Betrachtungsobjekte bei der PKR sind die im Betrieb ablaufenden Prozesse, wobei unter einem Prozess eine Kette von Aktivitäten verstanden wird, die auf die Erbringung eines Leistungsoutputs gerichtet ist (vgl. [Rau10], S. 168; [Bro08], S. 145). Ein Prozess ist gekennzeichnet durch den bereits erwähnten Leistungsoutput, Qualitätsmerkmale, eine Ressourceninanspruchnahme (bewertet in Kosten), einen Kosteneinflussfaktor (dieser gilt zugleich als Basis für die Anzahl der Prozessdurchführungen) und analysierbare Durchlauf- bzw. Bearbeitungszeiten ([Bro08], S. 145). Unterschieden wird hierbei zwischen Teilprozessen, die innerhalb einer Kostenstelle ablaufen, und Hauptprozessen, deren Durchführung abteilungsübergreifend stattfindet ([Rau10], S. 168). Ein Beispiel für eine logistische Prozessbetrachtung ist in der nachfolgenden **Abbildung 69** aufgeführt:

<u>Hauptprozess:</u>	<u>Teilprozesse:</u>	<u>Kostenstellen:</u>
- Materialbeschaffung	- Material disponieren	- Arbeitsvorbereitung
	- Materialeinkauf	- Einkauf
	- Materialannahme	- Wareneingang
	- Eingangsprüfung	- Qualitätssicherung
	- Materiallagerung	- Lager

Abbildung 69: Beispielhafte Betrachtung eines logistischen Prozesses (i. A. a. [HHU11], S. 48)



Für die durchgängige Betrachtung von Prozessen sowie die Darstellung, wo und wodurch Kosten entstehen, sind zur Erarbeitung von konkreten Haupt- und Teilprozessen nach [HHU11] Prozessanalysen in den folgenden Arbeitsschritten durchzuführen:

1. Ermittlung der an den Hauptprozessen beteiligten Kostenstellen (Identifikation der Prozesse für repetitive Aufgaben)
2. Tätigkeitsanalyse der Kostenstellen und Definition von Teilprozessen
3. Ermittlung der Kostenbestimmungsfaktoren (Messgröße / Bezugsgröße / Prozessmengen) mit denen sich der Output der Kostenstellenleistung quantifizieren lässt
4. Verdichtung zu optimierten Hauptprozessen
5. Zuordnen der Kostenarten und Ermitteln der Kostensätze für die einmalige Durchführung eines definierten Prozesses ([HHU11], S. 49)

Des Weiteren sind die Prozesse daraufhin zu untersuchen, ob sie von dem in der Kostenstelle zu erbringenden Leistungsvolumen abhängig, das heißt mengenvariabel oder davon unabhängig, das heißt mengenfix sind ([HHU11], S.49). Diesbezüglich wird im Rahmen der Prozesskostenrechnung zwischen leistungsmengeninduzierten Prozessen und leistungsmengenneutralen Prozessen unterschieden (vgl. [Bro08], S.146; [Rau10], S.168; [HHU11], S.49).

Für leistungsmengenneutrale Prozesse lassen sich in diesem Zusammenhang keine Maßgrößen ermitteln; die Kosten für leistungsmengeninduzierte Prozesse hingegen werden im Rahmen einer prozessorientierten Kalkulation über die Prozesskostensätze verrechnet, wodurch eine verursachungsgerechte Umverteilung der Kosten erreicht wird. Die Kosten, die hierbei nicht neu verteilt werden können, werden allerdings weiterhin über Zuschlagssätze verrechnet. ([HHU11], S.49)

Die Verrechnung der leistungsmengeninduzierten sowie der leistungsmengenneutralen Kosten wird in der folgenden **Abbildung 70** übersichtlich dargestellt:

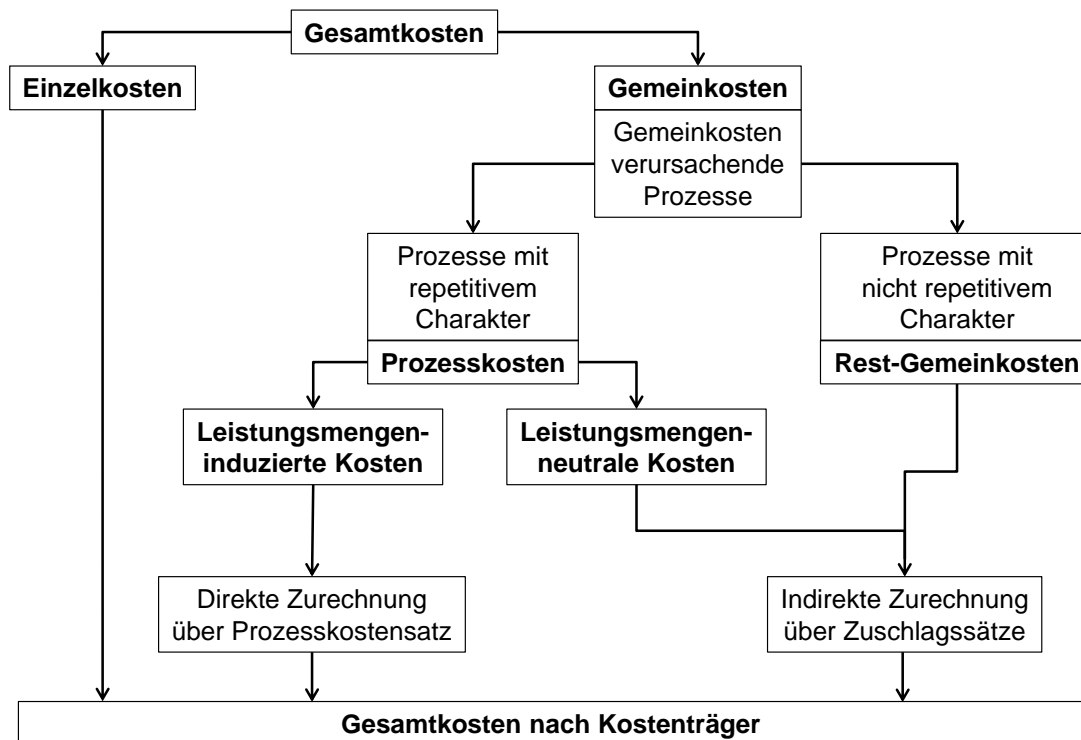


Abbildung 70: Verrechnung der leistungsmengeninduzierten und leistungsmengenneutralen Kosten (i. A. a. [HHU11], S. 50)

Mittels der PKR können im Rahmen einer Ex-ante-Bewertung sowohl Kosten als auch Leistungen bzw. Nutzeneffekte auf Prozessebene objektiv, transparent und verursachungsgerecht ermittelt werden (vgl. [Man06], S. 40 ff.). Bei der Quantifizierung von Nutzeneffekten, die durch Qualitätssteigerungen wie z. B. eine verbesserte Liefertreue begründet sind, stößt die PKR jedoch an ihre Grenzen, da qualitative Faktoren bei diesem Kostenrechnungsverfahren keine Berücksichtigung finden (vgl. [Gil10], S. 64 f.; [Man06], S. 43).

### 7.2.1.3 Nutzwertanalyse

Eine Methode zur Bewertung unterschiedlicher Investitionsalternativen, bei der die Einbeziehung qualitativer Faktoren im Mittelpunkt steht, ist die Nutzwertanalyse (NWA), die definiert wird als „...die Analyse einer Menge komplexer Handlungsalternativen mit dem Zweck, die Elemente dieser Menge entsprechend den Präferenzen des Entscheidungsträgers bezüglich eines *multidimensionalen* Zielsystems zu ordnen“ ([Zan14], S. 45). Die Ordnung erfolgt hierbei in Abhängigkeit von den für die gegenübergestellten Alternativen berechneten Nutzwerten (vgl. [Zan14], S. 45). Bei

der Durchführung einer Nutzwertanalyse sind im Einzelnen die folgenden Schritte zu durchlaufen:

1. Ermittlung aller zu bewertender Investitionsprojekte
2. Bestimmung der relevanten Zielkriterien
3. Gewichtung der Zielkriterien
4. Bestimmung der Zielerreichung je Investitionsprojekt und Zielkriterium
5. Berechnung der Nutzwerte je Investitionsprojekt
6. Auswahl der Investitionsalternative mit dem höchsten Nutzwert ([Pog15], S. 183)

Die NWA erlaubt eine umfassende prospektive Evaluation von Technologieinvestitionen unter der gleichzeitigen Berücksichtigung von sowohl Kosten- als auch Nutzeffekten ([Gil10], S. 68). Diese Bewertung basiert allerdings auf einem nicht-finanziellen Punktesystem, wodurch lediglich eine Bestimmung der relativen Vorteilhaftigkeit bei der Gegenüberstellung von mindestens zwei Investitionsalternativen ermöglicht wird (vgl. [Gil10], S. 68 f.). Die eigentliche Schwachstelle der NWA ist jedoch in den Arbeitsschritten der Gewichtung der Zielkriterien sowie der Bestimmung der Zielerreichung je Investitionsprojekt und Zielkriterium zu sehen, da sich hierdurch ein hoch subjektives Bewertungsergebnis ergibt (vgl. [Pog15], S. 182 f.).

Im Zusammenhang mit der Bewertung von RFID-Anwendungen lässt sich die NWA demnach als ein auf der einen Seite zwar umfangreiches (es ist die Berücksichtigung verschiedener Kosten- und Nutzeneffekte möglich), auf der anderen Seite hingegen hoch subjektives und nicht-finanzielles Quantifizierungskonzept einordnen, welches zur Strukturierung eines Entscheidungsproblems sowie zur Vorselektion von Investitionsalternativen geeignet ist, nicht jedoch als alleiniges Instrument zur Entscheidungsfindung ([Gil10], S. 71).

#### **7.2.1.4 Key Performance Indicators**

Im Rahmen des Konzeptes der Key Performance Indicators (KPI) wird die Abbildung wesentlicher Faktoren für spezifische Unternehmensbereiche mittels quantitativer Größen angestrebt, wobei die Reduktion auf wenige Kennzahlen dazu beitragen soll,

einen quantifizierbaren Stand einer Unternehmenseinheit in kurzer Zeit zu ermitteln (vgl. [Sch06], S. 302).

Eine im Logistikkontext verbreitet eingesetzte Kennzahlensammlung findet sich in der VDI-Richtlinie 4400 (Blatt 3), innerhalb derer standardisierte Kennzahlen bezüglich des für die vorliegende Arbeit relevanten Bereiches der Distributionslogistik bereitgestellt werden. Bei den in der Richtlinie angegebenen Logistikkennzahlen wird grundsätzlich zwischen Leistungs-, Kosten- und Strukturkennzahlen unterschieden. Als Leistungskennzahlen sind z. B. die mittlere Durchlaufzeit im Warenausgang, der Servicegrad, die Liefertreue oder die Reklamationsquote definiert. Unter Kostenkennzahlen werden bspw. die bewertete Umschlagshäufigkeit oder die mittleren Kosten des Transportes pro Warensendung verstanden, während der Kategorie der Strukturkennzahlen u. a. der Fremdtransportanteil oder die mittlere Transportzeit je Warensendung zugeordnet werden. (vgl. [VDI02])

Eine kennzahlenbasierte Wirtschaftlichkeitsanalyse verfügt über vielfältige Ausgestaltungsmöglichkeiten, wobei im Zusammenhang mit RFID-Pilotprojekten mithilfe des KPI-Konzeptes zumeist eine nicht-finanzielle, im Vergleich zur Nutzwertanalyse jedoch objektivere<sup>36</sup> Quantifizierung von Nutzenpotenzialen verfolgt wird, die z. B. auf der Grundlage von Feldversuchen oder Simulationsstudien erfolgt. Da eine finanzielle Bewertung von Nutzenpotenzialen sowie eine Berücksichtigung von Investitionskosten bei KPI-Analysen i. d. R. jedoch nicht stattfinden, ist diese Methodik im Hinblick auf eine RFID-Wirtschaftlichkeitsanalyse als partielles Verfahren einzuordnen, das ausschließlich zur Unterstützung bei der Bestimmung der relativen Vorteilhaftigkeit mehrerer Investitionsalternativen geeignet ist. (vgl. [Gil10], S. 74)

### 7.2.1.5 Netzwerk-Balanced Scorecard

Die Balanced Scorecard (BSC) stellt im Allgemeinen eine Mischform aus finanziell orientierten Verfahren der betriebswirtschaftlichen Investitionsrechnung wie bspw. der Kapitalwertmethode (vgl. Kapitel 7.2.2.1, S. 143 f.) und nicht-finanziellen Ansätzen wie z. B. der NWA oder des KPI-Konzeptes dar und ermöglicht dabei die Einbeziehung sowohl monetärer als auch qualitativer Erfolgsfaktoren, wobei die Hauptauf-

---

<sup>36</sup> Das KPI-Konzept gewährleistet eine Objektivität bezüglich der Messung von Einzelindikatoren. Hinsichtlich der Auswahl der Indikatoren ist es allerdings als potenziell subjektiv einzustufen. (vgl. [Gil10], S. 75)

gabe dieses Konzeptes insbesondere darin besteht, vorgegebene Unternehmensstrategien begreiflich zu machen, zu manifestieren, zu kommunizieren und operativ umzusetzen (vgl. [BKS<sup>+</sup>11], S. 58; [KN96], S. 19).

In ihrer ursprünglichen Form umfasst die BSC die Finanzperspektive, die Kundenperspektive, die interne Prozessperspektive sowie die Innovations- und Lernperspektive, die zu gleichen Teilen in die strategische Entscheidungsfindung eines Unternehmens einfließen (vgl. [KN92], S. 71 ff.). Für die vier Perspektiven werden hierbei jeweils finanzielle und nicht-finanzielle Kennzahlen sowie Zielgrößen bzw. Soll-Werte formuliert, die Ist-Werten gegenübergestellt werden. Dabei sind einzelne Kennzahlen intra- und interperspektivisch durch quantitative Interdependenzen bzw. Wirkungsketten miteinander verbunden. (vgl. [Gil10], S. 72)

Die zuvor beschriebene klassische BSC wurde Anfang der neunziger Jahre entwickelt und daraufhin in den vergangenen Jahrzehnten in vielfältiger Art modifiziert. Eine passende Modifikation für den im Rahmen dieser Arbeit hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit zu untersuchenden speziellen Anwendungsfall der Zustandsüberwachung von Distributionsketten mittels des Einsatzes energieautarker RFID-Sensortransponder repräsentiert die Netzwerk-Balanced Scorecard (NBSC), die speziell für auf Kooperationen basierende Unternehmensnetzwerke konzipiert wurde (vgl. Kapitel 7.1.2, S. 128).

Die NBSC wurde gegenüber der ursprünglichen BSC sowohl inhaltlich als auch strukturell angepasst, um den Anforderungen an ein unternehmensübergreifendes Controlling-Instrument gerecht zu werden. Für jeden Partner innerhalb der Lieferkette besteht die NBSC aus den fünf Perspektiven der Finanzperspektive, der Ressourcenperspektive, der Marktperspektive, der Kooperationsperspektive und der Prozessperspektive. (vgl. [Sch10d], S. 183)

Die Finanzperspektive ist hierbei den weiteren Perspektiven übergeordnet, da an ihr alle anderen Ziele und Kennzahlen auszurichten sind und sie darüber hinaus der Abbildung der finanziellen Wirkungen des Supply Chain Managements dient. Kennzahlen, die im Rahmen des Supply Chain Controllings für die Finanzperspektive erhoben werden, sind z. B. der Return on Investment oder der Anteil der Logistikkosten am Umsatz. Die Prozessperspektive beinhaltet die Abbildung, Bewertung und eventuelle Neugestaltung interner und unternehmensübergreifender Prozessabläufe

nach zuvor definierten Prozesszielen, wobei in einem Unternehmensnetzwerk der Gestaltung, Steuerung und Kontrolle der übergreifenden Prozesse eine besondere Bedeutung zukommt. Relevante Kennzahlen sind in diesem Zusammenhang bspw. die Durchlaufzeit oder der Lieferbereitschaftsgrad. Mithilfe der Kooperationsperspektive werden indessen Wirkungen zwischenbetrieblicher Kooperationen innerhalb einer Supply Chain u. a. durch Kennzahlen wie den Kooperationsstabilitätsgrad oder die Verflechtungsquote dargestellt. Die Ressourcenperspektive berücksichtigt – ergänzend zu den Inhalten der Innovations- und Lernperspektive des klassischen BSC-Konzeptes – die für den Unternehmenserfolg relevanten Potenzialfaktoren, um knappe Ressourcen planen, steuern und kontrollieren zu können. Wichtige diesbezügliche Kennzahlen sind z. B. der Ressourcenauslastungsgrad oder die Mitarbeiterfluktuation. Schließlich dient die Marktperspektive der Abbildung der innerhalb des Netzwerkes herrschenden Konkurrenzsituation sowie der Erfüllung der Kundenanforderungen, wobei u. a. Kennzahlen wie der Kundenzufriedenheitsgrad oder der relative Marktanteil von Relevanz sind. (vgl. [SS03], S. 18 ff.)

Des Weiteren ist darauf hinzuweisen, dass die dargelegten Perspektiven der NBSC nicht unabhängig betrachtet werden können, sondern über Ursache-Wirkungsketten zusammenhängen, mittels derer vorhandene Interdependenzen zwischen der finanziellen Perspektive und den nicht-finanziellen Perspektiven sowie unter den nicht-finanziellen Perspektiven dargestellt werden können ([SS03], S. 20).

Wie das KPI-Konzept und die NWA bietet die NBSC die Möglichkeit, qualitative Faktoren im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbewertung eines RFID-Einsatzes einzubeziehen, wobei das KPI-Konzept und die NBSC hierbei im Vergleich zur NWA über eine deutlich höhere Objektivität verfügen. Da mittels der NBSC zudem auch Netzwerkeffekte abgebildet werden können, lässt sich dieses Verfahren im Hinblick auf die Bewertung nicht-monetärer Nutzenpotenziale des Praxiseinsatzes energieautarker RFID-Sensortransponder als am besten geeignet einstufen.

## 7.2.2 Klassische Instrumente der betriebswirtschaftlichen Investitionsrechnung

Innerhalb des fünften Schrittes des Vorgehensmodells zur Wirtschaftlichkeitsbewertung von RFID-Systemen ist nach der VDI-Richtlinie 4472 (Blatt 4) mithilfe eines Verfahrens der betriebswirtschaftlichen Investitionsrechnung – auf der Grundlage zu treffender Annahmen und Abschätzungen – eine Analyse der Zahlungsreihe für einen einzugrenzenden Business Case zu vollziehen (vgl. Kapitel 7.1.4, S. 130). Ausgewählte Instrumente der betriebswirtschaftlichen Investitionsrechnung, die hierfür geeignet sind, werden im Folgenden näher erläutert.

### 7.2.2.1 Kapitalwertmethode

Bei der Kapitalwertmethode handelt es sich um ein dynamisches Verfahren der Investitionsrechnung, mit dessen Hilfe im Rahmen einer zu treffenden Durchführungsentscheidung die absolute Vorteilhaftigkeit bezüglich einer Einzelinvestition ermittelt werden kann (vgl. [Car08], S. 31; [Pog15], S. 105). Weitere dynamische Verfahren der Investitionsrechnung sind beispielsweise die interne Zinsfußmethode oder die Annuitätenmethode, auf deren Darstellung jedoch im weiteren Verlauf verzichtet wird, da die Kapitalwertmethode in diesem Zusammenhang das am häufigsten verwendete Verfahren darstellt (vgl. [OR15], S. 118 ff.).

Die Kapitalwertmethode basiert auf der Annahme, dass ein vollkommener Kapitalmarkt existiert, wobei der auf diesem Markt vorliegende einheitliche Kalkulationszinssatz, zu welchem finanzielle Mittel in beliebiger Höhe angelegt oder aufgenommen werden können, zur Auf- oder Abzinsung von Ein- und Auszahlungen dient, die mit einer Investition verbunden sind (vgl. [Göt14], S. 78; [BLW15], S. 55 f.).

Der Kapitalwert für den zumeist gewählten Zeitpunkt  $t = 0$  lässt sich hierbei durch die folgende Formel berechnen:

$$C_0 = -a_0 + \sum_{t=1}^n (b_t - a_t) * (1 + i)^{-t} + R_n * (1 + i)^{-n}$$

**Formel 9: Berechnung des Kapitalwertes einer Zahlungsreihe im Zeitpunkt  $t_0$  (i. A. a. [BLW15], S. 56)**

Dabei gilt:

$a_0 =$  Anschaffungsauszahlung im Zeitpunkt  $t_0$

$b_t =$  Einzahlungen am Ende der Periode  $t$

$a_t =$  Auszahlungen am Ende der Periode  $t$

$i =$  Kalkulationszinssatz

$n =$  Nutzungsdauer in Perioden mit  $t = 1, 2, \dots, n$

$R_n =$  Restwerterlös im Zeitpunkt  $n$

Bei Anwendung der Kapitalwertmethode ist eine Investition als absolut vorteilhaft einzuordnen, falls der errechnete Kapitalwert größer als null ist. Im Rahmen einer zu treffenden Auswahlentscheidung mit mehreren zu vergleichenden Alternativen ist wiederum diejenige Investition als relativ vorteilhaft einzustufen, die über den höchsten Kapitalwert verfügt. (vgl. [Göt14], S. 78)

### 7.2.2.2 Amortisationsrechnung

Mithilfe der Amortisationsrechnung wird im Allgemeinen der Zeitraum ermittelt, der benötigt wird, um das jeweils investierte Kapital über vorhandene Rückflüsse zurückzugewinnen ([OR15], S. 112). Diesbezüglich existieren sowohl ein statisches als auch ein dynamisches Verfahren.

Die statische Amortisationsrechnung wird in erster Linie zur Bewertung des Risikos von Investitionen eingesetzt, wobei die Rückflüsse – anders als bei weiteren statischen Verfahren der Investitionsrechnung wie z. B. der Rentabilitätsrechnung – hier über mehrere Perioden betrachtet werden (vgl. [OR15], S. 112). Die Amortisationszeit einer Investition kann z. B. mittels der Durchschnittsmethode berechnet werden, bei der – wie in der folgenden **Formel 10** dargestellt – das eingesetzte Kapital durch die durchschnittlichen Rückflüsse dividiert wird, die sich wiederum durch die Addition des durchschnittlichen Gewinns mit der Abschreibung ergeben:

$$\text{Amortisationszeit} = \frac{\text{eingesetztes Kapital}}{\text{durchschnittliche Rückflüsse}}$$

**Formel 10: Berechnung der Amortisationszeit mittels der Durchschnittsmethode ([Göt14], S. 71)**



Im Rahmen eines Vergleichs mehrerer Investitionsalternativen verfügt bei der statischen Amortisationsrechnung diejenige Investition, die die geringste Amortisationszeit aufweist, über eine relative Vorteilhaftigkeit gegenüber den restlichen Alternativen (vgl. [Göt14], S. 71). Zur Bestimmung der absoluten Vorteilhaftigkeit einer Einzelinvestition ist indessen die dynamische Amortisationsrechnung besser geeignet. Diese kann zum Beispiel in Kombination mit der im Kapitel 7.2.2.1 beschriebenen Kapitalwertmethode angewendet werden, wobei die dynamische Amortisationszeit in diesem Zusammenhang für den Zeitpunkt ermittelt wird, zu dem der Kapitalwert gleich null ist (vgl. [Pog15], S. 137 f.).

### 7.2.2.3 Kostenvergleichsrechnung

Bei Modellen der Kostenvergleichsrechnung, die den statischen Verfahren der Investitionsrechnung zuzuordnen sind und in erster Linie der Ermittlung der relativen Vorteilhaftigkeit von Investitionsalternativen dienen, werden als Zielgröße die Kosten berücksichtigt (vgl. [Göt14], S. 57 f.). Die Kostenvergleichsrechnung kommt insbesondere in solchen Fällen zum Einsatz, in denen alternative Investitionsobjekte für die gleiche Aufgabe zur Verfügung stehen und sich die Erlösstruktur durch die Auswahl nicht verändert (vgl. [BLW15], S. 22). Elementare Kostenarten, die es im Zusammenhang mit einer Kostenvergleichsrechnung zu beachten gilt, sind z. B.:

- Personalkosten
- Materialkosten
- Abschreibungen
- Zinsen
- Steuern
- Gebühren
- Beiträge
- Kosten für Fremdleistungen ([Göt14], S. 57)

Die Höhe der oben aufgeführten Kosten wird hierbei für jede Investitionsalternative als Durchschnittsgröße bezogen auf den Planungszeitraum ermittelt, wobei die anschließende Addition aller Kostenkomponenten zu den Gesamtkosten einer jeden

Alternative führt. Eine Investition gilt in diesem Zusammenhang als relativ vorteilhaft, wenn die entstehenden Kosten gegenüber einer zu vergleichenden Alternative geringer ausfallen. (vgl. [Göt14], S. 57 f.)

### **7.2.3 Verfahren der Sensitivitätsanalyse**

Im Rahmen des sechsten Schrittes des Vorgehensmodells zur Wirtschaftlichkeitsbewertung von RFID-Systemen gilt es eine Bewertung der innerhalb der vorherigen Schritte erzielten Ergebnisse zu vollziehen und eventuell vorhandene Investitionsunsicherheiten bzw. Projektrisiken mittels der Durchführung einer Sensitivitätsanalyse zu berücksichtigen bzw. hervorzuheben (vgl. Kapitel 7.1.5, S. 131 ff.). Bezüglich der Sensitivitätsanalyse existieren beispielsweise die im Folgenden kurz vorgestellten Verfahren der Kritischen-Werte-Rechnung, der Dreifachrechnung und der Zielgrößenänderungsrechnung.

#### **7.2.3.1 Kritische-Werte-Rechnung**

Die Ermittlung kritischer Werte stellt das in der Praxis am häufigsten verwendete Verfahren zur Risikoberücksichtigung bei Investitionen dar ([BLW15], S. 196). Bei der Kritischen-Werte-Rechnung wird in der Regel lediglich ein Rechenelement variiert und die Auswirkung auf den Zielwert (z. B. den Kapitalwert) analysiert. Grundsätzlich gilt es hierbei kritische Höchstwerte wie die Anschaffungsauszahlung oder die laufenden Auszahlungen sowie kritische Mindestwerte wie den Restwert oder die Nutzungsdauer eines Rechenelementes zu unterscheiden, die nicht über- bzw. unterschritten werden dürfen, damit die Vorteilhaftigkeit einer Investition sichergestellt werden kann. Unberücksichtigt bleibt bei dieser Rechenmethode allerdings die Abhängigkeit der Rechenelemente untereinander. Ändert sich zum Beispiel die Anschaffungsauszahlung, so ist davon auszugehen, dass sich auch in Bezug auf den Restwert eine Änderung ergibt. (vgl. [Pog15], S. 264 f.)

#### **7.2.3.2 Dreifachrechnung**

Die Dreifachrechnung, bei der ein optimistischer, ein wahrscheinlicher und ein pessimistischer Fall betrachtet werden, zählt zu den multivariablen Ansätzen ([Car08], S. 86). Hierbei wird ein klassisches Verfahren der dynamischen Investiti-

onsrechnung wie z. B. die Kapitalwertmethode zunächst mit dem geplanten wahrscheinlichsten Datensatz und anschließend mit einem pessimistischen und einem optimistischen Datensatz, deren Festlegung zumeist in Form prozentualer Zu- oder Abschläge erfolgt, durchgerechnet ([Pog15], S. 274 f.). Eine Investition gilt in diesem Zusammenhang als sicher lohnend, wenn sie auch für das pessimistische Szenario einen positiven Zielwert aufweist; ergibt sich hingegen selbst für das optimistische Szenario ein negativer Zielwert, so wird sie als sicher unvorteilhaft eingeordnet ([Pog15], S. 275).

Die Dreifachrechnung hat mit der Kritischen-Werte-Rechnung gemein, dass vorhandene Interdependenzen zwischen den unterschiedlichen Rechenelementen unberücksichtigt bleiben ([Car08], S. 87). Der wesentliche Unterschied liegt jedoch darin, dass bei der Kritischen-Werte-Rechnung – wie bereits erwähnt – in der Regel nur ein Rechenelement variiert wird, während bei der Dreifachrechnung, bis auf die Anschaffungsauszahlung, die zu Beginn einer Investition in den meisten Fällen bekannt ist, zumeist alle Rechenelemente variiert werden ([Pog15], S. 275).

### **7.2.3.3 Zielgrößenänderungsrechnung**

Eine weitere Möglichkeit zur Durchführung einer Sensitivitätsanalyse repräsentiert die Zielgrößenänderungsrechnung, bei der die Reagibilität einer Zielgröße wie bspw. des Kapitalwertes oder der Amortisationsdauer auf prozentuale Veränderungen einzelner, voneinander unabhängiger Eingangsgrößen wie z. B. den Einzahlungen pro Periode dargestellt wird (vgl. [Man06], S. 46; [BLW15], S. 197).

Auch bei der Zielgrößenänderungsrechnung wird die Unabhängigkeit der Rechenelemente untereinander vorausgesetzt, wobei die Kausalität gegenüber der Kritischen-Werte-Rechnung umgekehrt ist, wodurch wiederum der Einfluss der einzelnen Rechenelemente auf den Zielwert analysiert werden kann ([Pog15], S. 277).

### **7.2.4 Identifikation geeigneter Instrumente zur speziellen Wirtschaftlichkeitsbewertung des Einsatzes von RFID-Sensortranspondern**

Um den im Kapitel 7.2 definierten wesentlichen Anforderungen an eine Wirtschaftlichkeitsanalyse gerecht werden zu können, sind – wie bereits erwähnt – verschiedene Methoden zur Kosten- und Nutzenbewertung, zur betriebswirtschaftlichen Bewer-

tung von Investitionen sowie zur Berücksichtigung von Investitionsunsicherheiten in Kombination anzuwenden (vgl. Kapitel 7.2, S. 133).

In Bezug auf die Ermittlung der Kosten und des Nutzens des potenziellen Praxiseinsatzes von RFID-Sensortranspondern konnten in diesem Zusammenhang der TCO-Ansatz, die PKR und die NBSC als die am besten geeigneten Methoden identifiziert werden. Die TCO-Methode dient hierbei der umfassenden, objektiven, transparenten und ex ante erfolgenden Evaluation der Investitionskosten (vgl. Kapitel 7.2.1.1, S. 135). Mithilfe der PKR können wiederum im Rahmen einer Ex-ante-Bewertung zusätzlich zu den Kosten auch Leistungen bzw. Nutzeneffekte auf Prozessebene objektiv, transparent und verursachungsgerecht ermittelt werden (vgl. Kapitel 7.2.1.2, S. 138). Da bei der PKR jedoch keine Quantifizierung qualitativer Nutzeneffekte erfolgt, ist bei einer retrospektiven Evaluation der Wirtschaftlichkeit zudem die Anwendung der NBSC zu empfehlen, mittels derer qualitative Faktoren im Zusammenhang mit einer Wirtschaftlichkeitsbewertung berücksichtigt werden können und die gegenüber Verfahren wie z. B. der NWA oder dem KPI-Konzept über den elementaren Vorteil verfügt, dass sich hiermit auch Netzwerkeffekte abbilden lassen, die bei der Betrachtung einer Distributionskette mit mehreren Partnern durchaus eine hohe Bedeutung aufweisen können (vgl. Kapitel 7.2.1.5, S. 141 f.).

Um auf der Grundlage der Kosten- und Nutzenermittlung die Vorteilhaftigkeit einer Investition bestimmen zu können, ist darüber hinaus die Verwendung von Verfahren zur betriebswirtschaftlichen Bewertung von Investitionen erforderlich. Bezüglich des im Kapitel 7.3.1 zu vollziehenden Vergleichs zwischen dem entwickelten energieautarken multisensorischen RFID-Transponder und vorhandenen batteriebetriebenen Lösungen bietet sich in diesem Zusammenhang der Einsatz der Kostenvergleichsrechnung zur Bestimmung der relativen Vorteilhaftigkeit an, da hier alternative Investitionsobjekte für die gleiche Aufgabe zur Verfügung stehen und sich die Erlösstruktur durch die Auswahl nicht verändert (vgl. Kapitel 7.2.2.3, S. 145). Des Weiteren können bei dieser Gegenüberstellung durch die Kombination der Kostenvergleichsrechnung mit der statischen Amortisationsrechnung (vgl. Kapitel 7.2.2.2, S. 144 f.), der Kritischen-Werte-Rechnung (vgl. Kapitel 7.2.3.1, S. 146) und der Dreifachrechnung (vgl. Kapitel 7.2.3.2, S. 146 f.) die maximalen Mehrkosten der Energy-Harvesting-Lösung bei einer vorgegebenen Amortisationszeit für ein optimistisches, ein wahrscheinliches und ein pessimistisches Szenario berechnet werden.

Da bei dem im Kapitel 7.3.2 erfolgenden Vergleich des energieautarken RFID-Sensortransponders mit der Nullalternative die Bestimmung der absoluten Vorteilhaftigkeit erforderlich ist, gilt es hierbei ein dynamisches Verfahren der betriebswirtschaftlichen Investitionsrechnung einzusetzen. Diesbezüglich eignet sich beispielsweise die kombinierte Anwendung der Kapitalwertmethode (vgl. Kapitel 7.2.2.1, S. 143 f.) und der dynamischen Amortisationsrechnung (vgl. Kapitel 7.2.2.2, S. 145), wobei die Berücksichtigung von Investitionsunsicherheiten zum Beispiel mithilfe der Durchführung einer Kritischen-Werte-Rechnung sichergestellt werden kann.

### **7.3 Durchführung einer exemplarischen Wirtschaftlichkeitsanalyse bezüglich der Verwendung energieautarker multisensorischer RFID-Transponder zur qualitativen Überwachung logistischer Prozesse**

Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit eines potenziellen Praxiseinsatzes energieautarker multisensorischer RFID-Transponder werden diese im Folgenden zunächst mit vorhandenen batteriebetriebenen Lösungen verglichen und anschließend der Nullalternative bzw. der Nicht-Anwendung energieautarker RFID-Sensortransponder zur qualitativen Überwachung der Distributionskette gegenübergestellt. Hierbei wird grundsätzlich vorausgesetzt, dass im Rahmen einer weiterführenden Produktentwicklung – auf der Grundlage der im Kapitel 6.3 (S. 121 f.) aufgezeigten Handlungsempfehlungen – die Funktionsfähigkeit der Energy-Harvesting-Lösung auch für die Verkehrsträger Schiene und Wasser realisiert werden kann.

#### **7.3.1 Vergleich zu batteriebetriebenen RFID-Sensortranspondern**

Aufgrund der bei dem untersuchten energieautarken multisensorischen RFID-Transponder zusätzlich benötigten Komponenten der Vibrationsgeneratoren, der Solarzellen und des Energiemanagement-Moduls ergibt sich aus Sicht der Anwender eine deutlich höhere zu tätigende Anschaffungsauszahlung als bei vergleichbaren batteriebetriebenen Lösungen. Diesbezüglich gilt es innerhalb dieses Kapitels zu prüfen, ob sich diese Mehrkosten durch den mithilfe der Energy-Harvesting-Lösung erzielbaren elementaren Vorteil eines reduzierten Wartungsaufwandes (vgl. Kapitel 2.1, S. 12) über die Lebensdauer eines mehrwegfähigen Transporthilfsmittels hinweg kompensieren lassen, wobei sowohl aus Anwender- als auch aus Herstellersicht die Berechnung der maximalen Mehrkosten bzw. eines Zielpreises des energieautarken

Sensortransponders bei einer vorgegebenen Amortisationsdauer von besonderem Interesse ist.

Im Folgenden werden die maximalen Mehrkosten für die zusätzlich benötigten Systemkomponenten beispielhaft für den im Zusammenhang mit der Funktionsmusterentwicklung ausgewählten NFC-Sensortransponder „TELID®332.nfc“ sowie für eine vorgegebene Amortisationszeit von maximal drei Jahren bestimmt<sup>37</sup>, indem zunächst die im Rahmen der Wartung vorhandenen Kosteneinsparungspotenziale mittels der Durchführung einer Prozesskostenrechnung quantifiziert werden und anschließend durch die Kombination der Kostenvergleichsrechnung, der Kritischen-Werte-Rechnung und der Dreifachrechnung eine Berechnung der maximalen Zusatzkosten für einen optimistischen, einen wahrscheinlichen und einen pessimistischen Fall erfolgt.

Um die Kosteneinsparungen ermitteln zu können, die durch den Einsatz der Energy-Harvesting-Lösung im Vergleich zu mittels Primärzellen betriebenen semi-aktiven RFID-Sensortranspondern potenziell erzielt werden können, gilt es zunächst, relevante Kostenarten zu identifizieren, die im Zusammenhang mit dem Austausch eines Transponders bzw. seiner Energiequelle anfallen.

Da bei dem exemplarisch betrachteten NFC-Sensortransponder „TELID®332.nfc“ aufgrund dessen Bauart nicht separat auf die Energiequelle zugegriffen werden kann (siehe **Abbildung 54** auf der Seite 103), ist dieser bei einer Wartung komplett auszutauschen. Demnach stellen die Transponderkosten sowie die Personalkosten, die im Rahmen des Prozesses des Transponderaustausches anfallen, in diesem Zusammenhang die Hauptkostenbestandteile dar. Weitere Kosten entstehen beim Transponderaustausch unter anderem für Flurförderzeuge, die gegebenenfalls für den innerbetrieblichen Transport des mehrwegfähigen Transporthilfsmittels benötigt werden, für die Entsorgung des auszutauschenden Sensortransponders sowie für das Werkzeug<sup>38</sup> und die Schrauben, die für die Demontage und die Montage des Transponders erforderlich sind.

---

<sup>37</sup> In diesem Zusammenhang wird vorausgesetzt, dass sowohl das eingesetzte mehrwegfähige Transporthilfsmittel als auch das energieautarke Zustandsüberwachungssystem innerhalb der betrachteten drei Jahre – mit Ausnahme der auch bei der Batterielösung erforderlichen Kalibrierung des Messsystems – wartungsfrei betrieben werden können.

<sup>38</sup> Hierbei handelt es sich in der Regel um einen mittels eines Akkumulators betriebenen Bohrschrauber.

Als exemplarisches mehrwegfähiges Transporthilfsmittel wird in der folgenden Prozesskostenkalkulation der innerhalb der Praxisuntersuchungen eingesetzte thermoisolierte Rollbehälter herangezogen (vgl. Kapitel 4, S. 52 ff.). Aus diesem Grund sind die Kosten für Flurförderzeuge in diesem Fall nicht relevant, da der Behälter im Rahmen des innerbetrieblichen Transportes durch einen gewerblichen Mitarbeiter ohne die Notwendigkeit eines Flurförderzeuges fußläufig befördert werden kann. Da die für die Entsorgung und die für die Demontage und die Montage des Transponders benötigten Ressourcen anfallenden Kosten im Vergleich zu den Personalkosten einen vernachlässigbar geringen Anteil ausmachen, werden diese innerhalb der nachfolgend beschriebenen Prozesskostenkalkulation ebenfalls nicht berücksichtigt.

Im Hinblick auf die Bestimmung der Personalkosten gilt es zunächst, Kostensätze pro Zeiteinheit bezüglich des für den Transponderaustausch einzusetzenden gewerblichen Mitarbeiters zu ermitteln. Hierfür sind wiederum die folgenden grundlegenden Daten erforderlich:

- Personalkosten pro Jahr für einen fest angestellten gewerblichen Mitarbeiter
- Arbeitstage pro Jahr
- Krankheitsquote
- Urlaubstage pro Jahr
- Arbeitsstunden pro Tag

Hinsichtlich der durchschnittlichen Personalkosten für einen fest angestellten gewerblichen Mitarbeiter werden hierbei 32000 Euro pro Jahr festgelegt. Neben dem auf zeitlicher Basis ermittelten Arbeitsentgelt existieren in diesem Zusammenhang weitere Entgeltbestandteile, die es zu berücksichtigen gilt. Beispielsweise können zusätzlich zu einem Grundentgelt Zulagen für Feiertags- und Nachtarbeit, Kostensparnisse oder Qualitätsverbesserungen vereinbart werden. Bestandteil des Entgelts sind außerdem die Personalnebenkosten, zu denen zunächst die Sozialkosten zählen, die zum einen gesetzlich geregelt sind (z. B. Sozialversicherungs- und Berufsgenossenschaftsbeiträge) und zum anderen tarifvertraglich vereinbart (z. B. Urlaubsgeld und Beihilfen) oder freiwillig erbracht werden (z. B. betriebliche Altersvorsorge). Des Weiteren zählen zu den Personalnebenkosten zum Beispiel Kosten für Abfindungen oder Weiterbildungskosten. ([PSK08], S. 43)

Die Arbeitstage pro Jahr werden beispielhaft für das Jahr 2017 und das Bundesland Nordrhein-Westfalen ermittelt, wobei sich abzüglich der Wochenenden und Feiertage ein Wert von 249 Arbeitstagen ergibt. In Bezug auf die Krankheitsquote wird ein Prozentsatz von 3 Prozent angesetzt und darüber hinaus wird angenommen, dass ein fest angestellter Mitarbeiter einen Urlaubsanspruch von 30 Tagen im Jahr hat und acht Stunden pro Tag arbeitet.

Zur Ermittlung der durchschnittlichen Personalkosten pro Zeiteinheit sind die Personalkosten des fest angestellten Mitarbeiters auf die Nettoarbeitszeit pro Zeiteinheit zu beziehen. Die Nettoarbeitszeit pro Jahr ergibt sich indessen aus den Tagen pro Jahr abzüglich der Wochenenden, Feiertage und Urlaubstage sowie unter Berücksichtigung der Krankheitsquote. Die Fehltage, die krankheitsbedingt entstehen, sind hierbei anhand eines Prozentsatzes zu berücksichtigen, der auf die Tage pro Jahr, bereinigt um die Fehlzeiten, die durch Wochenenden, Feiertage und Urlaubstage begründet sind, zu beziehen ist. (vgl. [Eik10], S. 100)

Diesbezüglich ergibt sich ein Wert von 212,43 Nettoarbeitstagen pro Jahr, woraus sich wiederum die in der folgenden **Tabelle 23** aufgeführten durchschnittlichen Personalkostensätze pro Zeiteinheit für einen fest angestellten gewerblichen Mitarbeiter errechnen lassen:

**Tabelle 23: Gewerbliche Mitarbeiter – Personalkostensätze pro Zeiteinheit**

<b>Berufsgruppe</b>	<b>Kostensatz [€ / Tag]</b>	<b>Kostensatz [€ / h]</b>	<b>Kostensatz [€ / min]</b>	<b>Kostensatz [€ / s]</b>
Gewerblicher Mitarbeiter (fest angestellt)	150,64	18,83	0,314	0,0052

Für die Berechnung der im Rahmen eines Transponderaustausches entstehenden Prozesskosten gilt es in einem weiteren Schritt, die in diesem Zusammenhang durchzuführenden Prozessschritte sowie die dazugehörigen Prozesszeiten zu definieren. Diese hängen im Wesentlichen von dem Mehrwegsystem ab, welches für das jeweils zu betrachtende mehrwegfähige Transporthilfsmittel vorgesehen ist.

In der folgenden **Abbildung 71** ist die nach der VDI-Richtlinie 4460 geltende Einteilung von Mehrwegsystemen aufgeführt:



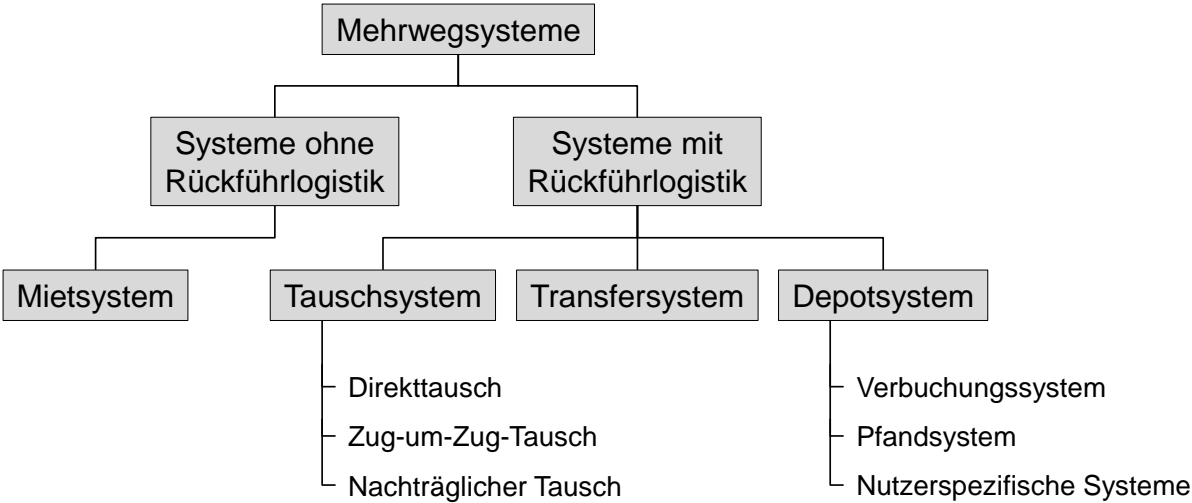


Abbildung 71: Einteilung von Mehrwegsystemen ([VDI03], S. 17)

Ein geeignetes Mehrwegsystem für die Rückführlogistik des beispielhaft betrachteten thermoisolierten Rollbehälters innerhalb einer Distributionskette mit mehreren Netzwerkpartnern ist das „Depot-Verbuchungs-System“, dessen grundlegende Aufbau- und Ablauforganisation in der **Abbildung 72** dargestellt sind.

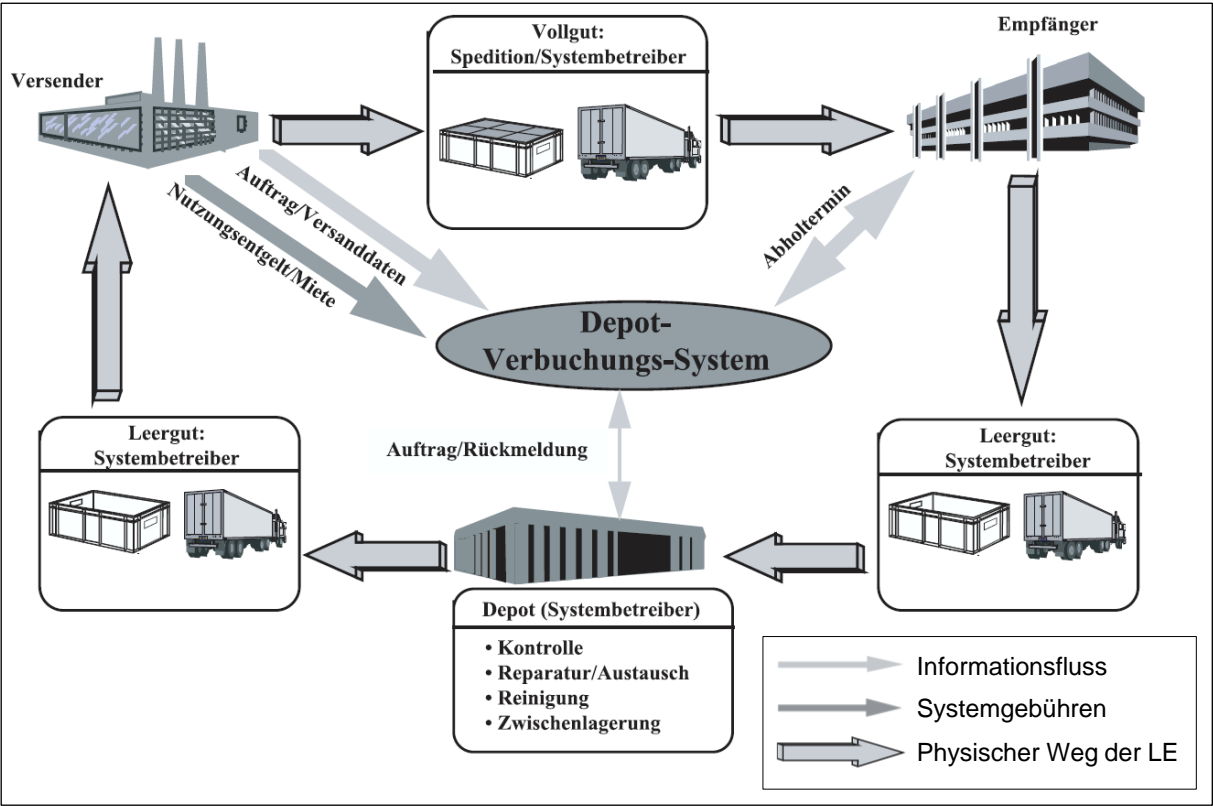


Abbildung 72: Aufbau- und Ablauforganisation beim „Depot-Verbuchungs-System“ ([VDI03], S. 24)

Bei „Depotsystemen“ werden meist alle im Zusammenhang mit der Rückführlogistik auszuführenden Aufgaben von einem Systembetreiber übernommen, der die jeweiligen mehrwegfähigen Transporthilfsmittel bedarfsgerecht beim Versender anliefert und das beim Empfänger anfallende Leergut in Depots zurückführt, wo die leeren Transporthilfsmittel für den nächsten Einsatz vorbereitet werden, das heißt sie werden kontrolliert, ggf. repariert oder ausgetauscht, gereinigt und bis zum nächsten Abruf zwischengelagert ([VDI03], S. 24 f.).

Bei der Variante des „Depot-Verbuchungs-Systems“ übermittelt der Versender die Versanddaten zur Verfolgung der mehrwegfähigen Transporthilfsmittel mit dem Vollguttransport an den Systembetreiber bzw. erhält der Systembetreiber die Versanddaten mit den Angaben über den Vollguttransport, wenn er gleichzeitig auch Frachtführer ist (siehe **Abbildung 72**). Die beim Empfänger entleerten und zur Versendung vorbereiteten Transporthilfsmittel werden anschließend vom Systembetreiber abgeholt und in ein Depot zurückgeführt. Die hierbei entstehenden Kosten werden entweder in Form von Miete und / oder in Form eines Nutzungsentgeltes je Umlauf abgegolten. ([VDI03], S. 25)

Die **Tabelle 24** beinhaltet die zusätzlichen Prozessschritte sowie die dazugehörigen Prozesszeiten, die sich bei diesem Mehrwegsystem im Rahmen eines notwendigen Transponderaustausches ergeben. Durch die Multiplikation der Prozesszeiten mit den kalkulierten Personalkostensätzen pro Zeiteinheit (siehe **Tabelle 23**) konnten mittels der PKR wiederum die gesamten relevanten Prozesskosten pro Transponderaustausch sowie die Kosten der einzelnen hierfür erforderlichen Teilprozesse berechnet werden (siehe **Tabelle 24**).

Die wegabhängigen Prozesszeiten bezüglich der in der **Tabelle 24** aufgeführten Prozessschritte „Beförderung des thermoisolierten Rollbehälters zur Werkstatt“ sowie „Einlagerung des thermoisolierten Rollbehälters“ wurden hierbei abgeschätzt, wobei im Hinblick auf den Einlagerungsprozess lediglich der voraussichtliche zusätzliche Zeitbedarf im Vergleich zu einer direkten Einlagerung des Behälters berücksichtigt wurde. Der Zeitbedarf für die weiteren im Zusammenhang mit einem Transponderaustausch durchzuführenden Prozessschritte wurde im Rahmen von Feldtests ermittelt, bei denen auch der aufgrund der repetitiven Ausführung eintretende Lerneffekt bei einem Mitarbeiter beachtet wurde.

**Tabelle 24: Prozesskosten im Rahmen eines notwendigen Transponderaustausches**

<b>Prozessschritt</b>	<b>Zeitbedarf [s]</b>	<b>Personalkosten [€]</b>
Beförderung des thermoisolierten Rollbehälters zur Werkstatt / Wartungsfläche (fußläufig)	90	0,4707
Öffnen des Behälters	3	0,0157
Vorbereitung des Werkzeuges zur Demontage und Montage der Sensortransponder	10	0,0523
Demontage des „defekten“ Transponders	15	0,0785
Entsorgung des „defekten“ Transponders	2	0,0105
Montage eines neuen Sensortransponders	20	0,1046
Werkzeug in Ausgangszustand zurückversetzen	5	0,0262
Schließen des Behälters	3	0,0157
Einlagerung des thermoisolierten Rollbehälters (fußläufig)	30	0,1569
<b>Gesamt (pro Transponderaustausch)</b>	<b>178</b>	<b>0,9310</b>

Aus der **Tabelle 24** geht hinsichtlich der gesamten Prozesskosten pro Transponderaustausch ein Wert von 0,931 Euro hervor. Unter der Annahme, dass beim Einkauf der exemplarisch betrachteten semi-aktiven RFID-Sensortransponder des Typs „TELID®332.nfc“ durch ein Unternehmen eine Anzahl von mindestens 2000 Stück bestellt wird und damit ein Nettoeinkaufspreis von 46,64 Euro pro Transponder erzielt werden kann (vgl. Kapitel 5.1.4, S. 103), ergeben sich demnach Kosten von insgesamt rund 47,57 Euro pro Transponderaustausch.

Laut Datenblatt verfügt die beim „TELID®332.nfc“ verwendete Primärzelle – in Abhängigkeit von den jeweiligen Nutzungsbedingungen – über eine maximale Lebensdauer von drei Jahren. Geht man in diesem Zusammenhang von einem regelmäßigen Einsatz des Transponders aus, so lässt sich bezüglich des wahrscheinlichen Falles im Rahmen der durchzuführenden Dreifachrechnung eine Transponderlebensdauer von einem Jahr abschätzen. Da bei der Wirtschaftlichkeitsbewertung der entwickelten Energy-Harvesting-Lösung eine längere Lebensdauer des batteriebetriebenen RFID-Sensortransponders den pessimistischen Fall darstellt, wird für diesen eine Zeitspanne von 18 Monaten und für den optimistischen Fall ein Zeitraum von sechs Monaten angenommen. Hieraus ergeben sich für die drei unterschiedlichen Szenarien – bei einer maximalen Amortisationszeit von drei Jahren – die in der folgenden **Tabelle 25** dargestellten maximalen Mehrkosten energieautarker gegen-

über mittels Primärzellen betriebener semi-aktiver multisensorischer RFID-Transponder:

**Tabelle 25: Maximale Mehrkosten der energieautarken gegenüber der batteriebetriebenen Lösung bei einer maximalen Amortisationszeit von drei Jahren**

	<b>Batterie- lebensdauer von 18 Monaten (pessimistisches Szenario)</b>	<b>Batterie- lebensdauer von 12 Monaten (wahrscheinliches Szenario)</b>	<b>Batterie- lebensdauer von 6 Monaten (optimistisches Szenario)</b>
<b>Maximale Mehrkosten<sup>39</sup> der energie- autarken Lösung [€]</b>	95,14	142,71	285,42

Da eine Investition als sicher lohnend gilt, wenn sie auch für das pessimistische Szenario einen positiven Zielwert aufweist (vgl. Kapitel 7.2.3.2, S. 147), ist im Zusammenhang mit der Entwicklung der Energy-Harvesting-Lösung ein Nettopreis von maximal 141,78 Euro pro Stück anzustreben, der sich aus der Addition des aktuellen Transponderpreises von 46,64 Euro pro Stück mit den für das pessimistische Szenario ermittelten maximalen Mehrkosten von 95,14 Euro für die zusätzlich benötigten Komponenten der Vibrationsgeneratoren, der Solarzellen und des Energiemanagement-Moduls ergibt.

### 7.3.2 Vergleich mit der Nullalternative

Bei dem im Folgenden durchzuführenden Vergleich des entwickelten energieautarken multisensorischen RFID-Transponders mit der Nullalternative bzw. der Nicht-Anwendung von RFID-Sensortranspondern in der logistischen Praxis ist eine prospektive Evaluation der Wirtschaftlichkeit erforderlich, da eine solche Technologie aktuell noch nicht am Markt existiert und daher keine konkreten Zahlenwerte bezüglich eines Praxiseinsatzes vorliegen, auf die Bezug genommen werden könnte.

<sup>39</sup> Die für die drei unterschiedlichen Szenarien aufgeführten maximalen Mehrkosten der energieautarken Lösung entsprechen in diesem Zusammenhang gleichzeitig den hiermit in einem Zeitraum von drei Jahren erreichbaren Kosteneinsparungen im Vergleich zu batteriebetriebenen RFID-Sensortranspondern.

Die folgende diesbezügliche Wirtschaftlichkeitsanalyse bezieht sich auf den beispielhaften Business Case der qualitativen Überwachung leicht verderblicher Lebensmittel auf der Ebene der Ladeinheit, wobei im Rahmen dieser Betrachtung das mehrwegfähige Transporthilfsmittel eines thermoisolierten Rollbehälters als exemplarische Ladeinheit herangezogen wird und insgesamt eine Orientierung an dem in der VDI-Richtlinie 4472 (Blatt 4) dargestellten und im Kapitel 7.1 (S. 123 ff.) ausführlich beschriebenen Vorgehensmodell zur Kosten-Nutzenbewertung von RFID-Systemen in der Logistik erfolgt.

Bezogen auf die spezielle Anwendung von energieautarken RFID-Sensortranspondern zur Zustandsüberwachung einzelner Ladeinheiten in der Distributionslogistik steht vor allem die Zielstellung der Erhöhung der Prozessqualität und -transparenz im Vordergrund. Durch eine solche Prozessverbesserung ergibt sich eine Vielzahl an Nutzenpotenzialen (vgl. Kapitel 7.1.1, S. 125 f.), wobei sich hinsichtlich des betrachteten Anwendungsfalls der qualitativen Überwachung leicht verderblicher Lebensmittel insbesondere die Kosteneinsparungspotenziale, die durch die Vermeidung von Abschreibungen auf nicht einwandfreie Ware erzielt werden können (vgl. [CS08], S. 32), monetär bewerten lassen.

Laut einer Studie der Jacobs University Bremen, innerhalb derer über 100 Literaturquellen ausgewertet wurden, müssen weltweit 35 Prozent aller leicht verderblichen Lebensmittel aufgrund von Kühlkettenbrüchen in der Distributionskette, die vor allem im Rahmen von Umschlagprozessen entstehen, entsorgt werden (vgl. [Bec11]). In der folgenden Analyse wird die Annahme getroffen, dass sich dieser Prozentsatz durch eine kontinuierliche Aufzeichnung von Temperatur- und Feuchtemesswerten auf Ladeeinheitenebene sowie darauf basierender Datenanalysen im Hinblick auf potenzielle Schwachstellen in der Lieferkette über den in diesem Zusammenhang gewählten Betrachtungszeitraum von fünf Jahren sukzessiv auf einen Wert von 20 Prozent reduzieren lässt. Hierbei wird zudem vorausgesetzt, dass das innerhalb einer Distributionskette vorhandene Optimierungspotenzial mit der Umsetzung von Verbesserungsmaßnahmen im Zeitverlauf abnimmt.

Die angenommene prozentuale Reduzierung der Entsorgungsquote, die mithilfe einer auf der Ebene der Ladeinheit erfolgenden Zustandsüberwachung im Zusammenhang mit der Distribution leicht verderblicher Lebensmittel über den Betrachtungszeitraum

tungszeitraum von fünf Jahren erreicht werden kann, ist in der folgenden **Tabelle 26** noch einmal übersichtlich dargestellt:

**Tabelle 26: Erreichbare Reduzierung der Entsorgungsquote durch eine auf Ladeeinheitenebene erfolgende Zustandsüberwachung im Rahmen der Distribution leicht verderblicher Lebensmittel (Abschätzung)**

	1. Jahr	2. Jahr	3. Jahr	4. Jahr	5. Jahr
Mögliche Reduzierung der Entsorgungsquote	5 %	4 %	3 %	2 %	1 %
Mögliche Reduzierung der Entsorgungsquote (kumuliert)	5 %	9 %	12 %	14 %	15 %

Die Entsorgungsquote lässt sich hierbei wie folgt bestimmen:

$$\text{Entsorgungsquote} = \frac{\text{Menge zu entsorgender Ware}}{\text{Warengesamtmenge}} * 100$$

**Formel 11: Berechnung der Entsorgungsquote in Prozent**

Die Kosteneinsparungen, die sich hierdurch im Zusammenhang mit einem Umlauf des betrachteten thermoisolierten Rollbehälters ergeben, lassen sich durch die Multiplikation der jeweiligen prozentualen Reduzierung der Entsorgungsquote mit dem durchschnittlichen Warenwert pro Ladeeinheit berechnen. Der durchschnittliche Warenwert je Rollbehälter resultiert wiederum aus der Multiplikation des durchschnittlichen Warenwertes pro Kilogramm mit dem Durchschnittsgewicht je Rollbehälter. Für leicht verderbliche Lebensmittel wird in diesem Zusammenhang ein Warenwert von zwei Euro pro Kilogramm angesetzt. Für den betrachteten thermoisolierten Rollbehälter, der über ein nutzbares Innenvolumen von ca. 711 Litern verfügt, ergibt sich indessen – bei einem angenommenen durchschnittlich erreichbaren Füllgrad von 60 Prozent – ein Durchschnittsgewicht von rund 426,6 Kilogramm<sup>40</sup> pro Behälterumlauf (BU). Bezieht man diese Werte beispielhaft auf die für das erste Jahr abgeschätzte fünfprozentige Reduzierung der Entsorgungsquote, so entstehen in diesem Jahr die folgenden Kosteneinsparungen je BU:

$$0,05 * 2 \frac{\text{€}}{\text{kg}} * 426,6 \frac{\text{kg}}{\text{BU}} = 42,66 \frac{\text{€}}{\text{BU}}$$

<sup>40</sup> Hier wird die Annahme getroffen, dass die zu transportierenden leicht verderblichen Lebensmittel durchschnittlich über eine Dichte von 1 kg/l verfügen.

Bei einer angenommenen Anzahl von zwölf Umläufen pro Behälter und Jahr können hierbei über den betrachteten fünfjährigen Zeitraum insgesamt die in der **Tabelle 27** aufgeführten Kosteneinsparungen pro Behälter und Jahr erzielt werden.

**Tabelle 27: Voraussichtlich erzielbare Kosteneinsparungen pro Behälter und Jahr**

	1. Jahr	2. Jahr	3. Jahr	4. Jahr	5. Jahr	Gesamt
Erzielbare Kosteneinsparungen pro Behälter und Jahr [€]	511,92	921,46	1228,61	1433,38	1535,76	5631,13

Die Systemdimensionierung, die einen entscheidenden Einfluss auf die bei der Implementierung einer neuen technischen Lösung in einem Unternehmen entstehenden Kosten hat, erfolgte bereits weitestgehend im Zuge der Entwicklung des Funktionsmusters eines energieautarken multisensorischen RFID-Transponders mit NFC-kompatibler HF-Luftschnittstelle. Bei der Einführung eines solchen Systems zur qualitativen Überwachung einzelner Ladeeinheiten in der Distributionslogistik treten im Vergleich zur Nullalternative – unterschieden nach Projektphasen – im Wesentlichen die in der folgenden **Tabelle 28** dargestellten zusätzlichen Kosten auf, die es im weiteren Verlauf zu quantifizieren gilt:

**Tabelle 28: Auftretende Kosten bei der Einführung einer qualitativen Überwachung einzelner Ladeeinheiten mittels energieautarker NFC-Sensortransponder**

Planungsphase	Realisierungsphase	Betriebsphase
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evtl. Kosten für Beratungsdienstleistungen</li> <li>• Evtl. Teilnahmegebühren für Informationsveranstaltungen</li> <li>• Evtl. Kosten für Fachliteratur</li> <li>• Personalkosten für die Beschaffung von Informationen, die Analyse der IST-Situation sowie die Entwicklung eines Konzeptes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kosten für die Beschaffung NFC-fähiger Smartphones</li> <li>• Kosten für die Beschaffung energieautarker NFC-Sensortransponder</li> <li>• Kosten für die Programmierung einer anwendungsgerechten Smartphone-Applikation</li> <li>• Kosten für Mitarbeiterschulungen</li> <li>• Personalkosten für die Projektumsetzung und die Unternehmenskommunikation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wartungskosten für Hard- und Software</li> <li>• Kosten für die Cloud-Nutzung</li> <li>• Energiekosten</li> <li>• Personalkosten für das Projektcontrolling</li> <li>• Personalkosten für zusätzlich auszuführende Prozessschritte</li> <li>• Personalkosten für die gezielte Auswertung aufgezeichneter Messwerte</li> </ul>

Um die Personalkosten ermitteln zu können, die im Zusammenhang mit der Planungsphase für die Informationsbeschaffung, die Analyse der IST-Situation sowie die Konzeptentwicklung anfallen, in der Realisierungsphase in Form der Projektumsetzung sowie der Unternehmenskommunikation entstehen und im Rahmen der Realisierungsphase durch das erforderliche Projektcontrolling sowie die gezielte Auswertung aufgezeichneter Messwerte im Hinblick auf potenzielle Optimierungspotenziale zustande kommen, gilt es zunächst Kostensätze pro Zeiteinheit für Mitarbeiter des mittleren Managements zu bestimmen. Bei einer in Analogie zu den im Kapitel 7.3.1 (S. 151 f.) getroffenen Annahmen bezüglich der Arbeitstage pro Jahr, der Krankheitsquote, der Urlaubstage pro Jahr und der Arbeitsstunden pro Tag durchgeführten Berechnung ergeben sich hier – bei angenommenen durchschnittlichen Personalkosten von 72000 Euro für einen Mitarbeiter des mittleren Managements – die in der nachfolgenden **Tabelle 29** aufgeführten Kostensätze pro Zeiteinheit:

**Tabelle 29: Mitarbeiter des mittleren Managements – Personalkostensätze pro Zeiteinheit**

<b>Berufsgruppe</b>	<b>Kostensatz [€ / Tag]</b>	<b>Kostensatz [€ / h]</b>	<b>Kostensatz [€ / min]</b>	<b>Kostensatz [€ / s]</b>
Mitarbeiter des mittleren Managements	338,94	42,37	0,706	0,0118

Die in der Planungsphase auftretenden Kosten hängen im Wesentlichen mit der Anzahl der beteiligten Projektpartner zusammen, da diese einen entscheidenden Einfluss auf den erforderlichen Koordinationsaufwand hat. In der folgenden Analyse wird exemplarisch eine aus insgesamt fünf Partnern bestehende Distributionskette mit Vor-, Haupt- und Nachlauf (siehe **Abbildung 3** auf der Seite 4) betrachtet, wobei sowohl die entstehenden Kosten als auch der vorhandene Nutzen jeweils auf die gesamte Lieferkette bezogen werden. Für die in der Planungsphase durchzuführenden Tätigkeiten der Informationsbeschaffung, der IST-Analyse und der Konzeptentwicklung wird in diesem Zusammenhang vorausgesetzt, dass die beteiligten Unternehmen bereits über grundlegende Vorkenntnisse in Bezug auf die einzuführende Technologie verfügen und aus diesem Grund die Beauftragung externer Beratungsdienstleistungen, der Besuch von Informationsveranstaltungen sowie die Beschaffung von Fachliteratur nicht erforderlich sind. Des Weiteren wird angenommen, dass pro Partner zwei Mitarbeiter des mittleren Managements für einen Zeitraum von



jeweils zehn Arbeitstagen einzusetzen sind und damit in dieser Projektphase insgesamt Kosten von 33894 Euro entstehen.

Der in der Realisierungsphase für die Projektumsetzung und die Unternehmenskommunikation zu leistende Aufwand der Mitarbeiter des mittleren Managements wird für die Partner innerhalb der Lieferkette insgesamt mit 200 Arbeitstagen abgeschätzt, sodass sich hierbei Kosten von 67788 Euro ergeben. Die bei der Projektumsetzung zu tätigen Investitionen für die Beschaffung energieautarker NFC-Sensortransponder sowie NFC-fähiger Smartphones sind indessen stark von der Gesamtanzahl der Behälter abhängig, die mit dem energieautarken Zustandsüberwachungssystem ausgestattet werden sollen. Diesbezüglich wird in der nachfolgenden Kapitalwertberechnung eine Behälteranzahl von 2000 Stück herangezogen, wobei hinsichtlich der energieautarken NFC-Sensortransponder der im Kapitel 7.3.1 ermittelte Zielpreis von 141,78 Euro pro Stück Berücksichtigung findet. Hieraus lassen sich bezüglich der benötigten Transponder Investitionskosten in Höhe von 283560 Euro berechnen. Die in der Distributionskette insgesamt benötigte Anzahl NFC-fähiger Smartphones wird mit einem Wert von 200 Stück und deren Anschaffungskosten mit 300 Euro pro Stück beziffert, woraus für die zum Beschreiben und Auslesen der Sensortransponder notwendigen Smartphones wiederum Investitionskosten von 60000 Euro hergeleitet werden können<sup>41</sup>.

Da es sich sowohl bei den zu beschaffenden NFC-Sensortranspondern als auch bei den NFC-fähigen Smartphones nach § 6 des Einkommensteuergesetzes aufgrund der geringen Anschaffungskosten um „geringwertige“ Wirtschaftsgüter handelt (vgl. [BMJV17a]), erfolgt für diese im Rahmen der nachfolgenden Kapitalwertberechnung keine Abschreibung. Die für die Entwicklung der anwendungsgerechten Smartphone-Applikation angesetzten Kosten von 20000 Euro werden hingegen über den Zeitraum von fünf Jahren abgeschrieben, der sich nach § 7 des Einkommensteuergesetzes nach der betriebsgewöhnlichen Nutzungsdauer des Wirtschaftsguts bemisst (vgl. [BMJV17b]). Weitere Kosten fallen im Zusammenhang mit der Realisierungsphase für die Schulung der Mitarbeiter der in der Distributionskette beteiligten Partner an,

---

<sup>41</sup> Es ist darauf hinzuweisen, dass die Möglichkeit der Umsetzung der BYOD-Strategie in einem Unternehmen (vgl. Kapitel 3.5, S. 52) an dieser Stelle ausgeklammert wurde.

wofür zunächst einmalige Kosten in Höhe von insgesamt 10000 Euro angenommen werden<sup>42</sup>.

Bei den in der Betriebsphase auftretenden Kosten handelt es sich im Allgemeinen um wiederkehrende Kosten, die bei der Kapitalwertberechnung je Periode zu berücksichtigen sind. Die Kosten für die Wartung von Hard- und Software werden hierbei mit 4000 Euro pro Jahr und die Kosten für die Cloud-Nutzung mit einem marktüblichen Wert von 1000 Euro pro Jahr angesetzt, wobei es im Hinblick auf die Abschätzung der Wartungskosten zu erwähnen gilt, dass in Bezug auf die Hardware-Wartung ausschließlich die Kosten für die Kalibrierung der NFC-Sensortransponder einbezogen wurden, da vorausgesetzt wird, dass das energieautarke Zustandsüberwachungssystem innerhalb des fünfjährigen Betrachtungszeitraumes ansonsten wartungsfrei betrieben werden kann. Die Energiekosten, die beispielsweise beim Aufladen der für das Beschreiben und das Auslesen der Transponder eingesetzten Smartphones entstehen, repräsentieren lediglich einen marginalen Anteil an den Gesamtkosten und werden aus diesem Grund im weiteren Verlauf der Analyse nicht weiter betrachtet.

Hinsichtlich der in der Betriebsphase vorhandenen Personalkosten ist zwischen den Kosten für gewerbliche Mitarbeiter, die bei der angestrebten Zustandsüberwachung einzelner Ladeeinheiten in der Distributionslogistik für die zusätzlich durchzuführenden Prozesse „Initialisierung einer Sensormessung“ und „Datenerfassung beim Umschlag“ anfallen, sowie den Kosten für Mitarbeiter des mittleren Managements, die im Rahmen des Projektcontrollings sowie der gezielten Auswertung der aufgezeichneten Messwerte entstehen, zu unterscheiden.

Bei Betrachtung der **Abbildung 3** (S. 4) wird deutlich, dass die „Initialisierung einer Sensormessung“ beim Versender erfolgt und anschließend – unter der Voraussetzung, dass an jedem Umschlagpunkt entweder eine Konsolidierung oder eine Dekonsolidierung der einzelnen Ladeeinheiten in ein Transportmittel hinein bzw. aus einem Transportmittel heraus vollzogen wird – an insgesamt vier kritischen Umschlagpunkten eine „Datenerfassung beim Umschlag“ erforderlich ist.

---

<sup>42</sup> Diesbezüglich können in der Betriebsphase – z. B. bei der Einstellung neuer Mitarbeiter – weitere Kosten entstehen. Diese werden aufgrund ihres marginalen Anteils an den Gesamtkosten in der folgenden Analyse jedoch nicht berücksichtigt.

Die wesentlichen Prozesskosten, die im Rahmen der Prozesse „Initialisierung einer Sensormessung“ und „Datenerfassung beim Umschlag“ pro Ladeinheit bzw. Behälter entstehen<sup>43</sup>, lassen sich durch die Multiplikation der pro Behälter benötigten Prozesszeiten mit den für gewerbliche Mitarbeiter ermittelten Personalkostensätzen pro Zeiteinheit (vgl. **Tabelle 23**, S. 152) berechnen und sind in den **Tabellen 30 und 31** aufgeführt.

**Tabelle 30: Prozesskosten im Rahmen der Initialisierung einer Sensormessung**

Prozessschritt	Bündelungs-faktor	Zeit-bedarf [s]	Personal-kosten [€]
Öffnen der Smartphone-Applikation	10	10	0,0052
Gang zur (nächsten) LE	1	5	0,0260
Beschreiben eines Sensortransponders	1	1	0,0052
Statusübermittlung in die Cloud	1	1	0,0052
<b>Gesamt (pro LE)</b>		<b>8</b>	<b>0,0416</b>

**Tabelle 31: Prozesskosten im Zusammenhang mit der Datenerfassung beim Umschlag**

Prozessschritt	Bündelungs-faktor	Zeit-bedarf [s]	Personal-kosten [€]
Öffnen der Smartphone-Applikation	10	10	0,0052
Gang zur (nächsten) LE	1	5	0,0260
Auslesen der aufgezeichneten Messdaten	1	5	0,0260
Senden der ausgelesenen Messdaten in die Cloud	1	5	0,0260
<b>Gesamt (pro LE)</b>		<b>16</b>	<b>0,0832</b>

Der Prozessschritt „Beschreiben eines Sensortransponders“ erfordert hierbei lediglich eine Zeitdauer von wenigen Zehntelsekunden, wobei die Prozessschritte „Auslesen der aufgezeichneten Messdaten“ und „Senden der ausgelesenen Messdaten in die Cloud“ in Abhängigkeit von der jeweils zu übertragenden Datenmenge eine Zeitdauer von wenigen Zehntelsekunden bis hin zu in etwa fünf Sekunden in Anspruch nehmen. Wie den **Tabellen 30 und 31** zu entnehmen ist, wurde bezüglich des Prozessschrittes „Beschreiben eines Sensortransponders“ eine Zeitdauer von einer Sekunde zugrunde gelegt und für die Prozessschritte „Auslesen der aufgezeichneten

<sup>43</sup> Im Rahmen dieser Prozesse fallen zudem Prozesskosten für die Ressource „Smartphone“ an, die allerdings vernachlässigbar gering sind.

Messdaten“ und „Senden der ausgelesenen Messdaten in die Cloud“ jeweils die maximal erforderliche Zeitdauer von fünf Sekunden veranschlagt. Des Weiteren wurde die Annahme getroffen, dass der Prozessschritt „Öffnen der Smartphone-Applikation“ bei der Durchführung der Prozesse „Initialisierung einer Sensormessung“ und „Datenerfassung beim Umschlag“ lediglich einmalig am Anfang zu erfolgen hat und sich in diesem Zusammenhang ein abgeschätzter Bündelungsfaktor von zehn Ladeeinheiten ergibt.

Bei einer sich im Umlauf befindlichen Behälteranzahl von 2000 Stück und einer Anzahl von zwölf Umläufen pro Behälter und Jahr ist der Prozess „Initialisierung einer Sensormessung (IES)“ beim Versender 24000-mal pro Jahr und der Prozess „Datenerfassung beim Umschlag (DU)“ bei den weiteren Prozessbeteiligten insgesamt 96000-mal pro Jahr durchzuführen, sodass sich diesbezüglich die folgenden jährlichen Kosten ermitteln lassen:

$$24000 \frac{IES}{Jahr} * 0,0416 \frac{€}{IES} + 96000 \frac{DU}{Jahr} * 0,0832 \frac{€}{DU} = 8985,60 \frac{€}{Jahr}$$

Weitere Personalkosten fallen in der Betriebsphase – wie bereits erwähnt – für Mitarbeiter des mittleren Managements an. Der für das Projektcontrolling sowie die gezielte Auswertung der aufgezeichneten Messdaten im Hinblick auf potenzielle Optimierungspotenziale zu leistende Aufwand wird an dieser Stelle mit insgesamt sechs Arbeitstagen pro Monat und Prozessbeteiligtem beziffert. Hieraus ergeben sich für die gesamte Lieferkette – mit Bezug auf die für Mitarbeiter des mittleren Managements bestimmten Personalkostensätze pro Zeiteinheit (vgl. **Tabelle 29**, S. 160) – die im Folgenden berechneten Kosten pro Jahr:

$$360 \frac{Arbeitsstage}{Jahr} * 338,94 \frac{€}{Arbeitsstag} = 122018,40 \frac{€}{Jahr}$$

Die in der **Tabelle 28** (S. 159) bereits aufgeführten und im weiteren Verlauf dieses Kapitels quantifizierten Kosten, die bei der Einführung einer qualitativen Überwachung einzelner Ladeeinheiten mithilfe energieautarker multisensorischer NFC-Transponder auftreten, werden in der folgenden **Tabelle 32** – unter Bezugnahme auf die **Formel 9** (S. 143 f.) – im Kontext der Kapitalwertmethode eingeordnet, um hierdurch die in der anschließend erfolgenden Kapitalwertberechnung verwendeten Parameter bzw. die dahinterstehenden Zahlenwerte zu verdeutlichen.

Tabelle 32: Einordnung der quantifizierten Kosten im Kontext der Kapitalwertmethode

Auftretende Kosten	Bei der Anschaffungsauszahlung im Zeitpunkt $t_0$ einmalig zu berücksichtigen:	Bei den Auszahlungen am Ende der Periode $t$ wiederkehrend zu berücksichtigen:
Personalkosten in der Planungsphase	33.894,00 €	
Kosten für die Beschaffung NFC-fähiger Smartphones	60.000,00 €	
Kosten für die Beschaffung energieautarker NFC-Sensortransponder	283.560,00 €	
Kosten für die Programmierung einer anwendungsgerechten Smartphone-Applikation	20.000,00 €	4.000,00 €
Kosten für Mitarbeiter-schulungen	10.000,00 €	
Personalkosten in der Realisierungsphase	67.788,00 €	
Wartungskosten für Hard- und Software		4.000,00 €
Kosten für die Cloud-Nutzung		1.000,00 €
Personalkosten für zusätzlich auszuführende Prozessschritte		8.985,60 €
Personalkosten für das Projektcontrolling und die gezielte Auswertung der aufgezeichneten Messwerte		122.018,40 €
<b>Gesamt</b>	<b>475.242,00 €</b>	<b>140.004,00 €</b>

Aus der **Tabelle 32** gehen die Werte hinsichtlich der zu tätigen Anschaffungsauszahlung im Zeitpunkt  $t_0$  ( $a_0$ ) sowie den Auszahlungen am Ende der Periode  $t$  ( $a_t$ ) hervor, die für eine mittels der Kapitalwertmethode erfolgende Bestimmung der absoluten Vorteilhaftigkeit energieautarker NFC-Sensortransponder im Vergleich zur Nullalternative erforderlich sind. Die Werte für die Einzahlungen am Ende einer Periode  $t$  ( $b_t$ ) ergeben sich indessen durch die Multiplikation der in der **Tabelle 27** (S. 159) angegebenen voraussichtlich erzielbaren Kosteneinsparungen pro Behälter und Jahr mit der gesamten sich im Umlauf befindlichen Behälteranzahl von 2000 Stück. Die hierauf basierende Kapitalwertberechnung, bei welcher der Kalkulationszinssatz  $i$  mit acht Prozent, der Betrachtungszeitraum mit fünf Jahren und der

Restwerterlös im Zeitpunkt  $n$  ( $R_n$ ) mit null Euro festgelegt wurden (vgl. **Formel 9**, S. 143 f.), ist in der nachfolgenden **Tabelle 33** dargestellt:

**Tabelle 33: NFC-Sensortransponder zur qualitativen Überwachung einzelner Ladeinheiten in der Distributionslogistik – Kapitalwertberechnung**

	<b>Jahr 0</b>	<b>Jahr 1</b>	<b>Jahr 2</b>	<b>Jahr 3</b>	<b>Jahr 4</b>	<b>Jahr 5</b>
$a_0$ [€]	- 475.242					
$a_t$ [€]		140.004	140.004	140.004	140.004	140.004
$b_t$ [€]		1.023.840	1.842.920	2.457.220	2.866.760	3.071.520
$(b_t - a_t)$ [€]		883.836	1.702.916	2.317.216	2.726.756	2.931.516
Abzinsungsfaktor $(1+i)^{-t}$ mit $i = 8\%$		0,926	0,857	0,794	0,735	0,681
Barwert [€]		818.367	1.459.976	1.839.481	2.004.247	1.995.141
<b>Kapitalwert [€]</b>	<b>- 475.242</b>	<b>343.125</b>	<b>1.803.101</b>	<b>3.642.582</b>	<b>5.646.829</b>	<b>7.641.970</b>

Aus der **Tabelle 33** heraus lässt sich ableiten, dass eine Amortisation der für eine mittels energieautarker multisensorischer RFID-Transponder mit NFC-kompatibler HF-Luftschnittstelle erfolgenden Zustandsüberwachung auf Ladeeinheitenebene erforderlichen Investitionen bereits im ersten Jahr eintritt. Betrachtet man bei der Durchführung einer Kritischen-Werte-Rechnung darüber hinaus die prozentualen Einsparungen bei der Entsorgungsquote, die notwendig sind, damit sich die im Rahmen des betrachteten Anwendungsfalls zu tätigen Investitionen exakt nach einem Jahr amortisieren, so ergibt sich in diesem Zusammenhang ein Mindestwert von 3,19 Prozent.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Zunächst konnten im Rahmen der vorliegenden Arbeit mittels der Durchführung umfangreicher Praxismessungen neue wissenschaftliche Erkenntnisse im Hinblick auf die innerhalb von TUL-Prozessen an einer Ladeeinheit vorhandenen Beschleunigungen, Temperaturdifferenzen (innerhalb und außerhalb einer Ladeeinheit) und Beleuchtungsstärken für die Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasser gewonnen werden.

Auf der Basis dieser Erkenntnisse konnten wiederum die Energy-Harvesting-Module des elektromagnetischen Vibrationsgenerators und der Solarzelle als die am besten zur Energieumwandlung im Zusammenhang mit logistischen Prozessen geeigneten Technologien identifiziert werden. Zudem wurde – auf der Grundlage der im Rahmen der Praxistests aufgezeichneten Beschleunigungsmesswerte – eine Spektralanalyse durchgeführt, um hierdurch für die verschiedenen betrachteten Verkehrsträger die Frequenzbereiche zu bestimmen, innerhalb derer die höchsten Amplituden der Beschleunigung zu erwarten sind, da dieses Wissen bei der Auswahl bzw. Optimierung von vibrationsbasierten Energiewandlern von entscheidender Bedeutung ist.

Vorherige wissenschaftliche Erkenntnisse zu den im Zusammenhang mit Straßen-, Schienen- und Seetransporten auftretenden Beschleunigungen sowie den relevanten Frequenzbereichen basierten ausschließlich auf Messungen, die auf der Ladefläche der jeweiligen Transportmittel durchgeführt wurden. Bezüglich der an einer Ladeeinheit zur Verfügung stehenden Umgebungsenergien lagen vor der Erstellung dieser Arbeit jedoch keine ausreichenden Informationen vor. Dies verdeutlicht den hohen Innovationsgrad der durchgeführten Messungen und der erzielten Ergebnisse.

Darauf aufbauend wurden im weiteren Verlauf u. a. ein elektromagnetischer Vibrationsgenerator, zwei Solarzellen, ein Energiemanagement-Modul sowie ein NFC-Sensortransponder zur beispielhaften Überwachung der Parameter Feuchte und Temperatur beschafft und hinsichtlich des speziellen Anwendungsfalls der qualitativen Überwachung einzelner Ladeeinheiten in der Distributionslogistik weiterentwickelt. Aus diesen Einzelkomponenten wurde anschließend ein Funktionsmuster eines energieautarken multisensorischen RFID-Transponders angefertigt, dessen grundsätzliche Funktionsfähigkeit im Rahmen von Laborversuchen nachgewiesen werden konnte. So ist beispielsweise die mechanische Energie, die bei einem

Straßentransport mithilfe eines elektromagnetischen Vibrationsgenerators in elektrische Energie umgewandelt werden kann, ausreichend für 13 Feuchte- und Temperaturmessungen pro Minute. Die Strahlungsenergie, die im Rahmen der Lagerung durch die ausgewählten Solarzellen in elektrische Energie umgewandelt werden kann, reicht indessen – bezogen auf ein „neutrales“ Szenario, bei dem die exemplarisch untersuchte Ladeinheit bzw. der thermoisolierte Rollbehälter derartig in einer Lagerhalle positioniert wurde, dass nur im Ausnahmefall, d. h. bei einem bestimmten Einfallswinkel der Lichtphotonen, eine direkte Sonneneinstrahlung möglich war – für 28 Feuchte- und Temperaturmessungen pro Minute.

Probleme ergaben sich bei der Funktionsmusterentwicklung insbesondere hinsichtlich der Identifikation eines geeigneten elektromagnetischen Vibrationsgenerators für den speziellen Einsatz innerhalb logistischer Prozesse, da die Entwicklungen bzw. Produkte in diesem Bereich häufig auf die Energieumwandlung im industriellen Umfeld und in diesem Zusammenhang auf die Applikation der Vibrationsgeneratoren an Maschinen abzielen. Da die an Maschinen auftretenden Schwingungen i. d. R. über relativ konstante Frequenzen verfügen, ist der Frequenzbereich, in dem diese Lösungen Energie erzeugen, auf eine sehr kleine Bandbreite um die Eigenfrequenz des Generators herum begrenzt. Im Zusammenhang mit Transportprozessen bestehen jedoch zum Teil starke Schwankungen in Bezug auf die vorhandenen Frequenzen.

Dieses führte bei den im Prüflabor durchgeführten praxisbezogenen Versuchen dazu, dass bei den Verkehrsträgern Schiene und Wasser durch den verwendeten elektromagnetischen Vibrationsgenerator mit der Eigenfrequenz von 12,3 Hertz keine elektrische Energie zur Verfügung gestellt werden konnte, da dieser lediglich in einem Frequenzbereich von 11 Hertz bis 15 Hertz Energie bereitstellte. Im Rahmen des durchgeführten Seetransportes traten allerdings in erster Linie Frequenzen im Bereich von 0,1 Hertz bis 0,3 Hertz auf, und bezogen auf den Bahntransport waren die höchsten Amplituden der Beschleunigung in einem Bereich von 104 Hertz bis 156 Hertz zu verzeichnen. Ein weiterer elementarer Nachteil sind die marktüblichen Preise sowie die Baugrößen aktuell verfügbarer elektromagnetischer Vibrationsgeneratoren, die unter Berücksichtigung der Kriterien der Wirtschaftlichkeit und der Praxistauglichkeit als zu hoch bzw. zu groß einzustufen sind.



Die wenig ausgereifte Technologie der vibrationsbasierten Energiewandler verfügt demnach über ein erhebliches technisches und wirtschaftliches Optimierungspotenzial, wobei die in der vorliegenden Arbeit erarbeiteten Ergebnisse in diesem Zusammenhang eine fundierte Grundlage für weiterführende Forschungsprojekte bzw. eventuelle zukünftige Produktentwicklungen bilden<sup>44</sup>, bei denen es vor allem die im Folgenden beschriebenen Punkte zu beachten bzw. umzusetzen gilt.

Als erstes sind hierbei eine spezielle Weiterentwicklung eines im Rahmen von Straßen- und Schienentransporten zum Einsatz kommenden elektromagnetischen Vibrationsgenerators sowie eine Neuentwicklung eines Generators zur Bereitstellung elektrischer Energie innerhalb von Seetransporten erforderlich. Diesbezüglich gilt es zunächst, die Eigenfrequenz der Generatoren entsprechend der in dieser Arbeit für die verschiedenen untersuchten Verkehrsträger aufgezeigten Frequenzbereiche mit den voraussichtlich höchsten Beschleunigungsamplituden anzupassen. Des Weiteren ist bei einem im Zusammenhang mit Straßen- und Schienentransporten eingesetzten Vibrationsgenerator die Frequenzbandbreite, innerhalb derer eine Energieumwandlung möglich ist, zu vergrößern, da die auftretenden Frequenzen hier zum Teil sehr stark variieren. Eine Anpassung der Eigenfrequenz lässt sich bei der Herstellung von elektromagnetischen Vibrationsgeneratoren beispielsweise durch Änderungen der Masse oder Federsteifigkeit erreichen, wobei eine größere Frequenzbandbreite z. B. durch eine Vergrößerung der Dämpfung realisiert werden kann. Im Zuge des technischen Fortschritts gilt es zudem, eine Miniaturisierung sowie niedrigere Marktpreise bei vibrationsbasierten Energiewandlern zu gewährleisten.

Bezüglich des Energiemanagement-Moduls ist darüber hinaus die Integration einer Backup-Batterie zur Sicherstellung der Energieversorgung in absoluten Worst-Case-Szenarien empfehlenswert. Zwar wurde die bei dem entwickelten Funktionsmuster eines energieautarken RFID-Sensortransponders erreichte Zeitspanne von rund 38 Minuten, innerhalb derer der Transponder bei einem gewählten Messintervall von vier Feuchte- und Temperaturmessungen pro Stunde ohne verfügbare Umgebungenergie betrieben werden kann, für die kurzzeitige Zwischenspeicherung im Rahmen

---

<sup>44</sup> Diesbezüglich gilt es einschränkend anzumerken, dass im Zusammenhang mit den Praxisuntersuchungen zwar eine nicht unerhebliche Datenmenge erhoben und systematisch ausgewertet wurde, diese sich jedoch lediglich auf exemplarisch betrachtete TUL-Prozesse der Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasser bezieht und sich bei veränderten Umgebungsbedingungen (z. B. stürmische See im Rahmen eines Seetransportes) auch andersartig darstellen kann.

des Energiemanagements als grundsätzlich ausreichend eingeordnet, jedoch treten in der logistischen Praxis z. T. auch Fälle auf (z. B. ein länger andauernder Verkehrsstau), in denen diese Zeitdauer nicht ausreicht. Ausschließlich in solchen Ausnahmefällen würde die Energieversorgung des Sensortransponders mithilfe der zusätzlich integrierten Primärzelle erfolgen, wodurch deren Lebensdauer wiederum erheblich verlängert werden könnte.

Damit zukünftig eine marktreife Technologie entstehen kann, die dem jeweiligen Anwender durch die Gewährleistung einer wirtschaftlich erfolgreichen qualitativen Überwachung einzelner Ladeeinheiten in der Distributionslogistik unter anderem die Möglichkeiten bietet, neue Anwendungsfelder und Kundenkreise zu erschließen, mittels einer verbesserten Prozessqualität eine Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit zu erreichen oder eventuelle Schadensersatzanforderungen abzuwenden, sind zudem eine Miniaturisierung des gesamten Zustandsüberwachungssystems sowie dessen sinnvolle Integration in das jeweils zu überwachende mehrwegfähige Transporthilfsmittel sicherzustellen.

## 9 Literaturverzeichnis

- [Alm14] Alminde, Oluf: *RFID-Tags mit Sensorikanbindung – Integrierter Temperatursensor für die drahtlose Erfassung von physiologischen oder Umweltdaten*. In: RFID im Blick, Heft 12-2013/1-2014, S. 42-43
- [ALS<sup>+</sup>14] Andre, Felix; Langer, Frederieke; Schwenzel, Julian et al.: *Energy storage options for self-powering devices*. In: Procedia Technology, 2014, S. 248-257
- [Alt09] Altenbernd, Gregor: *Entwicklung eines Instrumentariums der integrierten Angebotserstellung für Logistikdienstleister*. Dissertation, Universität Dortmund, Lehrstuhl für Fabrikorganisation, 2009
- [ASTM12] American Society for Testing and Materials (ASTM): *ASTM D4728 – 06 (Reapproved 2012) – Standard Test Method for Random Vibration Testing of Shipping Containers*. West Conshohocken: ASTM International, 2012
- [ASTM14] American Society for Testing and Materials (ASTM): *ASTM D4169 – 14 – Standard Practice for Performance Testing of Shipping Containers and Systems*. West Conshohocken: ASTM International, 2014
- [Bäh10] Bähring, Helmut: *Anwendungsorientierte Mikroprozessoren – Mikrocontroller und Digitale Signalprozessoren*. 4., vollständig überarbeitete Aufl., Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. – ISBN 3-642-12291-0
- [Bec11] Beck, Kristin: *Was für eine Verschwendung! Jacobs-Forscher decken Schwachstellen in der Lebensmittellogistik auf*. 2011. URL: <https://idw-online.de/de/news419416>, Abruf: 21.07.2017
- [BKS<sup>+</sup>11] Barthélemy, Frank; Knöll, Heinz-Dieter; Salfeld, André et al.: *Balanced Scorecard – Erfolgreiche IT-Auswahl, Einführung und Anwendung: Unternehmen berichten*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2011. – ISBN 3-8348-0686-4

- [Blu16] Bluetooth SIG Inc., 2016: URL: <https://www.bluetooth.com/what-is-bluetooth-technology/bluetooth-technology-basics/low-energy>, Abruf: 07.07.2016
- [BLW15] Busse von Colbe, Walther; Laßmann, Gert; Witte, Frank: *Investitionstheorie und Investitionsrechnung*. 4., vollständig überarbeitete Aufl., Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2015. – ISBN 3-540-56907-7
- [BMJV17a] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (BMJV): *Einkommensteuergesetz (EStG) – § 6 Bewertung*. 2017. URL: [https://www.gesetze-im-internet.de/estg/\\_\\_6.html](https://www.gesetze-im-internet.de/estg/__6.html), Abruf: 25.07.2014
- [BMJV17b] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (BMJV): *Einkommensteuer (EStG) – § 7 Absetzung für Abnutzung oder Substanzverringerung*. 2017. URL: [https://www.gesetze-im-internet.de/estg/\\_\\_7.html](https://www.gesetze-im-internet.de/estg/__7.html), Abruf: 25.07.2017
- [BMT16] B & M TRICON GmbH, 2016: URL: <http://www.bm-tricon.de/Default.aspx?Pageld=13>, Abruf: 22.09.2016
- [BO15] Bhatnagar, Vikrant; Owende, Philip: *Energy harvesting for assistive and mobile applications*. In: *Energy Science and Engineering*, Vol. 3, 2015, pp. 153-173
- [Bro08] Bronner, Albert: *Angebots- und Projektkalkulation – Leitfaden für Praktiker*. 3., aktualisierte Aufl., Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. – ISBN 3-540-75421-3
- [Bru09] Brugger, Ralph: *Der IT Business Case – Kosten erfassen und analysieren – Nutzen erkennen und quantifizieren – Wirtschaftlichkeit nachweisen und realisieren*. 2., korrigierte und erweiterte Aufl., Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. – ISBN 3-540-93857-3
- [BT14] Benecke, Stephan; Thomasius, Rolf: *Energy Harvesting – Entwicklung eines energieautarken Sensorsystems*. 2014. URL: <http://www.elektroniknet.de/power/energy-harvesting/artikel/106569/>, Abruf: 12.07.2016

- [Car08] Carstensen, Peter: *Investitionsrechnung kompakt – Eine anwendungsorientierte Einführung*. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2008. – ISBN 3-8349-1220-6
- [Cik15] CiK Solutions GmbH: *Mehrweg-Datenlogger*. In: PackReport, Heft 9/2015, S. 151
- [Con17] Conrad Electronic SE, 2017: URL: <https://www.conrad.de/de/solarzelle-05-v400ma-191281.html>, Abruf: 23.02.2017
- [CS08] Clasen, Michael; Stricker, Susanne: *Integrierte Sensoren erweitern Einsatzspektrum der RFID-Technologie*. Kiel: GIL-Jahrestagung, 2008. URL: [http://www.gil-net.de/Publikationen/20\\_31.pdf](http://www.gil-net.de/Publikationen/20_31.pdf), Abruf: 20.07.2017
- [Dem11] Dembowski, Klaus: *Energy Harvesting für die Mikroelektronik – Energieeffiziente und –autarke Lösungen für drahtlose Sensorsysteme*. Berlin; Offenbach: VDE Verlag GmbH, 2011. – ISBN 3-8007-3234-0
- [Dig17] Digi-Key Corporation, 2017: URL: <http://www.digikey.de/product-detail/de/panasonic-bsg/AM-5412CAR/869-1007-ND/2165192>, Abruf: 23.02.2017
- [DIN08a] Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.): *DIN EN 15433-2 – Transportbelastungen – Messen und Auswerten von mechanisch-dynamischen Belastungen – Teil 2: Datenerfassung und allgemeine Anforderungen an Messeinrichtungen*. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2008
- [DIN08b] Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.): *DIN EN 15433-4 – Transportbelastungen – Messen und Auswerten von mechanisch-dynamischen Belastungen – Teil 4: Datenauswertung*. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2008
- [DIN13] Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.): *DIN 30786-2 – Transportbelastungen – Datensammlung von mechanisch-dynamischen Belastungen – Teil 2: Wertesammlungen*. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2013

- [DIN14a] Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.): *DIN 55405 – Verpackung – Terminologie – Begriffe*. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2014
- [DIN14b] Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.): *DIN EN 60529 – Schutzarten durch Gehäuse (IP-Code)*. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2014
- [DIN15a] Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.): *DIN 30786-1 – Transportbelastungen – Datensammlung von mechanisch-dynamischen Belastungen – Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Übersicht über die Normenstruktur*. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2015
- [DIN15b] Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.): *DIN EN ISO 13355 (Entwurf) – Verpackung – Versandfertige Packstücke und Ladeeinheiten – Schwingprüfung mit vertikaler rauschförmiger Anregung*. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2015
- [Dis10] Diskus, Christian G.: *Energy Harvesting – ein Überblick*. In: *Elektrotechnik & Informationstechnik*, Heft 3/2010, S. 33-38
- [DR14] Diekmann, Bernd, Rosenthal, Eberhard: *Energie – Physikalische Grundlagen ihrer Erzeugung, Umwandlung und Nutzung*. 3., vollständig überarbeitete und erweiterte Aufl., Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2014. – ISBN 3-658-00500-9
- [Dre15] Dreyer+Timm GmbH: *Trailer und Fracht intelligent sichern*. In: *Verkehrsrundschau*, Heft 17/2015, S. 61
- [Ebr14] Ebro Electronic GmbH: *USB-Temperaturdatenlogger*. In: *pharmind*, Heft 3/2014, S. 475
- [Eik10] Eikelau, Marco: *Auswirkungen von Fehlern und Fehlerfolgekosten auf die Gewinnmarge von Kontraktlogistikgeschäften*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Lehrstuhl für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, 2010

- [Ent10] Entian, Sebastian: *Endbericht: Entwicklung eines multisensorischen Transponders zur Überwachung und Steuerung von logistischen Prozessen (AiF-Nr.: 15606 N)*, Institut für Distributions- und Handelslogistik des VVL e. V., Dortmund, 2010
- [Esys16] ESYS GmbH, 2016: URL: <http://www.esys.eu/details/ble-beschleunigungslogger-bluedan-axel-4.0.html>, Abruf: 05.07.2016
- [Fal16] Falkenstein, Anja: *Gut verpackt für lange Lieferketten*. In: Lebensmittel Zeitung 6 vom 12.02.2016, S. 50
- [Fer17] Ferro Solutions Inc., 2017: URL: <http://www.ferrosi.com/products.asp>, Abruf: 02.02.2017
- [Fin15] Finkenzeller, Klaus: *RFID-Handbuch – Grundlagen und praktische Anwendungen von Transpondern, kontaktlosen Chipkarten und NFC*. 7., aktualisierte und erweiterte Aufl., München: Carl Hanser Verlag, 2015. – ISBN 3-446-43943-6
- [FK16] Furrer, Lukas; Küng, Roland: *Energy Harvesting zum Aufladen des Akkus in einem RFID-Sensor-Label*. 2016. URL: <http://www.all-electronics.de/energy-harvesting-zum-aufladen-des-akkus-in-einem-rfid-sensor-label/>, Abruf: 26.09.2016
- [Fre16] Freescale Semiconductor: *Chapter 1 – Serial Peripheral Interface (SPIV3) Block Description*. URL: [http://www.nxp.com/files/microcontrollers/doc/ref\\_manual/S12SPIV3.pdf](http://www.nxp.com/files/microcontrollers/doc/ref_manual/S12SPIV3.pdf), Abruf: 14.11.2016
- [FSG08] Faupel, Titus; Strüker, Jens; Gille, Daniel: *Performance Improvements based on RFID – Empirical Findings from a Cross-sectoral Study*. In: *Proceedings of the Fourteenth Americas Conference on Information Systems (AMCIS)*. Toronto (ON), Canada, August 14<sup>th</sup> – 17<sup>th</sup> 2008

- [Gil10] Gille, Daniel: *Wirtschaftlichkeit von RFID-Systemen in der Logistik – Ex-Ante-Quantifizierung der ökonomischen Effekte allgegenwärtiger Informationsverarbeitung*. In: Picot, Arnold (Hrsg.); Reichwald, Ralf (Hrsg.); Franck, Egon (Hrsg.) et al.: *Markt- und Unternehmensentwicklung / Markets and Organisations*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2010. – ISBN 3-8349-2558-9
- [Göt14] Götze, Uwe: *Investitionsrechnung – Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben*. 7. Aufl., Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. – ISBN 3-642-54621-1
- [Gut14] Gutekunst, Jürgen: *Spannungsversorgungen*. In: Hering, Ekbert (Hrsg.); Bressler, Klaus (Hrsg.); Gutekunst, Jürgen (Hrsg.): *Elektronik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. 6., vollständig aktualisierte und erweiterte Aufl., Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. – ISBN 3-642-05498-3
- [GW08] Götze, Uwe; Weber, Thomas: *ZP-Stichwort: Total Cost of Ownership*. In: *Zeitschrift für Planung & Unternehmenssteuerung*, Heft 19/2008, S. 249-257
- [Hau16] Hausladen, Iris: *IT-gestützte Logistik – Systeme – Prozesse – Anwendungen*. 3., aktualisierte und erweiterte Aufl., Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2016. – ISBN 3-658-13079-4
- [HBB09] Hande, Abhiman; Bridgelall, Raj; Bhatia, Dinesh: *Energy Harvesting for Active RF Sensors and ID Tags*. In: Priya, Shashank (Hrsg.); Inman, Daniel J. (Hrsg.): *Energy Harvesting Technologies*. New York: Springer Science+Business Media, 2009. – ISBN 0-387-76463-4
- [Hel15] Heller, Holger: *Near Field Communication – Programmierbarer NFC-Sensor-Transponder von Texas Instruments*. 2015. URL: <http://www.elektronikpraxis.vogel.de/themen/hardwareentwicklung/datenkommunikationsics/articles/479260/>, Abruf: 25.11.2016



- [Her13] Herschmann, René: *NFC abseits von Mobile Payment – Smartphones bereiten den Weg für NFC – auch in der Industrie*. In: RFID im Blick, Heft 4/2013, S. 7
- [HHU11] Heiserich, Otto-Ernst; Helbig, Klaus; Ullmann, Werner: *Logistik – Eine praxisorientierte Einführung*. 4., vollständig überarbeitete und erweiterte Aufl., Wiesbaden: Gabler Verlag, 2011. – ISBN 3-8349-1852-9
- [II06] International Organization for Standardization (Hrsg.); International Electrotechnical Commission (Hrsg.): *ISO/IEC 15693-2 – Identification cards – Contactless integrated circuit cards – Vicinity cards – Part 2: Air interface and initialization*. Genf (Schweiz), 2006
- [II16] International Organization for Standardization (Hrsg.); International Electrotechnical Commission (Hrsg.): *ISO/IEC 14443-2 – Identification cards – Contactless integrated circuit cards – Proximity cards – Part 2: Radio frequency power and signal interface*. Genf (Schweiz), 2016
- [Ime16] Imec Messtechnik GmbH, 2016: URL: <http://www.imec.de/produkte/hardware/temperatur-datenlogger/tempmate-s1-v2.html>, Abruf: 04.07.2016
- [ITW16a] ITWissen.info: *Micro-Energy-Harvesting*. 2016. URL: <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Energy-Harvesting-energy-harvesting.html>, Abruf: 18.10.2016
- [ITW16b] ITWissen.info: *ByoD (bring your own device)*. 2016. URL: <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/ByoD-bring-your-own-device.html>, Abruf: 13.12.2016
- [JE11] Jansen, Rolf; Entian, Sebastian: *Transparente Transportprozesse durch multisensorische RFID-Transponder – Zustandsüberwachung in der Distributionslogistik*. In: ident Jahrbuch 2011, S. 108-111
- [Jed09] Jedermann, Reiner: *Autonome Sensorsysteme in der Transport- und Lebensmittellogistik*. Dissertation, Universität Bremen, Fachbereich für Physik und Elektrotechnik, 2009

- [JHH<sup>+</sup>15] Jülch, Verena; Hartmann, Niklas; Hussein, Noha Saad et al.: *Photovoltaik*. In: Wietschel, Martin (Hrsg.); Ullrich, Sandra (Hrsg.); Markewitz, Peter (Hrsg.) et al.: *Energietechnologien der Zukunft – Erzeugung, Speicherung, Effizienz und Netze*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015. – ISBN 3-658-07128-8
- [JS15] Jansen, Rolf; Siebels, Tim: *Energieautarke multisensorische RFID-Transponder – Vielversprechender Ansatz zur qualitativen Überwachung logistischer Prozesse*. In: Wolf-Kluthausen, Hanne (Hrsg.): *Jahrbuch Logistik 2015*. Korschenbroich: free beratung GmbH, 2015
- [JSS14] Jansen, Rolf; Siebels, Tim; Schneider, Jochen: *Qualitative Überwachung der Distributionskette – Energieautarke multisensorische RFID-Transponder als Lösungsansatz*. In: ident Jahrbuch 2014, S. 112-115
- [Jur15] Jurisch, Nadin: *Qualität und Frische im grünen Bereich – Intelligente Kühlkettenüberwachung mit RFID Sensoren*. In: ident, Heft 3/2015, S. 46-48
- [Kal14] Kals, Johannes: *Energiebilanzen in Unternehmen und Wertnetzen*. In: Gleich, Ronald (Hrsg.): *Energiecontrolling – Energiekosten systematisch steuern und senken*. 1. Aufl., München: Haufe-Lexware GmbH & Co. KG, 2014. – ISBN 3-648-04945-7
- [Kär07] Kärcher, Bernd: *Kabellose Zukunft?*. In: Computer&AUTOMATION, Heft 7/2007, S. 58-61
- [KD15] Kurzweil, Peter; Dietlmeier, Otto K.: *Elektrochemische Speicher – Superkondensatoren, Batterien, Elektrolyse-Wasserstoff, Rechtliche Grundlagen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015. – ISBN 3-658-10899-1
- [KDH<sup>+</sup>05] Kötz, Rüdiger; Dietrich, Philipp; Hahn, Matthias et al.: *Supercaps – Eigenschaften und Fahrzeuganwendungen*. Berlin, 2005, VDI-Berichte Nr. 1874, S. 175-188

- [Ker07] Kern, Christian: *Anwendung von RFID-Systemen*. 2., verbesserte Aufl., Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. – ISBN 3-540-44477-7
- [KK14] Krauß, Markus; Konrad, Rainer: *Drahtlose ZigBee-Netzwerke – Ein Kompendium*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2014. – ISBN 3-658-05820-3
- [KMR13] Küpfmüller, Karl; Mathis, Wolfgang; Reibiger, Albrecht: *Theoretische Elektrotechnik – Eine Einführung*. 19., aktualisierte Aufl., Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. – ISBN 3-642-37939-0
- [KN92] Kaplan, Robert S.; Norton, David P.: *The Balanced Scorecard – Measures that Drive Performance*. In: Harvard Business Review, January-February 1992, pp. 71-79
- [KN96] Kaplan, Robert S.; Norton, David P.: *The Balanced Scorecard – Translating strategy into action*. Boston (Massachusetts): Harvard business school press, 1996. – ISBN 0-87584-651-3
- [Kre12] Kreitmair, Markus: *Frachtmonitoring – Energieautarke Funktechnik in der Warenlogistik*. 2012. URL: <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/energieautarke-funktechnik-in-der-warenlogistik-a-380708/>, Abruf: 27.04.2016
- [Kre14] Kreuzer, Manne: *Zur Überwachung von Gebäuden und Umweltparametern – Basisplattform für drahtlose Sensornetzwerke*. In: Markt&Technik, Heft 41/2014, S. 16-17
- [KS14] Kreitmair, Markus; Schmidt, Frank: *Abschlussbericht zum Verbundvorhaben: Dynamisch, autonomes, energieautarkes Container Netzwerk in der Luftfrachtindustrie (DyCoNet)*, EnOcean GmbH, Oberhaching, 2014
- [Kuh95] Kuhn, Axel: *Prozessketten in der Logistik – Entwicklungstrends und Umsetzungsstrategien*. Dortmund: Verlag Praxiswissen, 1995. – ISBN 3-9294-4349-3

- [Kut14] Kuther, Thomas: *Energie ist überall – und sie lässt sich immer einfacher ernten*. 2014. URL:  
<http://www.elektronikpraxis.vogel.de/themen/hardwareentwicklung/powermanagement/stromversorgung/articles/446906/>, Abruf: 20.12.2016
- [KW08] Kanoun, Olfa; Wallaschek, Jörg: *Energy Harvesting – Grundlagen und Praxis energieautarker Systeme*. In: Brill, Ulrich (Hrsg.): *Haus der Technik Fachbuch*. Essen: Expert-Verlag, 2008. – ISBN 3-8169-2789-1
- [Lan14a] Lange, Barbara: *Mühsame Ernte*. 2014. URL:  
<http://www.heise.de/ix/artikel/Muehsame-Ernte-794666.html>, Abruf: 03.05.2016
- [Lan14b] Lange, Edgar: *Energy Harvesting stärkt das Sensornetzwerk*. In: VDI nachrichten, Nr. 3 vom 17.01.2014, S. 14
- [LG13] Lindemann, Ulrich; Gierens, Heribert: *Datentechnik*. In: Plaßmann, Wilfried (Hrsg.); Schulz, Detlef (Hrsg.): *Handbuch Elektrotechnik – Grundlagen und Anwendungen für Elektrotechniker*. 6., neu bearbeitete Aufl., Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2013. – ISBN 3-8348-1021-2
- [Lin13] Linear Technology Corporation: *DC2080A – Demo Manual*. 2013. URL:  
<http://cds.linear.com/docs/en/demo-board-manual/DC2080AF.PDF>, Abruf: 21.02.2017
- [Lin17a] Linear Technology Corporation: *LTC3588-1 – Nanopower Energy Harvesting Power Supply*. 2017. URL:  
<http://www.linear.com/product/LTC3588-1>, Abruf: 23.02.2017
- [Lin17b] Linear Technology Corporation: *LTC3108 – Ultralow Voltage Step-Up Converter and Power Manager*. 2017. URL:  
<http://www.linear.com/product/LTC3108>, Abruf: 23.02.2017
- [Lin17c] Linear Technology Corporation: *LTC3459 – 10V Micropower Synchronous Boost Converter in ThinSOT*. 2017. URL:  
<http://www.linear.com/product/LTC3459>, Abruf: 23.02.2017

- [Lor15] LORD Micro Strain Inc., 2015: URL: <http://www.microstrain.com/energy-harvester/eh-link>, Abruf: 05.08.2015
- [LR10] Langer, Josef; Roland, Michael: *Anwendungen und Technik von Near Field Communication (NFC)*. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. – ISBN 3-642-05496-9
- [LR14] Lin, Wie; Reeh, Marc-Oliver: *Kostengünstige Transportüberwachung mit NFC – Innovative Instrumente im Supply Chain Management*. In: ident Jahrbuch 2014, S. 129
- [Lum15] Lumedyne Technologies Inc., 2015: URL: <http://lumedynetechnologies.com/energy-harvester/>, Abruf: 06.08.2015
- [Man06] Mannel, André: *Prozessorientiertes Modell zur Bewertung der ökonomischen Auswirkungen des RFID-Einsatzes in der Logistik*. In: Jansen, Rolf (Hrsg.): Schriftenreihe Transport- und Verpackungslogistik – Forschungsberichte und Fachbeiträge. Bd. 67, Frankfurt am Main: Deutscher Fachverlag GmbH, 2006. – ISBN 3-36641-098-0
- [Mar09] Mars, Pierre: *Using a supercapacitor to manage your power*. In: Energy Harvesting Journal, 2009. URL: <http://www.energyharvestingjournal.com/articles/using-a-supercapacitor-to-manage-your-power-00001921.asp?sessionid=1>, Abruf: 22.11.2016
- [Mar14] Martin, Rolf: *Optoelektronik*. In: Hering, Ekbert (Hrsg.); Bressler, Klaus (Hrsg.); Gutekunst, Jürgen (Hrsg.): *Elektronik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. 6., vollständig aktualisierte und erweiterte Aufl., Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. – ISBN 3-642-05498-3
- [Mec13] MECOMO AG: *mecSOLAR – Die Lösung für grenzenloses Tracking*. In: ident Produkte 2013/2014, S. 51
- [MEK<sup>+</sup>12] Moser, André; Erd, Metin; Kostic, Milos et al.: *Thermoelectric Energy Harvesting from Transient Ambient Temperature Gradients*. In: Journal of ELECTRONIC MATERIALS, Vol. 41, No. 6, 2012, pp. 1653-1661

- [Mey09] Meyer, Angela: *Energie-Sammler – Kostenlose Stromversorgung per Energy Harvesting*. 2009. URL:  
<http://www.heise.de/mobil/artikel/Kostenlose-Stromversorgung-per-Energy-Harvesting-474994.html>, Abruf: 20.03.2013
- [Mic15] Micro-Sensys GmbH: *Mit dem Smartphone Temperatur und Luftfeuchtigkeit messen*. In: ident Produkte 2015/2016, S. 73
- [Mic16] Micro-Sensys GmbH, 2016: URL:  
<http://www.microsensys.de/sensoren/sensor-datenlogger.html>,  
Abruf: 22.09.2016
- [Mic17] Micro-Sensys GmbH, 2017: URL:  
<http://www.microsensys.de/sensoren/sensor-datenlogger/telidr300.html>,  
Abruf: 25.02.2017
- [ML14] Münch, Ulli; Loidl, Katrin A.: *Anpassungsfähig und kommunikativ – Drahtlose Sensornetze in der Praxis*. In: ident, Heft 2/2014, S. 48-50
- [MP09] Müller, Gerhard; Plate, Cathrin: *Anwendungsgebiete und Nutzen der RFID-Technologie in der Instandhaltung*. In: Reichel, Jens (Hrsg.); Müller, Gerhard (Hrsg.); Mandelartz, Johannes (Hrsg.): *Betriebliche Instandhaltung*. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. – ISBN 3-642-00501-5
- [MSR14] MSR Electronics GmbH: *3-Achsen-Schock-Datenlogger im Mini-Format – Schockwerte bis +/- 200 g messen*. In: Markt&Technik, Nr. 22/2014, S. 17
- [Nie11] Niedermayer, Michael: *Frühwarnsystem für Maschinenausfälle – Drahtlose Sensornetzwerke zum Condition Monitoring*. In: IT&Production, Heft 5/2011
- [OR15] Opresnik, Marc Oliver; Rennhak, Carsten: *Allgemeine Betriebswirtschaftslehre – Grundlagen unternehmerischer Funktionen*. 2., vollständig aktualisierte und überarbeitete Aufl., Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2015. – ISBN 3-662-44326-2

- [Ou14] Ou, Qing: *Vibration-based Energy Harvesting for Wireless Sensors used in Machine Condition Monitoring*. Dissertation, University of Canterbury, New Zealand, 2012
- [Pan12] Panasonic Corporation, 2012: URL: <http://mhtml.alldatasheet.com/html-pdf/537675/PANASONIC/EEUHD1A223/489/1/EEUHD1A223.html?lang=net>, Abruf: 01.03.2017
- [Per11] Perpetuum Ltd.: *Vibration Energy Harvesters vs Batteries*. 2011. URL: [http://www.perpetuum.com/resources/Top%20Ten%20Reasons\\_V1.pdf](http://www.perpetuum.com/resources/Top%20Ten%20Reasons_V1.pdf), Abruf: 28.04.2016
- [Per13] Perpetuum Ltd.: *Vibration Energy Harvesters*. 2013. URL: [http://www.perpetuum.com/resources/Vibration%20Energy%20Harvester\\_Data%20Sheet\\_21Oct13.pdf](http://www.perpetuum.com/resources/Vibration%20Energy%20Harvester_Data%20Sheet_21Oct13.pdf), Abruf: 04.08.2015
- [Per17] Perpetuum Ltd., 2017: URL: <http://www.perpetuum.com/rail/>, Abruf: 02.02.2017
- [Pog15] Poggensee, Kay: *Investitionsrechnung – Grundlagen – Aufgaben – Lösungen*. 3., überarbeitete Aufl., Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015. – ISBN 3-658-03090-2
- [PP12] Prockl, Günter; Pflaum, Alexander: *Mehr Transparenz in der Versorgungskette durch das „Internet der Dinge“*. In: Stölzle, Wolfgang (Hrsg.); Lieb, Thomas C. (Hrsg.): *Business Innovation in der Logistik – Chancen und Herausforderungen für Wissenschaft und Praxis*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2012. – ISBN 3-658-00643-3
- [PP14] Paul, Steffen; Paul, Reinhold: *Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik 1 – Gleichstromnetzwerke und ihre Anwendungen*. 5., aktualisierte Aufl., Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. – ISBN 3-642-53948-0
- [PSK08] Plötner, Olaf; Sieben, Barbara; Kummer, Tyge-F.: *Kosten- und Erlösrechnung – Anschaulich, kompakt, praxisnah*. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. – ISBN 3-540-78437-1

- [Pul09] Pulverich, Michael: *Dienstleistercontrolling*. In: Müller-Dauppert, Bernd (Hrsg.): *Logistik-Outsourcing – Ausschreibung, Vergabe, Controlling*. 2. Aufl., München: Verlag Heinrich Vogel GmbH, 2009. – ISBN 3-574-26090-2
- [Rau10] Raubenheimer, Heike: *Kostenmanagement im Outsourcing von Logistikleistungen*. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2010. – ISBN 3-8349-2080-5
- [Rei14] Reindl, Leonhard M.: *Funkauslesbare Sensoren*. In: Tränkler, Hans-Rolf (Hrsg.); Reindl, Leonhard M. (Hrsg.): *Sensortechnik – Handbuch für Praxis und Wissenschaft*. 2., völlig neu bearbeitete Aufl., Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. – ISBN 3-642-29941-4
- [Rob16] Robert Bosch GmbH: *Vernetzung bietet Chancen für die Logistik – Bosch will in der Logistik zusätzliche Geschäftspotenziale erschließen*. In: *Logistik für Unternehmen*, Heft 1/2-2016, S. 28-29
- [Röc14] Röcker, Rainer: *GDP & Transportprozess – Risikobasierte Umsetzung in der Praxis*. 2014. URL: [http://download.testotis.de/files/DE/Newsletter/VisionPharma2014-Session27\\_GDP\\_Transportprozess\\_Roecker.pdf](http://download.testotis.de/files/DE/Newsletter/VisionPharma2014-Session27_GDP_Transportprozess_Roecker.pdf), Abruf: 01.03.2017
- [Ros16] Rossmann, Axel: *Strukturbildung und Simulation technischer Systeme – Band 1: Die statischen Grundlagen der Simulation*, Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2016. – ISBN 3-662-46765-7
- [RS10] Rosentritt, Caroline; Seiter, Mischa: *GVB-Marktstudie – Top-Anbieter von Telematiksystemen in der Transportlogistik*. Rohr, 2010
- [SBF10] Skorna, Alexander C. H.; Bode, Christoph; Fleisch, Edgar: *Technologiebasiertes Risikomanagement in globalen Transportnetzwerken – Präventionsansätze in der Transportlogistik aus Versicherungsperspektive*. In: *Industrie Management*, Heft 5/2010, S. 14-18
- [Sch06] Schrödl, Holger: *Business Intelligence mit Microsoft SQL Server 2005*. München; Wien: Carl Hanser Verlag, 2006. – ISBN 3-446-40463-2



- [Sch07] Schlienz, Ulrich: *Schaltnetzteile und ihre Peripherie – Dimensionierung, Einsatz, EMV*. 3., aktualisierte und erweiterte Aufl., Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 2007. – ISBN 3-8348-0239-2
- [Sch08] Schwondra, Georg: *RFID und Sensorik*. In: Bartneck, Norbert (Hrsg.); Klaas, Volker (Hrsg.); Schönherr, Holger (Hrsg.): *Prozesse optimieren mit RFID und Auto-ID – Grundlagen, Problemlösungen und Anwendungsbeispiele*. Erlangen: Publicis Corporate Publishing, 2008. – ISBN 3-89578-319-7
- [Sch10a] Schwager, Jürgen: *Energy Harvesting: Kosten senken durch batterielosen Betrieb*. In: *Technik in Bayern*, Heft 06/2010, S. 6-7
- [Sch10b] Schmidt, Frank: *Strom aus der Umwelt*. In: *Technik in Bayern*, Heft 6/2010, S. 8-9
- [Sch10c] Schaufuß, Jörg: *Vibrationen zur Energieversorgung autarker Kleinsysteme*. In: *Technik in Bayern*, Heft 06/2010, S. 17-18
- [Sch10d] Schneider, Jochen: *Entwicklung eines Kennzeichnungssystems für Rund- und Schnittholz unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Wirtschafts- und Sozialwissenschaftliche Fakultät, 2010
- [Sch13] Schaufuß, Jörg: *Energieversorgung autarker Sensorsysteme im industriellen Umfeld durch kinetische Energiewandler mit Schwerpunkt auf dem elektrostatischen Wandlerprinzip*. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 2013
- [Sch15] Schöpker, Ulrich: *Fracht und Trailer immer in Echtzeit – volle Transparenz in der Supply Chain*. In: Voß, Peter H. (Hrsg.): *Logistik – eine Industrie, die (sich) bewegt – Strategien und Lösungen entlang der Supply Chain 4.0*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015. – ISBN 3-658-10608-9

- [Sch16] Schmitz Cargobull Telematics GmbH, 2016: URL: <http://www.cargobull-telematics.com/system/>, Abruf: 07.07.2016
- [SFS05] Santner, Guido; Felser, Max; Scheitlin, Hans: *Feldbusse ersetzen Kabelsalat – Artikelserie Automation: Kommunikation (3)*. In: Bulletin SEV/VSE, Heft 7/2005, S. 19-25
- [SHB12] Skorna, Alexander C. H.; Hirsbrunner, Philipp; Bode, Christoph: *Risikomanagement in Beschaffung und Distribution – Entwicklung eines technologieorientierten Maßnahmenrasters zur Schadenverhütung im Transport*. In: Bogaschewsky, Ronald (Hrsg.); Eßig, Michael (Hrsg.); Lasch, Rainer (Hrsg.) et al.: *Supply Management Research*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2012. – ISBN 3-8349-3927-2
- [Sho16a] ShockWatch Corporation, 2016: URL: <http://shockwatch.com/products>, Abruf: 09.06.2016
- [Sho16b] ShockWatch Corporation, 2016: URL: <http://shockwatch.com/products/impact-and-tilt/impact-indicators/shockwatch-label>, Abruf: 09.06.2016
- [Sie13] Siebels, Tim: *Qualitative Überwachung von TUL-Prozessen – Vision der Energieautarkie bei multisensorischen RFID-Transpondern*. In: Pack-Report, Heft 4/2013, S. 78-80
- [Sie14a] Siebels, Tim: *Schlussbericht: Entwicklung energieautarker multisensorischer RFID-Transponder zur qualitativen Überwachung von TUL-Prozessen (IGF-Nr.: 17593 N / 1)*, Institut für Distributions- und Handelslogistik des VVL e. V., Dortmund, 2014
- [Sie14b] Siebels, Tim: *Condition-Monitoring in der Distributionslogistik – Ein häufig vernachlässigtes Thema*. In: Pack & Log, Heft 5/2014, S. 26-28
- [Sie14c] Siebels, Tim: *Die Logistikkette zuverlässig überwachen – Energieautarke multisensorische RFID-Transponder erweisen sich als praktikable Lösung*. In: f+h, Heft 9/2014, S. 12-15

- [Sil13] Silicon Laboratories Inc., 2013: URL:  
<http://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/efm32gg-stk3700-ug.pdf>, Abruf: 03.03.2017
- [SM15] Stiewe, Christian; Müller, Eckhard: *Anwendungspotential thermoelektrischer Generatoren in stationären Systemen – Chancen für NRW: Studie im Auftrag des Ministeriums für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen*. DLR-Forschungsbericht, 2015
- [Spe15] Specovius, Joachim: *Grundkurs Leistungselektronik – Bauelemente, Schaltungen und Systeme*. 7., aktualisierte und überarbeitete Aufl., Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015. – ISBN 3-658-03308-8
- [SS03] Stüllenberg, Frank; Schulze im Hove, Anne: *Die Netzwerk-Balanced Scorecard als Instrument des Netzwerk-Controlling*. Universität Dortmund, Lehrstuhl Industriebetriebslehre, 2003. – ISSN 1612-1376
- [SS14] Sterner, Michael; Stadler, Ingo: *Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration*. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. – ISBN 3-642-37379-4
- [Sti16] Stiny, Leonhard: *Aktive elektronische Bauelemente – Aufbau, Struktur, Wirkungsweise, Eigenschaften und praktischer Einsatz diskreter und integrierter Halbleiter-Bauteile*. 3., überarbeitete Aufl., Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2016. – ISBN 3-658-14386-2
- [Stra05] Strassner, Martin: *RFID im Supply Chain Management – Auswirkungen und Handlungsempfehlungen am Beispiel der Automobilindustrie*. Dissertation, Universität St. Gallen, Hochschule für Wirtschafts-, Rechts- und Sozialwissenschaften (HSG), 2005

- [Sum09] Summer, Nikolaus: *Energieautarke Sensoren machen Jets sicherer – Auffindbarkeit von Materialrissen und –schäden verringert Unfallrisiko*. 2009. URL: <http://www.innovations-report.de/html/berichte/interdisziplinaere-forschung/energieautarke-sensoren-jets-sicherer-142093.html>, Abruf: 19.10.2016
- [Swe13] Swedberg, Claire: *AMS Sees Potential Medical Application for Its HF Data-logging RFID Chip*. 2013. URL: <http://www.rfidjournal.com/articles/view?10968>, Abruf: 23.09.2016
- [Swe14] Swedberg, Claire: *Smartrac Group and RFMicron to Develop Passive Sensor Tags*. 2014. URL: <http://www.rfidjournal.com/articles/view?11677>, Abruf: 21.09.2016
- [SWF<sup>+</sup>06] Sprenger, Christian; Wecker, Frank; Franke, Werner (Hrsg.) et al.: *RFID – Leitfaden für die Logistik – Anwendungsgebiete, Einsatzmöglichkeiten, Integration, Praxisbeispiele*. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2006. – ISBN 3-8349-0303-7
- [Tes16] Testo AG, 2016: URL: <https://www.testo.de/produkte/produktdetailseite.jsp?productNo=0572%2B1846>, Abruf: 06.07.2016
- [TH11] Ten Hompel, Michael (Hrsg.); Heidenblut, Volker: *Taschenlexikon Logistik – Abkürzungen, Definitionen und Erläuterungen der wichtigsten Begriffe aus Materialfluss und Logistik*. 3., bearbeitete und erweiterte Aufl., Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. – ISBN 3-642-19944-8
- [Tor14] Torvmark, Karl: *Bluetooth v4.0 – Drei Bluetooth-Varianten und wann sie zum Einsatz kommen*. In: *ident*, Heft 2/2014, S. 54-57
- [Trä14] Tränkler, Hans-Rolf: *Einführung in die Sensortechnik*. In: Tränkler, Hans-Rolf (Hrsg.); Reindl, Leonhard M. (Hrsg.): *Sensortechnik – Handbuch für Praxis und Wissenschaft*. 2., völlig neu bearbeitete Aufl., Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. – ISBN 3-642-29941-4

- [Val16] Value-ID GmbH, 2016: URL: <http://www.value-id.com/produkte/active-rfid-system-3000/transponder/>, Abruf: 22.09.2016
- [VDI02] Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI): *VDI-Richtlinie 4400 – Blatt 3 – Logistikkennzahlen für die Distribution*. Bd. 8: VDI-Gesellschaft Fördertechnik Materialfluss Logistik (Hrsg.), VDI-Handbuch Materialfluss und Fördertechnik, Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2002
- [VDI03] Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI): *VDI-Richtlinie 4460 – Mehrwegtransportverpackungen und Mehrwegsysteme zum rationellen Transport*. Bd. 6: VDI-Gesellschaft Fördertechnik Materialfluss Logistik (Hrsg.), VDI-Handbuch Materialfluss und Fördertechnik, Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2003
- [VDI09] Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI): *VDI-Richtlinie 4472 – Blatt 4 – Anforderungen an Transpondersysteme (RFID) zum Einsatz in der Supply Chain – Kosten-Nutzenbewertung von RFID-Systemen in der Logistik*. Bd. 6: VDI-GPL (Hrsg.), VDI-Handbuch Materialfluss und Fördertechnik, Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2009
- [VDI13] Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI): *VDI-Richtlinie 3968 – Blatt 1 – Sicherung von Ladeeinheiten*. Bd. 6: VDI-GPL (Hrsg.), VDI-Handbuch Technische Logistik, Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2013
- [VRE15] Voßhoff, Andrea; Raum, Bertram; Ernestus, Walter: *Telematik im Gesundheitswesen – Wo bleibt der Schutz der Gesundheitsdaten?*. In: Bundesgesundheitsblatt, Heft 10/2015, S. 1094-1100
- [VW08] Vilkov, Lev; Weiß, Burkhard: *Prozessorientierte Wirtschaftlichkeitsanalyse von RFID-Systemen anhand eines Referenz-Wirkungsmodells*. In: Becker, Jörg (Hrsg.); Knackstedt, Ralf (Hrsg.); Pfeiffer, Daniel (Hrsg.): *Wertschöpfungsnetzwerke – Konzepte für das Netzwerkmanagement und Potenziale aktueller Informationstechnologien*. Heidelberg: Physica-Verlag, 2008. – ISBN 3-7908-2055-3

- [Wag15] Wagner, Andreas: *Photovoltaik Engineering – Handbuch für Planung, Entwicklung und Anwendung*. 4. Aufl., Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2015. – ISBN 3-662-48639-9
- [Wal07] Wallaschek, Jörg: *Energy Harvesting – Grundlagen und Praxis energieautarker Systeme*. Vortrag des Instituts für Dynamik und Schwingungen der Leibniz Universität Hannover, Essen, 2007. URL: [http://www.ids.uni-hannover.de/fileadmin/IDS/mitarbeiter/wallaschek/2007\\_11\\_20\\_Energy\\_Harvesting\\_HDT\\_Essen.pdf](http://www.ids.uni-hannover.de/fileadmin/IDS/mitarbeiter/wallaschek/2007_11_20_Energy_Harvesting_HDT_Essen.pdf), Abruf: 18.10.2016
- [WE10] Wagemann, Hans-Günther; Eschrich, Heinz: *Photovoltaik – Solarstrahlung und Halbleitereigenschaften, Solarzellenkonzepte und Aufgaben*. 2., überarbeitete Aufl., Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2010. – ISBN 3-8348-0637-6
- [Web12] Weber, Jürgen: *Logistikkostenrechnung – Kosten-, Leistungs- und Erlösinformationen zur erfolgsorientierten Steuerung der Logistik*. 3. Aufl., Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. – ISBN 3-642-25172-6
- [Wer12] Werner, Martin: *Digitale Signalverarbeitung mit MATLAB® – Grundkurs mit 16 ausführlichen Versuchen*. 5., durchgesehene und aktualisierte Aufl., Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012. – ISBN 3-8348-1473-9
- [WH00] Wild, Martin; Herges, Sascha: *Total Cost of Ownership (TCO) – Ein Überblick*. In: Arbeitspapiere WI, Nr. 1/2000, Universität Mainz, Lehrstuhl für Allg. BWL und Wirtschaftsinformatik (Hrsg.), 2000
- [Wüs11] Wüst, Klaus: *Mikroprozessortechnik – Grundlagen, Architekturen, Schaltungstechnik und Betrieb von Mikroprozessoren und Mikrocontrollern*. 4., aktualisierte und erweiterte Aufl., Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2011. – ISBN 3-8348-0906-3

- [WV16] Wesselak, Viktor; Voswinckel, Sebastian: *Photovoltaik – Wie Sonne zu Strom wird*. 2. Aufl., Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2016. – ISBN 3-662-48905-5
- [Yil09] Yildiz, Faruk: *Potential Ambient Energy-Harvesting Sources and Techniques*. In: *The Journal of Technology Studies*, Vol. 35, 2009, pp. 40-48
- [Zan14] Zangemeister, Christof: *Nutzwertanalyse in der Systemtechnik – Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen*. 5., erweiterte Aufl., Hamburg: Zangemeister & Partner, 2014. – ISBN 3-923264-00-1
- [ZRL<sup>+</sup>12] Zöller, Sebastian; Reinhardt, Andreas; Lampe, Ulrich et al.: *Kontextbasierte Eventerkennung in der Logistik mit drahtloser Sensornetztechnologie*. In: Mattfeld, Dirk Christian (Hrsg.); Robra-Bissantz, Susanne (Hrsg.): *Tagungsband der Multikonferenz Wirtschaftsinformatik 2012*. Berlin: GITO Verlag, 2012. – ISBN 3-9421-8363-5
- [ZSD<sup>+</sup>16] Ziolkowski, Pawel; Stiewe, Christian; de Boor, Johannes et al.: *Iron Disilicide as High-Temperature Reference Material for Traceable Measurements of Seebeck Coefficient Between 300 K and 800 K*. In: *Journal of ELECTRONIC MATERIALS*, 2016, pp. 1-13