



Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik  
Fachgebiet Elektrische Energieversorgung  
Prof. Dr.-Ing. habil. L. Hofmann



Leibniz  
Universität  
Hannover

## **Leibniz Universität Hannover**

Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik

Fachgebiet Elektrische Energieversorgung

Forschungsprojekt im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen

**FE 15.0547 / 2011 / LRB**

**Intelligente Bauwerke –**

**Konzepte und Verfügbarmachung**

**intelligenter Energieversorgung am Bauwerk**

**die energieautarke Brücke**

Abschlussbericht

Bearbeiter: Hauke Huisinga M. Sc.  
Dipl.-Ing. Michael Mohrmann  
Prof. Dr.-Ing. habil. L. Hofmann

Hannover, 23.05.2014



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Überblick</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Einleitung / Konzept</b> .....	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Verbrauchsmomente am Accesspoint</b> .....	<b>4</b>
4.1	Platzbedarf und Aufstellungsort.....	8
<b>5</b>	<b>Energiebereitstellung am Accesspoint</b> .....	<b>9</b>
5.1	Kleinwindenergieanlagen.....	9
5.1.1	Meteorologischen Grundlagen der Windentstehung.....	9
5.1.2	Technische Windnutzung.....	11
5.1.3	Rotorformen .....	15
5.1.4	Typen.....	17
5.1.5	Leistungsreglung .....	18
5.1.6	Leistungswandlung .....	20
5.1.7	Typische Kosten von KWEA.....	23
5.2	Photovoltaik .....	24
5.2.1	Die Sonne als Energiequelle .....	24
5.2.2	Solarzellen.....	27
5.2.3	Betriebsverhalten von Photovoltaikanlagen.....	31
5.2.4	Typische Kosten von PV-Anlagen.....	37
<b>6</b>	<b>Energiespeicher</b> .....	<b>39</b>
6.1	Verfügbare Energiespeicher.....	39
6.2	Dimensionierung der Energiespeicher .....	41
6.3	Typische Kosten von Batteriespeichern.....	42
<b>7</b>	<b>Zusammenwirken von Photovoltaik- und Kleinwindenergieanlagen</b> .....	<b>44</b>
<b>8</b>	<b>Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Wartung</b> .....	<b>45</b>
<b>9</b>	<b>Lebenszyklus, Nachhaltigkeit und Emissionen</b> .....	<b>46</b>
9.1	Energieerzeugungsanlagen.....	46
9.1.1	Photovoltaik .....	46
9.1.2	Kleinwindenergieanlagen.....	47
9.2	Energiespeicher .....	47

<b>10</b>	<b>Kommerzielle Inselsysteme.....</b>	<b>48</b>
<b>11</b>	<b>Autarke Stromversorgungskonzepte .....</b>	<b>50</b>
<b>12</b>	<b>Einleitung / Konzept.....</b>	<b>61</b>
<b>13</b>	<b>Verbrauchsmomente auf Sensorebene .....</b>	<b>62</b>
13.1	Energiebedarf der Sensorik .....	62
13.1.1	Temperatur .....	62
13.1.2	Feuchtigkeit .....	64
13.1.3	Korrosion.....	68
13.1.4	Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsgrößen .....	71
13.1.5	Weg-, Verzerrungs- und Winkelgrößen .....	74
13.1.6	Bewertung des Einsatzes von Sensorik für autarke Einsatzgebiete ....	80
13.2	Mikrocontroller .....	81
13.2.1	Low Power Architektur .....	82
13.3	Funktechnologie.....	84
13.3.1	Funkstandards .....	84
13.3.2	Netzwerktopologie .....	86
<b>14</b>	<b>Energiebereitstellung auf Sensorebene .....</b>	<b>87</b>
14.1	Energy Harvester.....	87
14.1.1	Solarzelle .....	87
14.1.2	Thermoelektrische Generatoren .....	89
14.1.3	Elektrodynamische Wandler .....	95
14.1.4	Piezo-Generatoren.....	98
14.1.5	Energie aus HF-Strahlung .....	102
14.1.6	Weitere Energy Harvester .....	102
14.1.7	Bewertung der Energy Harvester .....	102
14.2	Energiespeicher .....	103
14.2.1	Aufgabenstellung .....	103
14.2.2	Akkumulatoren.....	103
14.2.3	Kondensatoren.....	105
14.2.4	Limitation .....	106
<b>15</b>	<b>Energieangebot an Brückenbauwerken .....</b>	<b>107</b>
15.1	Globalstrahlung .....	107
15.2	Vibrationen.....	108

---

15.3	Temperaturdifferenzen an Brückenbauwerken .....	114
15.3.1	Auswertung realer Temperaturmesskurven .....	118
<b>16</b>	<b>Monitoring-Szenarien .....</b>	<b>127</b>
16.1	Brückenbestand .....	127
16.2	Bauwerksarten und Schadensbilder .....	129
16.3	Musterlösungsansätze für Monitoring-Szenarien .....	132
<b>17</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>145</b>
<b>18</b>	<b>Literaturverzeichnis Accesspoint.....</b>	<b>149</b>
<b>19</b>	<b>Literaturverzeichnis Knotenautarke Versorgung.....</b>	<b>152</b>
<b>20</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>156</b>
20.1	Temperaturmesskurven .....	156
20.2	Parameter des Microcontrollers .....	156
20.3	Parameter der Sensoren.....	157
20.4	Parameter des Funkchips .....	158

# 1 Überblick

## Gesamtziel des Forschungsprojekts

Im Rahmen des Projektes werden für die Energieversorgung von Brückenbauwerken verfügbare Energieerzeugungssysteme eruiert. Aufbauend auf dieser Marktanalyse erfolgt die Katalogisierung der Systeme anhand ihrer Leistung und Eignung für alle klimatischen Bedingungen. Als Gesamtergebnis werden geeignete Musterlösungen für verschiedene Monitoring-Szenarien abgeleitet und geeignete Versorgungskonzepte beschrieben.

## Wirtschaftliche, wissenschaftliche und technische Bedeutung

Autarke Energieversorgungssysteme können ohne Verbindung zu Leitungsinfrastrukturen den Betrieb von Diagnosesystemen zur Zustandserkennung von Bauwerken sicherstellen. Auf diese Weise kann kostenintensiver Ausbauraufwand vorhandener Strukturen vermieden werden. Außerdem wird der Vorteil der geringeren Störanfälligkeit dieser Systeme genutzt.

## Methodik des Vorgehens

- 1 Marktanalyse
- 2 Beurteilung und Katalogisierung der Rechercheergebnisse
  - 2.1 Leistung
  - 2.2 Klimatische Parameter
  - 2.3 Standzeiten und Verfügbarkeit
  - 2.4 Hybridsysteme
  - 2.5 Wartung und Störanfälligkeit
- 3 Szenarien
- 4 Rahmenbedingungen
- 5 Einflüsse der Anlagen
- 6 Anwendung
  - 6.1 Evaluierung
  - 6.2 Musterlösungen
  - 6.3 Sensor- und knotenautarkes Konzept
  - 6.4 Stromversorgung für mittlere Leistungsbereiche
- 7 Dokumentation

## 2 Einleitung

Der vorliegende Abschlussbericht zum FE 15.0547/2011/LRB „Intelligente Bauwerke – Konzepte und Verfügbarmachung intelligenter Energieversorgung am Bauwerk die energieautarke Brücke“ – „Bewertung verschiedener energieautarker Stromversorgungskonzepte für Komponenten des Brückenzustandsmonitoring“ ist thematisch und strukturell in zwei Abschnitte aufgeteilt. Der erste Abschnitt behandelt die Energiebereitstellung, die Speicherung und den Abruf von Energie im mittleren Leistungsbereich zur Versorgung eines Rechner- und Kommunikationssystems am so genannten „Accesspoint“, dem drahtlosen Datenübergabepunkt am Bauwerk. Dabei werden die Möglichkeiten zur autarken Energiegewinnung sowie Leistungsparameter der entsprechenden Energieerzeugungsanlagen als auch Abhängigkeiten und Einschränkungen untersucht, dargestellt und bewertet.

Der zweite Abschnitt betrachtet die Energieversorgung der zur Überwachung des Brückenbauwerks eingesetzten Sensorik in einem knotenautarken Versorgungskonzept. Das verfügbare Energieangebot im Nahbereich der Sensorik ist jedoch sehr gering und zusätzlich zeitlich und örtlich abhängig von verschiedenen klimatischen und strukturellen Parametern, sodass die Notwendigkeit des Einsatzes energieoptimierter Sensorik entsteht als auch Lösungen für die Überbrückung dieser Versorgungsengpässe mittels Energiespeichern betrachtet werden müssen.

### 3 Einleitung / Konzept

Für ein zukünftig einsetzbares Monitoring von Brückenbauwerken werden Systeme zur Energieversorgung der Diagnose- und Sensortechnik notwendig sein. Die Verarbeitung und Zwischenspeicherung der am Bauwerk erfassten Daten erfolgt in Rechnersystemen direkt vor Ort. Die Fernübertragung der gewonnenen Daten kann bspw. mittels Mobilfunk durchgeführt werden. Die Versorgung der benötigten Datenverarbeitungs- und Datenübertragungskomponenten mit elektrischer Energie ist somit die Hauptaufgabe der geplanten autarken Energieversorgungssysteme.

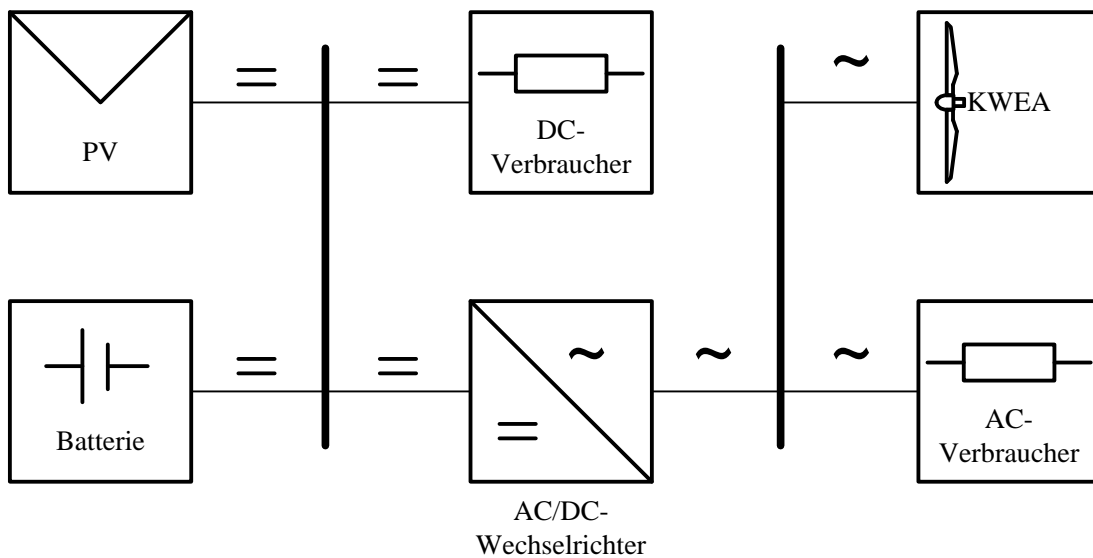
Für die autarke Energieversorgung werden auf dem Markt etablierte Versorgungskonzepte mit Photovoltaik- und/oder Kleinwindenergieanlagen zu Grunde gelegt und den erforderlichen mittleren Leistungsbedarfen der Datenverarbeitungskomponenten angepasst. Diese zwei Arten von Energieerzeugungsanlagen sind grundsätzlich zur Bereitstellung der erforderlichen Leistungen und Energiemengen geeignet. Systeme auf der Basis von Verbrennungsmaschinen und Brennstoffzellenanlagen werden im Rahmen des Projekts nicht betrachtet, da diese jeweils die Versorgung mit Brennstoffen erfordern.

Die Energiegewinnung aus einer kombinierten Nutzung von Wind und Sonne ist aufgrund von saisonalen sowie täglichen Schwankungen des jeweiligen Energiedargebots interessant. Zusätzlich sind elektrische Energiespeicher für eine kontinuierliche Versorgung vorzusehen. Deren Dimensionierung von den gewählten Leitungsklassen der Verbraucher sowie der möglichen Kombination der jeweiligen Erzeugungsanlagen abhängig ist. Im Folgenden soll beispielhaft das grundsätzliche Konzept dargestellt werden.

Für die Versorgung wird ein elektrisches Netz aufgebaut. Dieses zeigt die Darstellung in **Bild 3.1**. Es besteht aus den Komponenten Photovoltaikanlage (PV), Kleinwindenergieanlage (KWEA), Batteriesystem und Wechselrichter sowie den zu versorgenden Gleichspannungs- (DC) und Wechselspannungsverbrauchern (AC).

Dabei werden in den folgenden Kapiteln alle einzelnen Komponenten dieses Systems betrachtet und ihre Einsatzmöglichkeiten am Brückenbauwerk analysiert und bewertet.

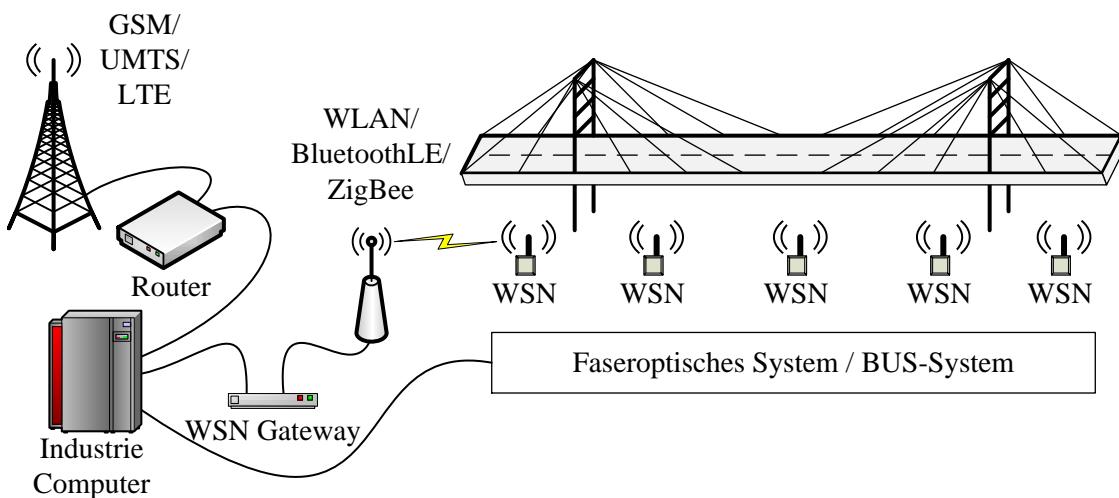




**Bild 3.1** Blockschaltbild eines Hybridsystems

#### 4 Verbrauchsmomente am Accesspoint

In diesem Kapitel werden das Systemdesign sowie der Platz- und Leistungsbedarf der einzelnen Verbraucher am Accesspoint, dem drahtlosen Datenübergabepunkt am Bauwerk, dargestellt. Die am Accesspoint eingesetzten Verbraucher, Industriecomputer, Router, WSN-Gateway (Wireless Sensor Node) und in Abhängigkeit des Monitoring-Szenarios bzw. der eingesetzten Sensorik auch die Auswerteeinheit faseroptischer Systeme oder das Interface und die Stromversorgung für ein BUS-System, sind in **Bild 4.1** anschaulich dargestellt.



**Bild 4.1** Verbraucher am Accesspoint,

Ebenfalls ist aus **Bild 9.1** der Informationsfluss vom Sensorknoten über den Indust-

riecomputer mit Zwischenspeicherung und Aufbereitung der Daten hin zur Übermittlung an eine zentrale überregionale Überwachungs- und Analyseeinheit ersichtlich.

Dabei kann die ausschließliche Verwendung von DC-Verbrauchern gewisse Vorteile mit sich bringen. So könnten etwa AC-Komponenten wie bspw. Wechselrichter eingespart werden. Dies führt zu Kosteneinsparungen und durch den Einsatz von weniger Komponenten auch zu einer geringeren Störanfälligkeit des Gesamtsystems. Weiterhin muss in einem AC-System und einer dort angeschlossenen KWEA immer eine Synchronisierung mit dem vom Wechselrichter aufgebauten Netz erfolgen. Die Synchronisation benötigt eine gewisse Zeit, sodass die Energie die in Böen steckt teilweise bzw. je nach Windgeschwindigkeit gar nicht genutzt werden kann. Daher wird der Fokus im Folgenden auf ein reines DC-System gelegt.

Für die in **Bild 4.1** dargestellten Betriebsmittel, Embedded PC, Router und WSN-Gateway, werden in den folgenden Tabellen Betriebsmittel dargestellt um eine Abschätzung des Energiebedarfs am Accesspoint zu bekommen.

**Tabelle 4.1** Embedded PC's

	Impact-E 30 Amplicon	SIMATIC IPC227D Simens	eBOX620-823-FL Axiomtek
Temperaturbereich in °C	-20 bis +50	0 bis 50	-40 bis 65
LAN Ports	2	2	1
<b>Spannungsversorgung in V</b>	<b>9 bis 36 (DC)/ 100 bis 240 (AC)</b>	<b>20,4 bis 28,8 (DC)</b>	<b>12 bis 24 (DC)</b>
<b>Leistung in W</b>	<b>11,04 (inaktiv) / 11,04 ~ 17,52 (typ.) / 70 W (max.)</b>	<b>14,4 W</b>	<b>36 W</b>
<b>Ausmaße</b>	<b>268 (B) x 65 (H) x 190 (T) mm<sup>3</sup></b>	<b>191 (B) x 100 (H) x 60 (T) mm<sup>3</sup></b>	<b>200 (B) x 120 (H) x 60 (T) mm<sup>3</sup></b>
Feldausfallrate	0,02 %	-	-

Tabelle 4.2 Router

	IGW/922 SSV Software Systems	MC-MRE /MRH MC-Technologies	PSI-Modem Router Phoenix Contact
Temperaturbereich in °C	0 bis 70 (-20 auf Auskunft)	-25 bis 75	-25 bis 65
LAN Ports	2	2	1
<b>Spannungsversorgung in V DC</b>	<b>11 bis 28</b>	<b>10 bis 30</b>	<b>10 bis 30</b>
<b>Leistung in W</b>	<b>&lt; 5(typ.)</b>		<b>&lt;2,2 (sleep) &lt;4,8 (typ.) &lt;8 (max.)</b>
Datenübertragung	GSM/GPRS UMTS/HSPA	GPRS/EDGE (MRE) Bis 236 kbps up- & downlink UMTS/HSPA+ (MRH) Bis 5,7 Mbps (up) bis 14,4 Mbps (down)	GSM/GPRS/EDGE/ UMTS/HSPA
<b>Ausmaße in mm<sup>3</sup></b>	<b>112 (B) x 100 (H) x 45 (T)</b>		<b>45 (B) x 99 (H) x 115 (T)</b>

Tabelle 4.3 WSN Gateways

	WSN-9791 National Instruments	WSDA –1000 –LXRS LORD MicroStrain	IE/WSN-PA Link Simens	FL BT EPA MP Phoenix Contact
Temperaturbereich in °C	-30 bis +70	-40 bis +85	-40 bis +70	-40 bis +65
Standard	IEEE 802.15.4 ZigBee	IEEE 802.15.4 ZigBee	IEEE 802.15.4 WirelessHART	Bluetooth
LAN Ports	1	1	3	1
<b>Spannungsversorgung in V DC</b>	<b>9 bis 30</b>	<b>7 bis 36</b>	<b>20 bis 28</b>	<b>9 bis 30</b>
<b>Leistung in W</b>	<b>4,5 W (max.)</b>	<b>1,4 W (typ.) / 2 W (max.)</b>	<b>15W</b>	<b>1,1 (typ.)</b>
Anzahl der Sensoren	36		100	7
<b>Abmessungen</b>		<b>146 (B) x 109 (H) x 23 (T) mm<sup>3</sup></b>	<b>229 (B) x 306 (H) x 89 (T) mm<sup>3</sup></b>	<b>66 (B) x 91 (H) x 34 (T) mm</b>

Für die Auslegung der Energieerzeugungseinheiten (Leistung) und der Energiespeicher

(Leistung und Kapazität) sind die Leistung und der Energiebedarf der Verbraucher entscheidende Kriterien. Die Wandlung und Aufbereitung der Daten kann in einem zentralen Rechner pro Brückenbauwerk erfolgen. Dabei zeigt sich für den Industrie-Computer nach **Tabelle 4.1** eine mittlere Leistung zwischen 10 – 40 W. Die übermittelten Datenpakete der WSN werden vom WSN-Gateway empfangen welches in Abhängigkeit des Funkstandards ein Leistungsbedarf von ca. 10 W besitzt.

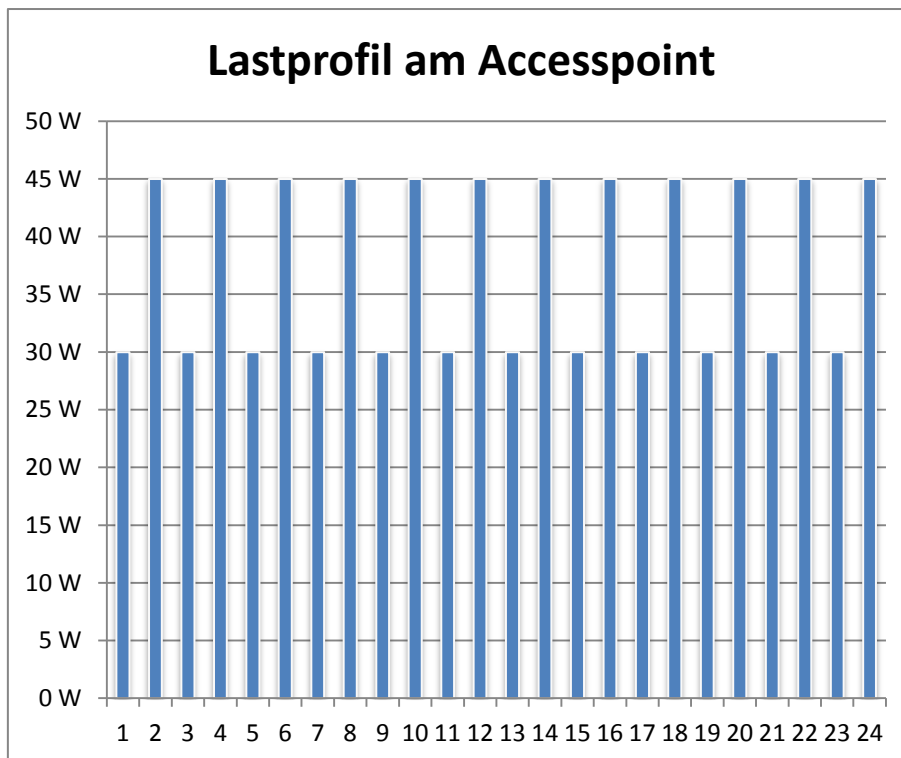
Für die Kommunikationstechnik zur überregionalen Überwachungseinheit wird angenommen, dass keine permanente Datenübertragung (online Analyse) notwendig ist. So erfolgt eine kontinuierliche Sammlung und Auswertungen der Messdaten am Industrie-Computer und eine regelmäßige gebündelte Übertragung zu festgelegten Zeitpunkten, sodass der Router nicht immer im Betriebsmodus sein muss, sondern sich, außer bei der Datenübertragung, im Sleep-Modus befindet. Der Leistungsbedarf wird für die Datenübertragung zur Überwachungseinheit ebenfalls mit ca. 10 W abgeschätzt.

Weitere Veröffentlichungen zeigen für die Messung und Wandlung gewonnener Messdaten einen Leistungsbedarf in der Größenordnung von 25 W. Für die weitere Auswertung und die anschließende Übertragung der Daten zu den Kommunikationseinrichtungen werden in entsprechenden Studien Leistungsbedarfe von 20 W angegeben [2]. Laut [3] ist für die Datenübertragung mittels GSM-Mobilfunkumsetzer mittlerer Leistungsbedarf von 35 W notwendig.

Die dargestellten Betriebsmittel und Veröffentlichungen ermöglichen eine zuverlässige Einschätzung der mittleren Leistung der Verbraucher. Der Energiebedarf hängt im konkreten Fall vom Messintervall und den Übertragungszyklen der eingesetzten Sensorik, von der Auswertung der Daten am Industrie-Computer und von der Häufigkeit der Datenübertragung zur überregionalen Überwachungseinheit ab.

Für alle Betriebsmittel ist jedoch eine Optimierung des Energiemanagements vorzusehen, sodass der Industrie Computer mit den Funkkomponenten so häufig wie möglich in den Sleep-Modus versetzt werden sollte, um Energie zu sparen.

Für die weiteren Untersuchungen wird ein Leistungsbedarf bei der Datenerfassung von 30 W und bei einer 30-minütigen Datenübertragung alle zwei Stunden von 60 W angenommen, sodass das in **Bild 4.2** dargestellte Lastprofil entsteht bei einem täglichen Energiebedarf von 900 Wh.



**Bild 4.2** Konservatives Lastprofil der Verbraucher am Accesspoint

Die Annahmen der Leistung sind erhöht angesetzt und bilden den Einsatz weiterer Verbraucher bzw. Auswertesysteme mit ab. In einzelnen Szenario-Rechnungen werden ein verringerter Leistungs- und der daraus resultierende geringere Energiebedarf ebenfalls untersucht.

#### 4.1 Platzbedarf und Aufstellungsort

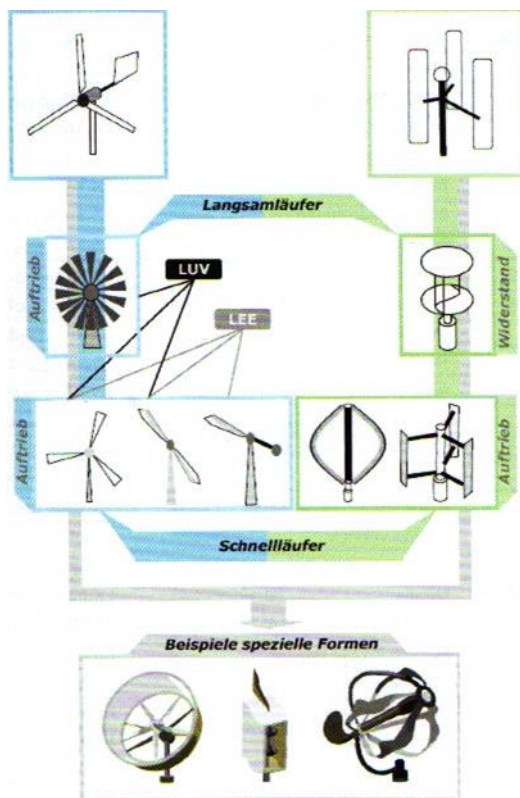
Für die Wahl des Standortes des Accesspoints gibt es verschiedene Optionen. Da es sich um einen Außenbereich handelt wäre zum Schutz der Bauteile vor den widrigen Bedingungen und Vandalismus ein geschützter, abgedeckter Aufstellungsort zu bevorzugen. Bei der Funkverbindung sorgen Hindernisse jedoch für eine Reduzierung der Reichweite und der Datenübertragungsrate, sodass ein zentraler ungeschützter Aufstellungsort vorteilhaft wäre. Insbesondere haben auch die Bauwerkskonstruktionen bestehender Bauwerke und der notwendige Platzbedarf des Accesspoint mit Batteriesystem und Energieversorgung erheblichen Einfluss auf die Platzwahl, sodass immer individuelle an die vorherrschenden Bedingungen angepasste Lösungen gefunden werden müssen.

Zum Schutz der Bauteile vor den Witterungsbedingungen sind die Bauteile in einen Schaltschrank einzubringen. Dabei sind für Batterieschränke Sicherheitsvorschriften nach DIN EN 50272-2 [38] zu erfüllen.

## 5 Energiebereitstellung am Accesspoint

### 5.1 Kleinwindenergieanlagen

In Deutschland werden ca. 8 % der erzeugten elektrischen Energie aus Windkraft gewonnen, damit stellt die Windkraft den größten Anteil aller erneuerbaren Energieträger. Dies geschieht größtenteils durch Windenergieanlagen mit Nennleistungen im Megawattbereich. Diese sind als Anlagen mit Drei-Blatt-Rotoren ausgeführt und ihre Funktion basiert auf dem Aufwindprinzip. Im Bereich der KWEA ist die Variation der verwendeten Anlagentypen größer, so werden bspw. vertikale Rotorbauformen eingesetzt. Die Darstellung in **Bild 5.1** gibt einen ersten Überblick zu den im Bereich der Kleinwindenergie verwendeten Rotorbauformen.



**Bild 5.1** Übersicht über unterschiedliche Rotorbauformen bei Kleinwindanlagen [4]

Zunächst soll eine Übersicht zu den meteorologischen Grundlagen der Windentstehung gegeben werden.

#### 5.1.1 Meteorologischen Grundlagen der Windentstehung

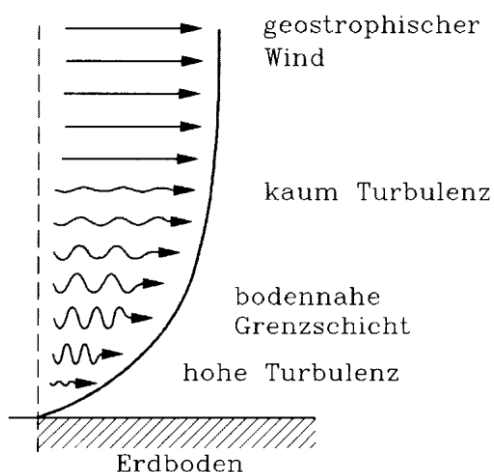
Die Hauptursache für die Entstehung des Windes ist der Einfluss der Sonne. Durch die solare Strahlung wird die Erdoberfläche erwärmt und Wärmeenergie in die Atmosphäre eingetragen. Diese Erwärmung der Erdoberfläche findet allerdings nicht gleichmäßig

statt:

„Die Heterogenität der Erdoberfläche führt dazu, dass die Absorption der Sonnenenergie stark variiert. Dadurch kommt es zu großen Schwankungen innerhalb der Atmosphäre hinsichtlich der Temperatur, der Dichte und des Druckes. Die so entstehenden Kräfte führen dazu, dass die Luftmassen in Bewegung gesetzt werden. Hierbei strömen die Luftmassen immer von Gebieten höheren Luftdrucks in Gebiete mit tieferem Luftdruck“ [21].

Von den somit entstehenden lokalen und globalen Luftbewegungssystemen sind zur energetischen Nutzung durch Windenergieanlagen hauptsächlich lokale Phänomene relevant [21]. Ein Beispiel hierfür ist die nachfolgend kurz erläuterte See-Land-Zirkulation. Das Festland und die sich darüber befindlichen Luftmassen erwärmen sich durch solare Einstrahlung am Tage im Vergleich zum Meer relativ schnell und warme Luft steigt auf. Die sich über dem Meer befindliche Luft ist kälter und strömt nach. Durch diesen Ausgleichvorgang entsteht Wind. Im Laufe der Nacht kühlt die Landmasse schneller als das Wasser aus und der Effekt kehrt sich um.

In **Bild 5.2** ist das typische Verhalten des Windes in Abhängigkeit von der Höhe über dem Erdboden dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Windgeschwindigkeit maßgeblich von der Höhe abhängig. Dies gilt damit auch für die im Wind gespeicherte Energie.



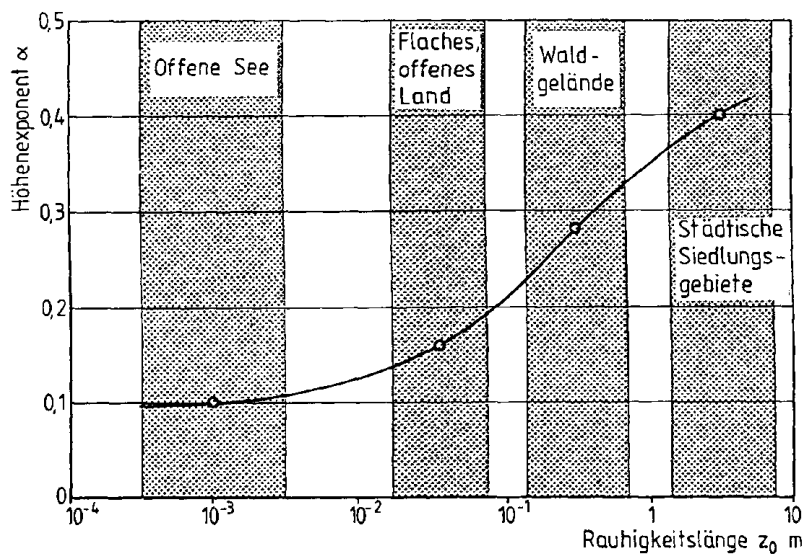
**Bild 5.2** Atmosphärische Grenzschicht in schematischer Darstellung [20]

Durch die Rauigkeiten und Unebenheiten des Bodens entstehen in niedrigen Höhen Verwirbelungen und Turbulenzen, daher sind Windgeschwindigkeiten hier tendenziell geringer. Mit Zunahme der Höhe stellen sich immer laminarer werdende Luftströmungen ein. Das Potenzgesetz nach Hellmann bietet die Möglichkeit, die Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Höhe vereinfacht zu beschreiben [21]. Basierend auf der

mittleren Windgeschwindigkeit  $\bar{v}_{\text{ref}}$  (in der Höhe  $H$ ) wird die in der Referenzhöhe  $H_{\text{ref}}$  durchschnittlich zu erwartende Geschwindigkeit des Windes  $\bar{v}_H$  nach Gleichung (5.1) berechnet. Die Bodenrauigkeit geht in den Höhenwindexponent  $\alpha$  ein. Der Einfluss des Bodens auf die Windgeschwindigkeit wird bei diesem Vorgehen für nicht extreme Bedingungen und nicht sehr große Höhen in guter Näherung modelliert [21].

$$\bar{v}_H = \bar{v}_{\text{ref}} \left( \frac{H}{H_{\text{ref}}} \right)^\alpha \quad (5.1)$$

**Bild 5.3** gibt eine Übersicht zu den Höhenwindexponenten verschiedener Geländearten. Es ist ersichtlich, dass typische Werte für  $\alpha$  in der Regel zwischen 0,1 und 0,4 liegen.



**Bild 5.3** Abhängigkeit des Höhenwindexponenten von der Rauigkeitslänge [20]

Der Höhenwindexponent steigt mit zunehmender Rauigkeitslänge des überströmten Bodens an. Größere Rauigkeitslängen symbolisieren dabei große Hindernisse, die stärkere Turbulenzen in Bodennähe zur Folge haben. Laminare Luftströmungen sind somit in diesen Fällen erst in größeren Höhen als bspw. über dem offenen Meer anzutreffen.

### 5.1.2 Technische Windnutzung

Die im Wind enthaltene Leistung kann als kinetische Energie einer Luftmasse und unter Verwendung eines Volumen- und Massestroms mit Gleichung (5.2) berechnet werden [21].

$$P = \frac{1}{2} \rho v^3 A \quad (5.2)$$

Es ist ersichtlich, dass die im Wind enthaltene Leistung  $P$  in der dritten Potenz und damit maßgeblich von der Windgeschwindigkeit  $v$  abhängt. Die durchströmte Fläche  $A$  und die Luftdichte  $\rho$  gehen ebenfalls in die Berechnung ein, von ihnen ist die Windleis-



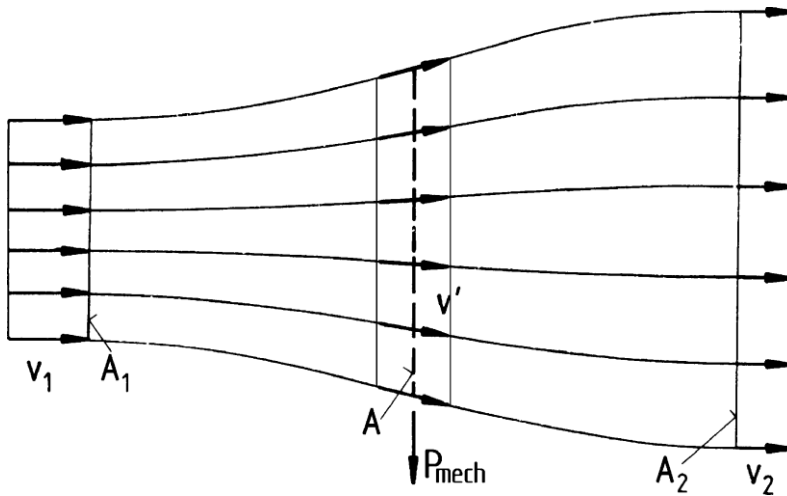
tung  $P$  allerdings lediglich linear abhängig.

An Windenergieanlagen (WEA) findet die Energieumwandlung der im Wind enthaltenen Leistung in nutzbare elektrische Energie statt. Dabei wird der an der WEA vorbeiströmenden Luft ein Teil ihrer Energie entzogen und diese zunächst in mechanische Bewegungsenergie umgewandelt. Um der Luft die gesamte enthaltene Energie zu entziehen, müsste die Bewegung der Luft nach dem Umströmen der Anlage vollständig zum Erliegen kommen. Dieser Zustand kann nicht erreicht werden.

Gleichung (5.3) beschreibt die abführbare mechanische Leistung  $P_{\text{mech}}$ .

$$-\rho A(v_1^2 - v_2^2)(v_1 + v_2) \quad (5.3)$$

Die Leistungsbilanz von WEA berechnet sich dabei aus der Windgeschwindigkeit vor der Anlage  $v_1$  und der Windgeschwindigkeit  $v_2$  hinter der Anlage. Für Umformungen und Vereinfachungen in diesem Zusammenhang finden die Massenbilanz und der Impulssatz Anwendung [21]. Die Darstellung in **Bild 5.4** verdeutlicht die Zusammenhänge.



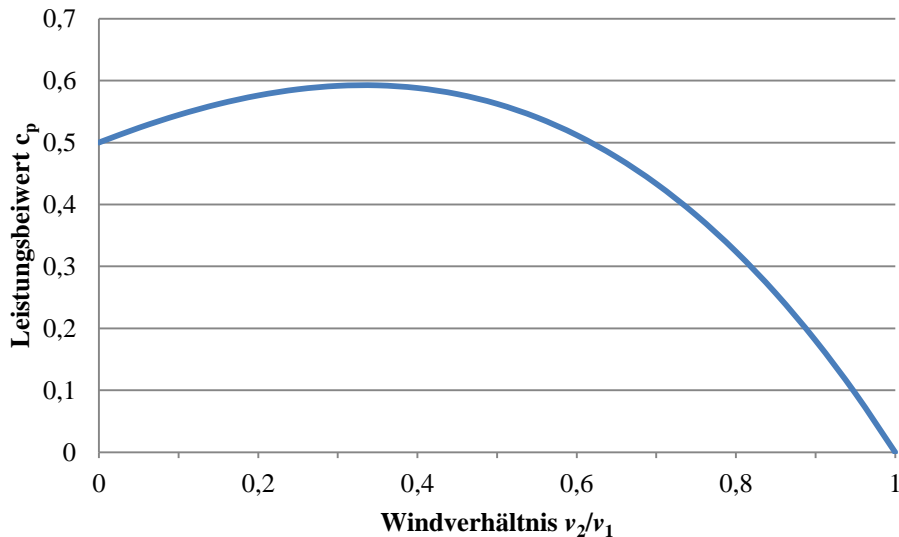
**Bild 5.4** Leistungsbilanz einer Windenergieanlage [21]

Die Leistungsbereitstellung von WEA hängt wie beschrieben vom Verhältnis der Windgeschwindigkeiten vor und hinter der Rotorquerschnittsfläche ab. Dieses wird mit Hilfe des Betz'schen Leistungsbeiwerts  $c_p$  ausgedrückt, der nach Gleichung (5.4) bestimmt werden kann [21].

$$-\left[1 \quad \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right] \left(1 \quad -\right) \quad (5.4)$$

Das Ableiten von Gleichung (5.4) nach  $v_2/v_1$  ergibt das theoretisch optimale Verhältnis dieser beiden Windgeschwindigkeiten zueinander. Der Leistungsbeiwert ist in Abhän-

gigkeit von  $v_2/v_1$  in **Bild 5.5** dargestellt. Sein theoretisches Maximum stellt sich bei einem Verhältnis  $v_2/v_1 = 1/3$  ein.



**Bild 5.5** Leistungsbeiwert nach Betz in Abhängigkeit vom Verhältnis der Windgeschwindigkeiten  $v_2/v_1$

Die ideale bzw. theoretisch maximal mögliche Leistungsausbeute von WEA ergibt sich demzufolge nach Gleichung (5.5).

$$c_p = \frac{16}{27} \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^3 \left( 2 - \frac{v_2}{v_1} \right) \quad (5.5)$$

Der maximale Leistungsbeiwertes  $c_{p,max}$  (Betz-Faktor) ergibt sich nach Gleichung (5.5) zu ca. 0,59. Somit ist eine Nutzung von mehr als 59 % der im Wind enthaltenen Leistung unmöglich.

Die Ausgangsleistung von WEA hängt wie beschrieben kubisch von der Windgeschwindigkeit ab. Der Anlagenbetrieb kann somit in Bezug auf die Windgeschwindigkeit in verschiedene Phasen eingeteilt werden. Diese sind nachfolgend in **Bild 5.6** dargestellt.

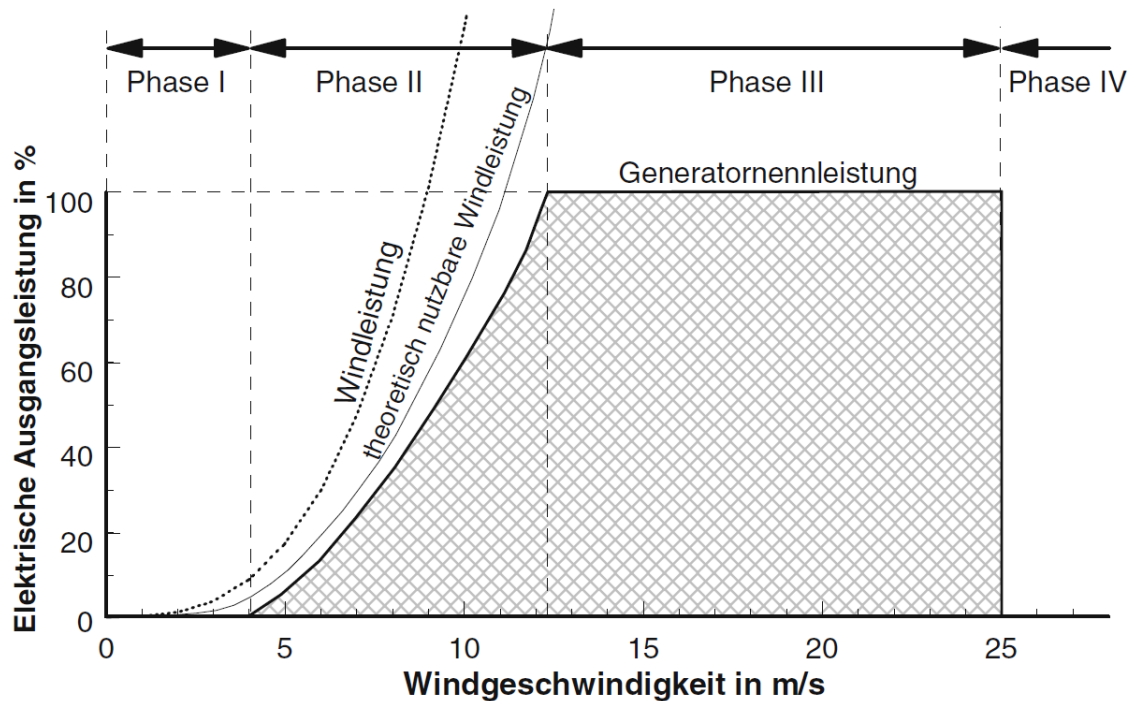
Während der Phase I liegt die Windgeschwindigkeit unter der anlagenspezifischen Anlaufgeschwindigkeit. Die nutzbare Energie im Wind reicht nicht aus, um bspw. die Reibungskräfte zu überwinden und somit steht die Anlage still.

In Phase II ist die Windgeschwindigkeit für ein Anlaufen der Anlage ausreichend, sie erzeugt nun elektrische Leistung, die mit der dritten Potenz von der Windgeschwindigkeit abhängt. Phase II dauert bis zum Erreichen der Anlagennenngeschwindigkeit an.

Die Phase III wird durch die Leistungsregelung bestimmt. Um zulässige mechanische

und elektrische Belastungsgrenzen nicht zu überschreiten, wird die WEA gedrosselt betrieben. Dies führt zur konstanten Abgabe der Nennleistung, jedoch nicht mehr zur optimalen Nutzung der zur Verfügung stehenden Windleistung.

Phase IV dient dem Anlagenschutz. Bei zu hohen Windgeschwindigkeiten und folglich großen mechanischen Belastungen erfolgt zur Vermeidung von Schäden das Abschalten der Anlage.

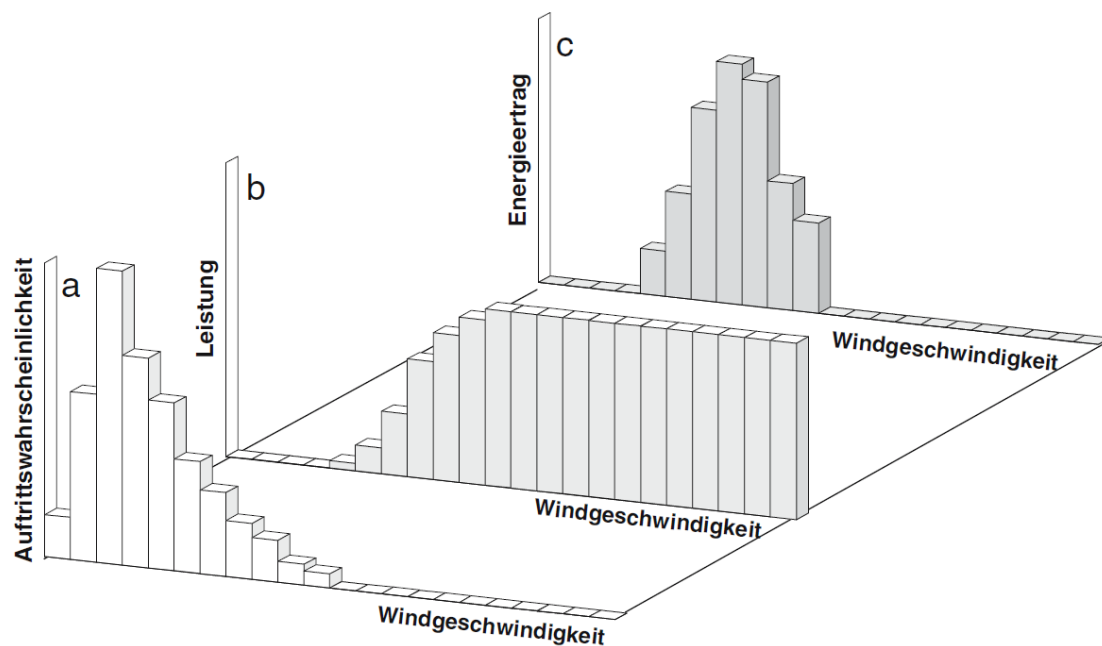


**Bild 5.6** Leistungskennlinie bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten [1]

Um die möglichen Energieerträge von WEA zu ermitteln, sind Kenntnisse über die Auftretswahrscheinlichkeiten der Häufigkeit von Windgeschwindigkeiten notwendig. Diese sind von den jeweiligen Anlagenstandorten sowie von den Nabenhöhen der geplanten WEA abhängig.

Zur Analyse werden die Windgeschwindigkeiten in Intervalle aufgeteilt und ermittelt, wie viele dieser Windgeschwindigkeitsintervalle in definierten Zeitbereichen auftreten. Mit Hilfe von anlagenspezifischen Leistungskennlinien ist es somit in Abhängigkeit von Standortcharakteristika möglich, die zur Generation der benötigten Energieerträge geeigneten Anlagen zu bestimmen.

Die Grafik in **Bild 5.7** verdeutlicht diese Zusammenhänge.



**Bild 5.7** Ermittlung des Energieertrags einer Windenergieanlage [1]

### 5.1.3 Rotorformen

Die Nutzung der Windenergie kann prinzipiell durch zwei unterschiedliche Rotorformen erfolgen. Dies sind zum einen Widerstands- und zum anderen Auftriebsläufer. Da Widerstandsläufer nur relativ geringe Leistungsbeiwerte erreichen, werden sie kaum noch eingesetzt. Es gibt aber einige weiterhin eingesetzte Sonderformen, wie bspw. den Savonius-Rotor.

Auftriebsläufer können hingegen relativ hohe Leistungsbeiwerte von  $c_p > 0,5$  erreichen. Sie sind deshalb weit verbreitet.

Windenergieanlagen können weiterhin nach der Anordnung der Achse unterschieden werden. Beispiele für WEA mit horizontaler Achse sind

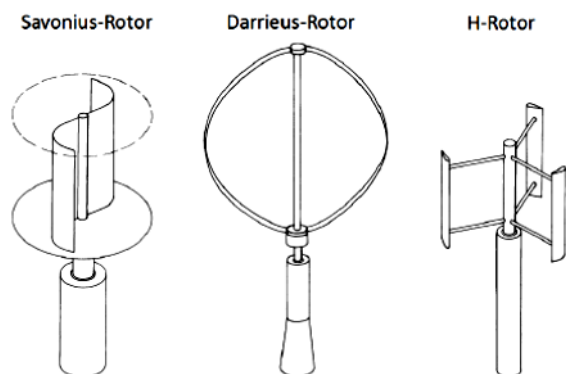
- Holländische Windmühle
- Einblattrotor
- Zweiblattrotor
- Dreiblattrotor

Bild entfernt - Urheberrechte nicht geklärt

**Bild 5.8** Ausführungsformen von Horizontalachsenrotoren [40], [41]

Ein nennenswerter Nachteil von Vertikalachsenrotoren ist die Tatsache, dass diese immer Luftmassen gegen den Wind bewegen müssen und damit geringere Leistungsbeiwerte als Horizontalachsenrotoren erreichen. Vorteilhaft wirkt sich aus, dass diese Rotorform keine Maßnahmen zur Windnachführung erfordert. Folgende Ausführungen sind im Bereich der Vertikalachsenrotoren möglich

- Darrieus-Rotor
- Savonius-Rotor
- Heidelberg-Rotor



**Bild 5.9** Ausführungsformen von Vertikalachsenrotoren [21]

Ein wichtiger Kennwert von WEA ist die Schnelllaufzahl  $\lambda$ . Sie beschreibt das Verhältnis der Flügelspitzen­geschwindigkeit des Rotors  $u$  zur Windgeschwindigkeit  $v$  (siehe Gleichung (5.6)).

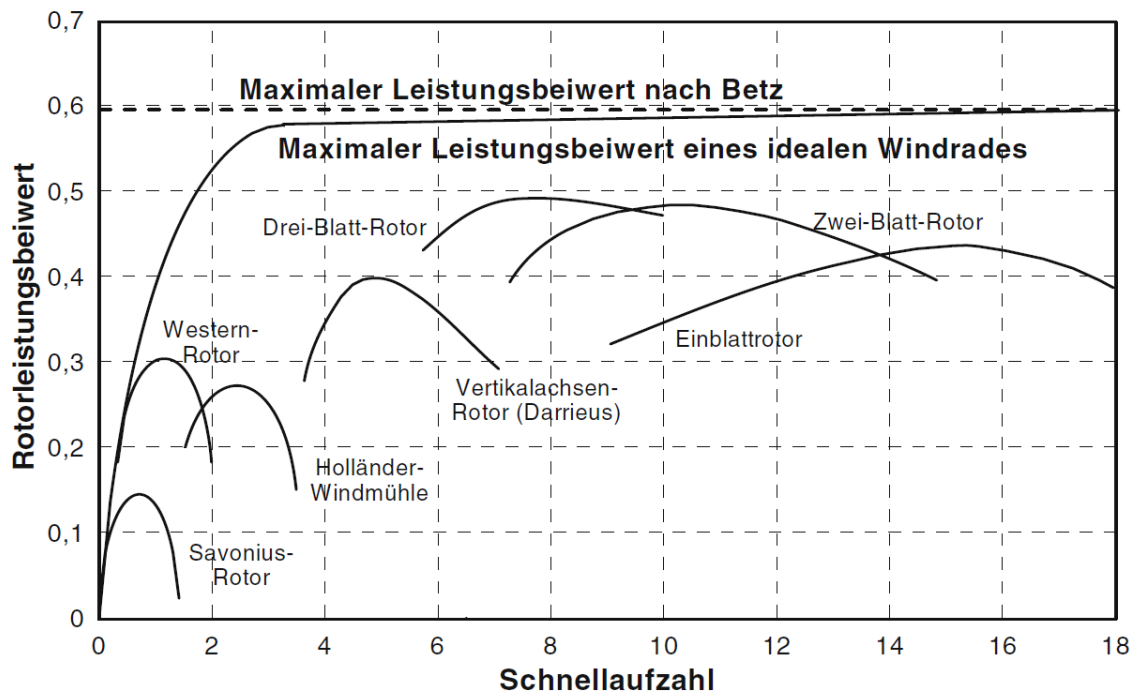
$$- \quad (5.6)$$

Die Bedeutung der Schnelllaufzahl  $\lambda$  zeigt das Umstellen von Gleichung (5.6) nach  $v$

und Einsetzen in Gleichung (5.5). Es ist ersichtlich, dass die Leistungsfähigkeit von Windenergieanlagen von  $\lambda$  und der Flügelspitzen­geschwindigkeit  $u$  kubisch abhängt, während alle anderen Parameter lediglich linear eingehen. Bei einem konstant ange­nommenen Radius  $r_R$  der Rotorfläche ist die Flügelspitzen­geschwindigkeit lediglich von der Drehzahl  $n$  der WEA-Rotoren anhängig (siehe Gleichung (5.7)).

(5.7)

In **Bild 5.10** sind die charakteristischen Größen verschiedener Rotortypen dargestellt.



**Bild 5.10** Leistungsbeiwert bei unterschiedlichen Rotortypen [1]

Auf Basis der Schnellaufzahl ergibt sich neben der Rotorachsenanordnung eine weitere Klassifizierungsmöglichkeit. Anlagen mit einer aufgrund ihrer hohen Flügelspitzen­geschwindigkeit großen Schnellaufzahl und daraus resultierenden hohen Drehzahl werden als Schnellläufer bezeichnet. Demzufolge sind Anlagen mit langsamen Drehzahlen als Langsamläufer zu klassifizieren.

**Bild 5.10** zeigt, dass mit Drei-Blatt-Rotoren maximale Rotorleistungsbeiwerte erreicht werden können, diese Rotorform hat sich somit als wirtschaftlich-technisches Optimum durchgesetzt [5].

#### 5.1.4 Typen

Im Bereich der KWEA ist die Vielfalt der verfügbaren Anlagentypen relativ hoch. Es sind sowohl Geräte mit verschiedenen Rotorkonstruktionen und vertikaler Achse als

auch Anlagen mit horizontaler Achse und unterschiedlichen Rotorblattanzahlen verfügbar. Die vertikalen Rotorkonstruktionen sind hauptsächlich nach dem Darrieus- oder dem Heidelberg-Prinzip (H-Rotor) konstruiert. Sie benötigen keinerlei Windnachführung und sind demzufolge in der Lage, den Wind aus allen Richtungen direkt nutzen zu können. Außerdem zeichnen sie sich durch ruhiges Laufverhalten aus.

Sie sind somit für Einsatzorte, an denen vermehrt Verwirbelungen und häufig wechselnde Windrichtungen auftreten, relativ gut geeignet. Diese Bedingungen treten an Verkehrswegen und in bebauten Gebieten häufig auf. Anlagen mit horizontaler Achsenanordnung sind in der Lage, lediglich den Wind zu nutzen, der senkrecht auf die Rotorfläche trifft. Somit sind Maßnahmen zur Windnachführung erforderlich.

Laut Bundesverband WindEnergie ist die Leistungsklasse 1 bis 10 kW im Bereich der KWEA am häufigsten anzutreffen [36].

### **5.1.5 Leistungsregelung**

Die abgegebene Leistung von Windenergieanlagen ist, wie bereits beschrieben, vorwiegend von der auftretenden Windgeschwindigkeit abhängig. Dabei sind die Anlagen jeweils auf eine bestimmte Nennwindgeschwindigkeit ausgelegt, bei der sie ihre Nennleistung, also in der Regel ihr Leistungsmaximum erreichen. Typischerweise erreichen Kleinwindenergieanlagen dieses bei Nennwindgeschwindigkeiten im Bereich von 9 m/s - 16 m/s. Um eine wirtschaftliche Nutzung zu ermöglichen gilt, dass Anlagen mit relativ hohen Nennwindgeschwindigkeiten an Standorten mit im Mittel stärkeren Winden eingesetzt werden sollten.

Um mögliche Schäden an Anlagenteilen infolge zu hoher Drehgeschwindigkeiten oder elektrischer Überlastung zu verhindern, erfolgt bei Windgeschwindigkeiten oberhalb der Nennwindgeschwindigkeit eine Begrenzung der Leistungsabgabe. Leistungsbegrenzungen sind auf unterschiedliche Weise erreichbar. Bei KWEA werden die im Bereich der Groß-WEA häufig eingesetzten Regelungsverfahren Pitch- und Stallregelung relativ selten angewandt. Die Prinzipie werden im Folgenden kurz erläutert.

#### **Stall-Regelung**

Die Rotorblätter werden derart gefertigt, dass oberhalb der Nennwindgeschwindigkeit der Anlagen ein Strömungsabriss an den Blättern automatisch auftritt. Daraus resultiert ein Rückgang der Auftriebskräfte an den Rotorblättern und folglich die Abnahme der Rotationsgeschwindigkeit, was zu einer Reduzierung der Anlagenleistung führt.

Der Nachteil dieser Regelungsart ist das unkontrollierte Abfallen der Leistungsausbeute

oberhalb der Nennwindgeschwindigkeit. Folglich kann in diesem Zustand nicht mehr die Anlagennennleistung abgegeben werden.

Die Nutzung der aktiven Stallregelung ist ebenfalls möglich, dabei wird durch das Einstellen des Blattwinkels die Windgeschwindigkeit, bei der ein Strömungsabriss auftritt, angepasst [21].

### Pitch-Regelung

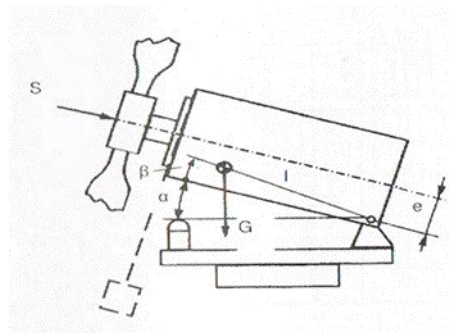
Die Pitch-Regelung nutzt ebenfalls die Verstellung des Rotorblattwinkels. Allerdings wird dieser in diesem Falle nicht, wie bei der aktiven Stallregelung, in Richtung der Strömungsablösung verstellt, sondern in Richtung kleinerer Anstellwinkel. Dies führt zu verringertem Auftrieb und damit zu einer Reduzierung der Rotorleistung.

Mit dieser Regelungsvariante kann der unkontrollierte Abfall der Auftriebskraft verhindert und somit oberhalb der Nennwindgeschwindigkeit die Nennleistung aus dem Wind entnommen werden. Daher hat sich bei WEA dieses Regelsystem durchgesetzt. Für KWEA steht dem höheren Installationsaufwand jedoch ein relativ geringer Ertragsgewinn gegenüber [21].

### Aus dem Wind drehen

Wie bereits erwähnt werden im Bereich der KWEA aus Gründen des technischen und finanziellen Aufwandes im Verhältnis zum zu gewinnenden Ertrag weder die Pitch- noch die aktive Stallregelung häufig eingesetzt. Die eingesetzten Regelkonzepte sind relativ simpel und lassen sich als „Aus dem Wind drehen“ zusammenfassen. Folgende Varianten zählen dazu:

- Helikopter- oder Hubschrauberstellung
- Eklipsen-Regelung
- Zweifahren-Regelung



**Bild 5.11** Helikopterstellung bei KWEA



Jede dieser Möglichkeiten nutzt zur Leistungsbegrenzung die Verringerung der direkt senkrecht angeströmten Rotorfläche. Sie unterscheiden sich in der Weise, wie die notwendige Verstellung der Rotorfläche erreicht wird.

Bei der Zweifahnenregelung kann die horizontale Drehung der Rotorfläche aus dem Wind erreicht werden, sobald ein ausreichend großer Druck auf eine seitliche Querfahne besteht. Im Falle der Eklipsen-Regelung nimmt ein asymmetrisch gelagerter Rotor den Druck auf und bei entsprechenden Windgeschwindigkeiten erfolgt eine Drehung. Dazu ist der Rotor nicht mittig gelagert, sondern das Lager ist so nach außen verschoben, dass ein Moment auf die Rotorkopflagerung durch den anströmenden Wind ausgeübt wird. Das Überschreiten einer gewissen Stärke führt so zu einem Nachgeben und seitlichen Kippen des Kopfes. Dieses Prinzip nutzt die Helikopterregelung ebenfalls. Hier ist die Rotorfläche jedoch so gelagert, dass bei zunehmendem Druck der Rotorkopf vertikal aus dem Wind kippt. Der nach oben gekippte Rotorkopf erinnert dabei an einen Helikopter.

### 5.1.6 Leistungswandlung

Der nachfolgende Abschnitt zur Leistungswandlung bei KWEA stellt die wesentlichen Komponenten eines Triebstranges von KWEA vor. Dabei wird vor allem auf die Funktionsweise der Generatoren und Wechselrichter eingegangen.

#### Getriebe

**Tabelle 5.1** ist zu entnehmen, dass KWEA in der Regel bis 5 kW getriebeelos ausgeführt sind. Auch Anlagen bis 10 kW werden größtenteils noch ohne Getriebe realisiert, allerdings gibt es zunehmend Ausnahmen. Die Datengrundlage für die Einteilung stellt [4] dar, für die Auswertung erfolgt die Einteilung der Anlagen in kW-Klassen und die Analyse der technischen Angaben der jeweiligen Klasse. Zu einigen Herstellern sind in [4] keine Angaben bezüglich eines Getriebes vermerkt, weshalb die Summe der Angaben in der Spalte „*Getriebe*“ nicht mit der Anzahl der Anlagen übereinstimmt.

Die mit Getriebe ausgeführten KWEA sind mit unterschiedlichen Systemen ausgestattet. Es kommen vor allem ein- und zweistufige Stirnradgetriebe sowie schrägverzahnte Winkelradgetriebe zum Einsatz. Das Ziel des Getriebes ist die Anpassung der Drehzahl der Welle an den Betriebsbereich des angeschlossenen Generators.

Da jedoch Getriebe bei KWEA eher selten zum Einsatz kommen, wird die genaue Funktionsweise im Rahmen dieses Berichts nicht weiter erläutert. Vielmehr werden nachfolgend die Hauptkomponenten, die immer Bestandteil einer KWEA sind, darge-

stellt.

**Tabelle 5.1** Übersicht zur Abschätzung der Anzahl von KWEA mit Getriebe [4]

Nennleistungsbereich	Anzahl der Anlagen	Getriebe	Anzahl der Anlagen
2 kW - 3 kW	16	ja	0
		nein	7
3 kW - 4 kW	19	ja	0
		nein	5
4 kW - 5 kW	1	ja	0
		nein	0
5 kW - 6 kW	15	ja	3
		nein	6
6 kW - 7 kW	15	ja	4
		nein	3
7 kW - 8 kW	8	ja	5
		nein	3
8 kW - 9 kW	1	ja	0
		nein	1
9 kW - 10 kW	1	ja	0
		nein	1
10 kW - 11 kW	16	ja	3
		nein	7

### Generator

Der Generator einer KWEA wird sehr häufig als permanenterregte Synchronmaschine ausgeführt. Der Synchrongenerator besteht im Allgemeinen aus einem rotierenden Läufer, dieser ist von einem festen Stator umgeben. In der permanent erregten Ausführung enthält der Läufer Dauermagneten, die das sogenannte Erregerfeld zwischen Läufer und Stator hervorrufen. Dieses kann alternativ mittels einer Gleichstromerregwicklung am Läufer erzeugt werden. Sobald der Läufer durch äußere Krafteinwirkung in eine Drehbewegung versetzt wird, dreht auch das Erregerfeld mit zur Läuferbewegung synchroner Drehzahl und induziert eine Wechselspannung im Stator.

Da die Umlaufgeschwindigkeit der Hauptachse durch die schwankenden Windgeschwindigkeiten vorgegeben wird, ist ein drehzahlvariabler Betrieb wünschenswert. Dieser kann mittels eines nachgeschalteten Umrichters mit Gleichstromkreis ermöglicht

werden [21].

Alternativ werden einige KWEA auch mit einem Asynchrongenerator ausgestattet. Der prinzipielle Aufbau des Asynchrongenerators unterscheidet sich nicht von dem des Synchrongenerators. Auch hier besteht der innere Teil aus einem beweglichen Läufer, der von einem festen Stator umgeben ist. Allerdings erfolgt die Erregung der Maschine in diesem Fall nicht im Läufer, sondern im Stator. Dafür ist dieser an eine Spannungsquelle, wie bspw. das öffentliche Netz angeschlossen, welche das Entstehen eines Drehfelds zwischen Ständer und Läufer bewirkt. Mittels des hervorgerufenen Drehfeldes wird im meistens kurzgeschlossenen Läufer (Kurzschlussläufer) eine Wechselspannung induziert. Diese bedingt wiederum ein Gegenfeld, welches synchron zum Ständerdrehfeld umläuft. Sobald eine mechanische Kraft auf den Läufer einwirkt und dieser beschleunigt, kommt es zu einem sogenannten Schlupf zwischen den beiden Feldern. Dieser (übersynchrone) Betrieb bewirkt, dass das Erregerfeld des Ständers überkompensiert und im Ständer eine Spannung induziert wird. Insgesamt wirkt die Anordnung daher nach außen als Spannungsquelle, beziehungsweise als Generator.

Auch bei einem Asynchrongenerator muss für den drehzahlvariablen Betrieb ein Wechselrichter mit Gleichstromkreis nachgeschaltet werden.

### **Wechselrichter**

Der drehzahlvariable Betrieb einer KWEA bedingt an den Generatorklemmen, gemäß den Ausführungen des vorangegangenen Absatzes, einen Wechselstrom variabler Frequenz. Bei einer Netzkopplung der Anlage werden jedoch ganz konkrete Anforderungen an Spannung, Phasenwinkel und Frequenz gestellt. Allgemein gilt für einen Anschluss von Eigenzeugungsanlagen mit Wechselrichter nach [22]:

*„Bei Generatoren mit Wechselrichter oder Frequenzumrichter ist bei der Zuschaltung zu unterscheiden, ob sie auf ihrer Wechselspannungsseite spannungslos sind oder nicht. Werden sie nicht spannungslos zugeschaltet, sind die Zuschaltbedingungen für Synchrongeneratoren einzuhalten.“*

Dabei gelten für die Zuschaltung von Synchrongeneratoren die nachfolgend angeführten Voraussetzungen für die Energiequalität:

- Spannungsdifferenz:  $\Delta U < \pm 10 \% U_n$
- Frequenzdifferenz:  $\Delta f < \pm 0,5 \% \text{ Hz}$
- Phasenwinkeldifferenz:  $\Delta \varphi < \pm 10^\circ$

Genauere Vorgaben für die auftretenden, individuellen Anschlussbedingungen können [22] entnommen werden.

Das Einhalten Voraussetzungen bzgl. der Energiequalität gewährleistet im drehzahlvariablen Betrieb der Wechselrichter. Dieser richtet die Wechselspannung der KWEA zunächst gleich und passt sie bei der Rückkonvertierung den vorgegebenen Anforderungen an. Bei der Versorgung von Inselnetzen sollten die genannten Grenzwerte ebenfalls eingehalten werden, da als Verbraucher auch Komponenten zum Einsatz kommen, die für den Betrieb am Netz konzipiert sind.

Der Wechselrichter hat zudem noch die Aufgabe, den Strom bei gegebener Ausgangsspannung des Generators so anzupassen, dass die Anlage stets im idealen Arbeitspunkt läuft (Maximum Power Point Tracking). Damit der Wechselrichter diese Aufgabe übernehmen kann, muss der Wechselrichtermikroprozessor allerdings erst mit den Stromspannungskennlinien des Generators programmiert werden.

### 5.1.7 Typische Kosten von KWEA

Das Ergebnis einer Marktrecherche zu Kosten von KWEA zeigt **Tabelle 5.2**. Bei den vorgestellten Kosten handelt es sich dabei um Nettopreise ohne Umsatzsteuer.

**Tabelle 5.2** Kosten und Nennleistungen verfügbarer Kleinwindenergieanlagen

Anlage	Leistung in W	Nettopreis in €
Black 600	600	2.320
Whisper 100	900	3.850
WSD 1000	1.000	2.830
Bornay 1500	1.500	6.200
ecowind 2000H	2.000	10.874
Pawikon 2500	2.500	10.560
ecowind 3500H	3.500	14.424
EasyWind 6	6.000	24.000
S&W 7,5	7.500	15.000

Die in den einzelnen Angeboten enthaltenen Leistungen variieren relativ stark. Der Hauptgrund ist der bisher nicht vorhandene breite Markt für KWEA, so dass die unterschiedlichen Fabrikate recht individuell sind und oftmals Eigenleistungen bei der Installation und Wartung vorausgesetzt werden.

Die Kosten nach **Tabelle 5.2** beinhalten die Betriebsmittel wie Anschlusskasten, Wech-

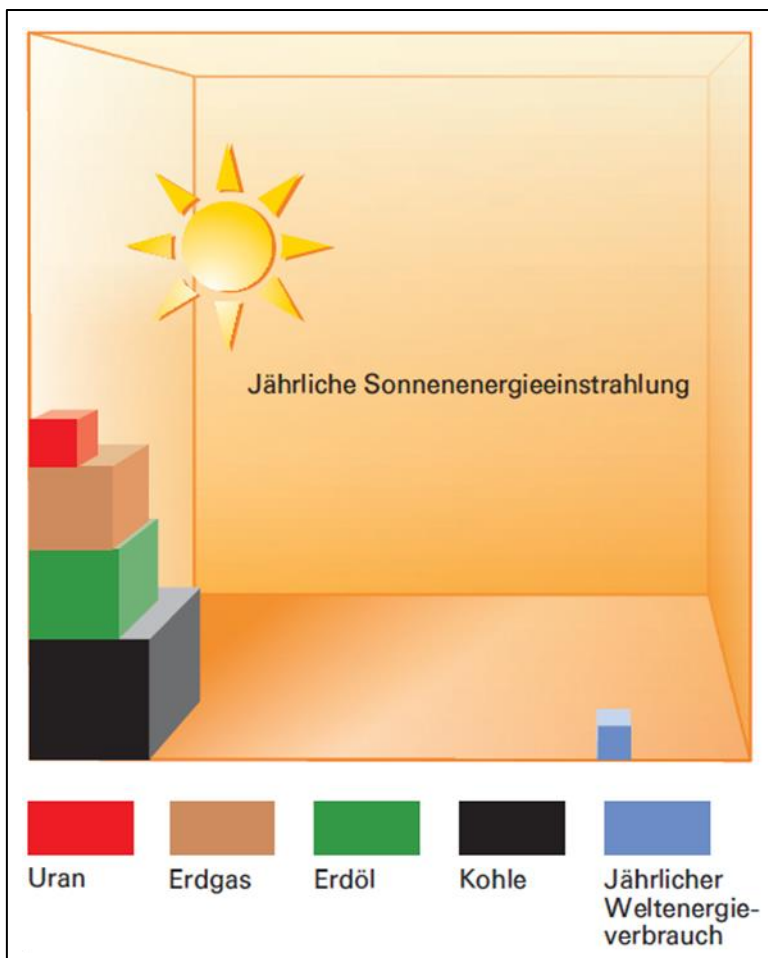
selrichter und Mast. Hinzu kommen ggf. weitere Kosten für die Fundamentarbeiten, Elektroinstallationen und die Genehmigung. Die Kosten für die reine KWEA liegen unter den o. g. Preisen.

## **5.2 Photovoltaik**

Der Begriff Photovoltaik (PV) setzt sich aus den beiden Worten Photo für Licht und Voltaik für elektrische Spannung zusammen und symbolisiert somit die Gewinnung elektrischer Energie aus Licht. Die Eigenschaft bestimmter Materialien nach entsprechender Präparation; Sonnenlicht in elektrischen Strom umzuwandeln, beruht auf dem photovoltaischen Effekt. Bevor auf diesen und die zur Gewinnung elektrischer Energie aus Sonnenlicht benötigten Komponenten näher eingegangen wird, werden kurz die Möglichkeiten zur Gewinnung solarer Energie in Deutschland vorgestellt.

### **5.2.1 Die Sonne als Energiequelle**

Die Sonne stellt eine nahezu unerschöpfliche Energiequelle dar. Die von ihr bereitgestellte Strahlungsenergie übersteigt, Untersuchungen des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) zufolge, den Jahresenergieverbrauch der Erde etwa um das 11.000-fache [29]. **Bild 5.12** veranschaulicht dieses Verhältnis des Energiegehalts der auf die Erde einfallenden Strahlung im Vergleich sowohl zum weltweiten Energiebedarf als auch zu den bekannten Ressourcen fossiler oder nuklearer Energieträger.



**Bild 5.12** Jährliche Sonnenenergieeinstrahlung im Vergleich [28]

### 5.2.1.1 Globalstrahlung

Als Globalstrahlung wird die auf die Erdoberfläche treffende, nutzbare Strahlung bezeichnet. Diese besteht gemäß Gleichung (5.8) aus direkter und diffuser Strahlung [26].

$$\dot{G}_G = \dot{G}_{\text{Dir}} + \dot{G}_{\text{Diff}} \quad (5.8)$$

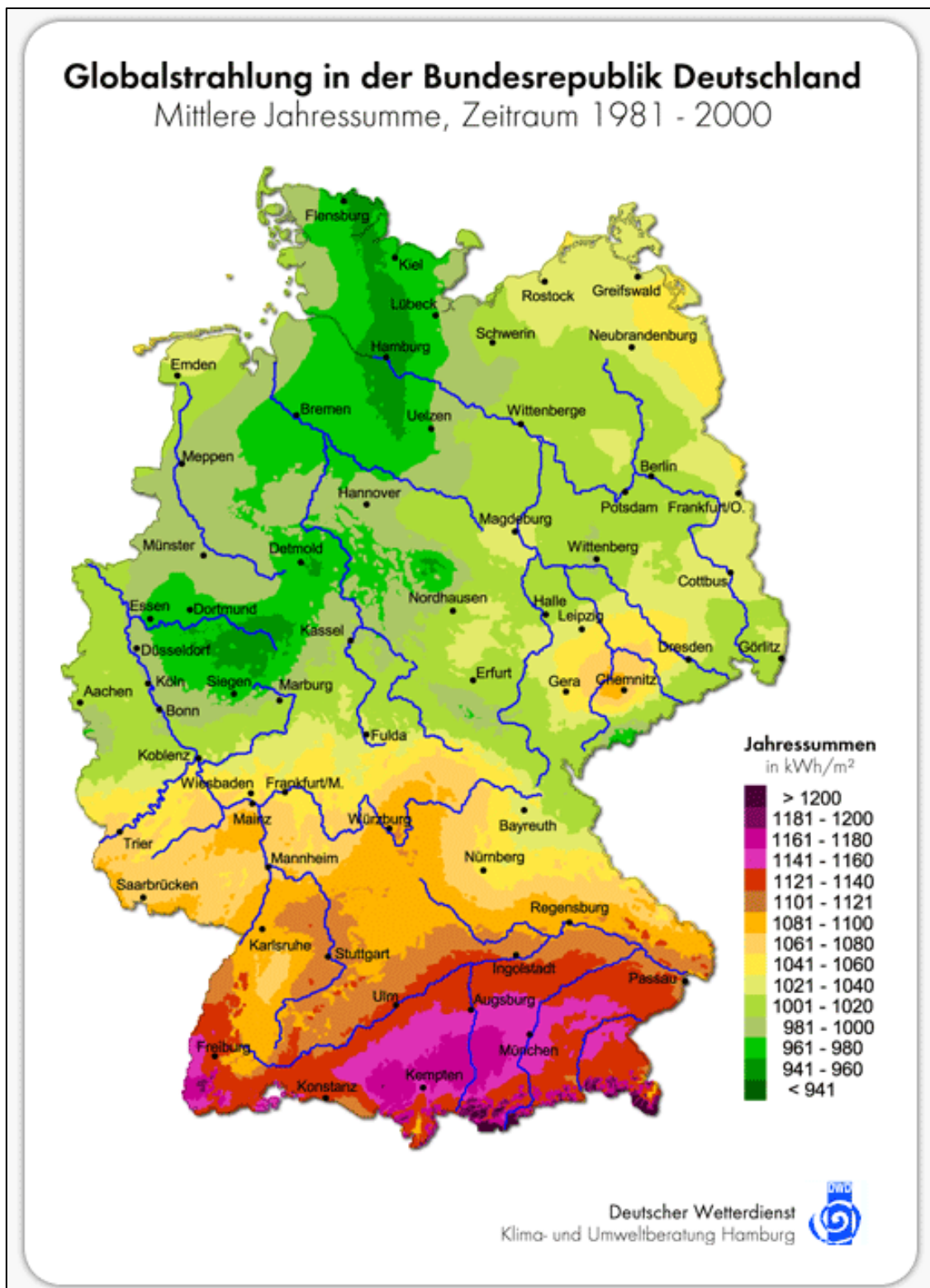
Direkte Strahlung durchquert die Erdatmosphäre ungehindert und setzt somit wolkenfreien Himmel voraus. Diffuse Strahlung hingegen entsteht durch Abschwächung, Ablenkung oder Reflexion solarer Strahlung. Die Lichtstrahlen werden an Wolken oder an in der Luft enthaltenen Teilchen (bspw. Nebeltröpfchen) gestreut und auf der Erdoberfläche reflektiert, folglich weist sie eine verminderte Intensität im Vergleich zu direkter Strahlung auf. Diffuse Strahlung hat demnach keine bestimmte Richtung, sondern kann von allen Seiten auf ein Objekt auftreffen. Beide Strahlungstypen sind energiereich und mit Hilfe technischer Mittel in nutzbare Energie umwandelbar. Zur direkten aktiven Nutzung der durch die Sonne bereitgestellten Strahlungsenergie gibt es zwei grundsätzlich verschiedene praktische Möglichkeiten. Zum einen ist dies die Umwandlung der

Sonnenenergie in Wärme mit Hilfe von Kollektoren. Zum anderen kann die Strahlung mit Hilfe von PV-Anlagen zur Erzeugung elektrischen Stroms genutzt werden [26], [29].

#### 5.2.1.2 Schwankung solarer Strahlungsenergie

Die solar nutzbare Strahlungsenergie entspricht der Summe der eingestrahnten Globalstrahlungsintensität über einen bestimmten Zeitraum. Die durchschnittliche Jahressumme beträgt in Deutschland etwa 1.000 bis 1.100 kWh/m<sup>2</sup>a. Die auf der Erdoberfläche nutzbare Strahlungsleistung unterliegt jedoch starken witterungsbedingten und jahreszeitlichen sowie geographischen Schwankungen. Die durchschnittlich nutzbare Strahlungsleistung beträgt im Sommer in Deutschland etwa 1.000 W/m<sup>2</sup>. Dieser Wert liegt an einem durchschnittlichen Wintertag hingegen bei lediglich 100 W/m<sup>2</sup> [30]. Im Bereich der Bundesrepublik Deutschland strahlt in den Monaten Oktober bis März nur etwa ein Viertel der jährlichen Einstrahlung ein, wohingegen es im Sommerhalbjahr drei Viertel der Jahressumme sind. In den drei sonnenreichsten Monaten von Mai bis Juli werden sogar ca. 45 % eingestrahlt. Diese Daten lassen sich bspw. aus den Globalstrahlungskarten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) ablesen.

**Bild 5.13** zeigt die regionalen Unterschiede der solaren Strahlungsenergie in Deutschland für den Zeitraum zwischen 1981 und 2000. Die Werte wurden vom DWD auf ebener Fläche gemessen und sind als langjährige Mittelwerte angegeben [26], [29].



**Bild 5.13** Globalstrahlung in der Bundesrepublik Deutschland [9]

### 5.2.2 Solarzellen

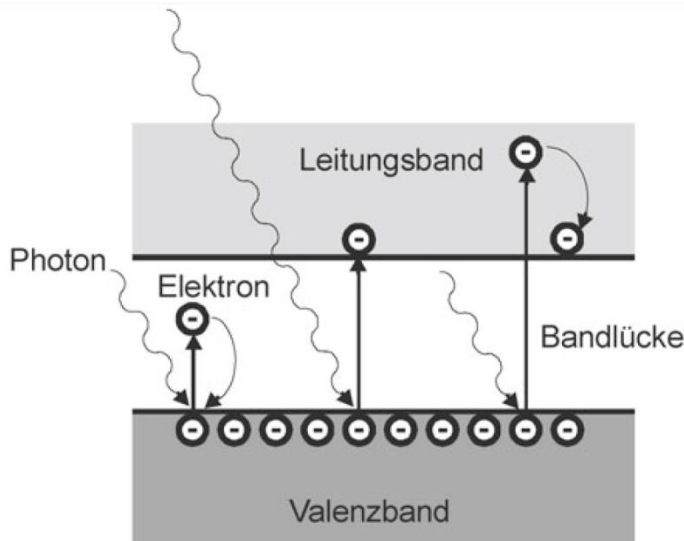
Solarzellen sind die kleinsten Bausteine von Solargeneratoren. Durch Ausnutzung des photoelektrischen Effekts sind sie in der Lage, elektrischen Strom zu erzeugen.



### 5.2.2.1 Innerer photoelektrischer Effekt

Der innere photoelektrische Effekt beschreibt die Übertragung von Energie einstrahlender Photonen auf Elektronen in Festkörpern. Dieser Vorgang wird mit „Absorption“ bezeichnet. Die Wechselwirkung zwischen Photonen und Elektronen bedingt ein Herauslösen von freien Elektronen aus ihren Valenzbändern und die Erzeugung von Elektronen-Loch-Paaren. Dieser Vorgang bedarf einer ausreichend hohen Energie des einstrahlenden Sonnenlichts. Die Elektronen werden dann durch Absorption in das Leitungsband gehoben und damit die elektrische Leitfähigkeit der bestrahlten Materie erhöht [23].

Der Vorgang ist in **Bild 5.14** schematisch dargestellt.



**Bild 5.14** Ladungsträgererzeugung in einer Photovoltaikzelle [6]

### 5.2.2.2 Photovoltaischer Effekt in Solarzellen

Solarzellen bestehen aus Halbleitern. Bei halbleitenden Materialien ist die zwischen Valenz- und Leitungsband auftretende Bandlücke nur sehr gering. Die zur Lösung der Elektronen aus ihrer Atombindung durch Wärme oder Strahlung aufzubringende Energie muss idealerweise der Größe der Bandlücken entsprechen. Während eine geringere Energie der Photonen ein Verbleiben der Elektronen auf dem Valenzband bedingt, führt eine höhere zur Energieabgabe der Elektronen in Form von Wärme. Dies geschieht, bis die Elektronen die Unterkante des Leitungsbandes erreichen.

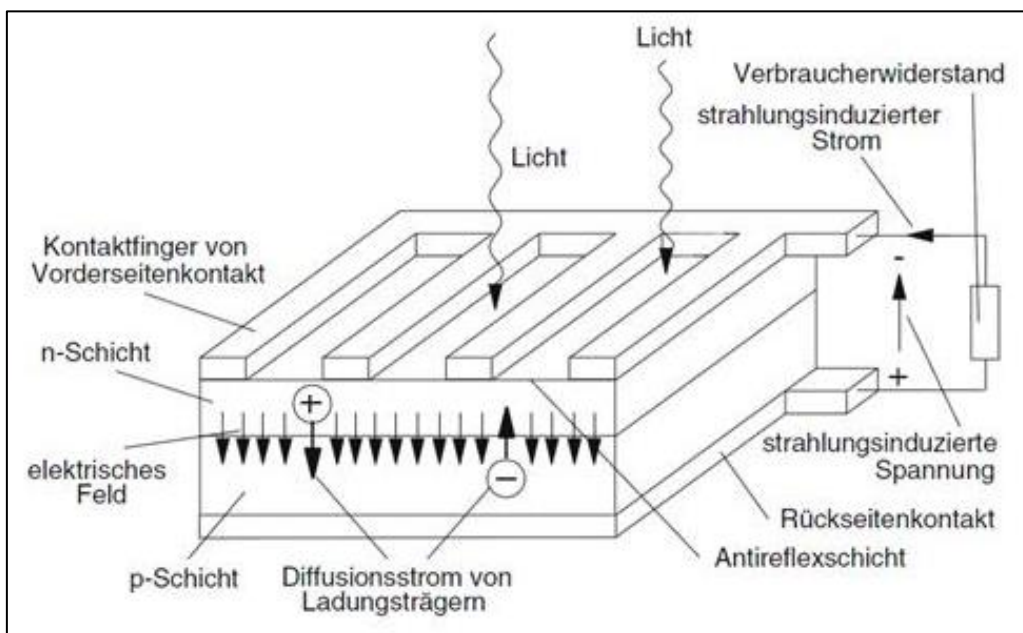
Zur optimierten Nutzung des photoelektrischen Effekts zur Stromerzeugung werden die Charakteristiken der verwendeten Halbleitermaterialien durch Dotierung gezielt verändert. Dazu erfolgt bei Solarzellen das technische Einbringen von Fremdatomen auf deren Vorder- und Rückseiten. Diese sind durch eine vom Grundmaterial abweichende

Valenzelektronenzahl gekennzeichnet.

Dieser Vorgang führt zur Entstehung von zwei verschiedenen Schichten. In p-dotierten Kristallgittern kommt es durch das Einbringen dreiwertiger Atome (wie bspw. Bor) zu einem Überwiegen der positiven Kernladungsanteile. In den sogenannten n-dotierten Kristallgittern wird ein Elektronenüberschuss erzeugt. Dies geschieht durch Dotierung mit fünfwertigen Atomen (wie bspw. Phosphor).

Durch Diffusionsbewegungen der Moleküle ist nun an der Grenzschicht zwischen den p- und n-dotierten Halbleitermaterialien das Entstehen eines Konzentrationsgefälles möglich. Das Diffundieren freier Elektronen am p-n-Übergang in das n-dotierte Gebiet und der Löcher in die entgegengesetzte Richtung führt zur Bildung eines elektrischen Feldes – der sogenannten Raumladungszone.

Beim den Einfall von Licht auf Solarzellen entstehen durch Absorption Elektronen-Loch-Paare. Da die Raumladungszone eine Rekombination der Ladungsträger verhindert, werden diese zu großen Teilen dauerhaft getrennt. Es entsteht, ähnlich wie bei Batterien, ein einseitiger Elektronenüberschuss, der an den beiden Polen der Zellen in Form einer elektrischen Spannung messbar ist. Während des photovoltaischen Effekts besteht zwischen der eingestrahelten Sonnenenergie und dem Photonenstrom ein linearer Zusammenhang. Die Zunahme des Lichteinfalls auf die Solarzellen führt dabei zu einer vermehrten Ladungsträgertrennung. Die in diesem Abschnitt beschriebenen Zusammenhänge veranschaulicht **Bild 5.15** [23], [24].



**Bild 5.15** Prinzipieller Aufbau von Solarzellen [1]

### 5.2.2.3 Solarmodule

Um den photovoltaischen Effekt technisch nutzbar zu machen, werden die Ober- und Unterseiten der Solarzellen mit metallischen Kontakten versehen. Der Anschluss elektrischer Verbraucher an die Pole von Solarzellen schließt einen Stromkreis und führt zum Fließen eines elektrischen Gleichstroms. Die elektrische Stromstärke ist dabei wiederum proportional zur Globalstrahlung, die auf die Zellen auftrifft. Diesen proportionalen Zusammenhang zwischen einfallender Globalstrahlung, Photonenstrom und elektrischem Strom beschreibt Gleichung (5.9). Die an den Polen anliegende Spannung bleibt nahezu unverändert [26].

$$\dot{G} \quad (5.9)$$

Um elektrische Spannungen und Ströme in technisch verwertbarer Höhe zu erzeugen, erfolgt der Zusammenschluss mehrerer Solarzellen zu einem Solarmodul als gezielte Kombination aus Reihen- und Parallelschaltungen. Die PV-Generatoren setzen sich in der Regel schlussendlich aus Verbänden mehrerer PV-Module zusammen [26].

Während Kleinwindenergieanlagen eher selten vorkommen, sind Photovoltaikanlagen für kleine Erzeugungsleistungen etabliert. Ein großer Vorteil ist, dass sich PV-Anlagen aufgrund der Modulbauweise individuell in ihrer Leistungsklasse auslegen lassen. Außerdem ist ihr Betrieb geräuschfrei und mechanische, verschleißanfällige Komponenten sind nicht erforderlich.

Es sind unterschiedliche Solarzellentypen am Markt vorhanden. Diese unterscheiden sich in ihrem Wirkungsgrad und Aufbau sowie in den Herstellungskosten. Nach dem aktuellen Stand der Serienfertigung haben sich mono- und polykristalline Zellen aus Silizium etabliert. Außerdem sind verschiedene Arten Dünnschichtzellen verfügbar.

#### A Monokristalline Siliziumzelle

Die Grundlage zur Herstellung monokristalliner Siliziumzellen bilden Stäbe mit regelmäßiger Kristallstruktur. Diese werden aus einer hochreinen Siliziumschmelze hergestellt und nach dem Erkalten in 0,2 mm bis 0,3 mm dünne Scheiben (Wafer) geschnitten. In einem weiteren Produktionsschritt werden auf den Ober- und Unterseiten der Wafer durch Diffusionsprozesse Fremdatome eingebracht und Siliziumatome ersetzt. Nach dem Aufbringen der Kontakte auf den Vorder- und Rückseiten der Zellen erhalten diese zur Verbesserung der Lichtaufnahme eine Antireflexionsschicht.

Die Herstellung monokristalliner Siliziumzellen ist aufwendig und auch auf Grund der hohen Materialverluste beim Schneiden der Wafer kostenintensiv.

Von den am Markt etablierten Solarzellentypen erreichen die monokristallinen Siliziumzellen die höchsten Wirkungsgrade. Diese liegen zwischen 13 % und 17 % [23], [25].

### **B Polykristalline Siliziumzelle**

Die Herstellung polykristalliner Siliziumzellen basiert ebenfalls auf in Form gegossenen und abgekühlten Siliziumschmelzen. Die beim Erstarren entstehenden quadratischen Siliziumblöcke besitzen eine unregelmäßige Kristallstruktur. Aus den Blöcken werden wiederum schmale Wafer geschnitten und diese nach der Dotierung mit Kontakten und einer Antireflexionsschicht versehen. Die Wirkungsgrade von polykristallinen Siliziumzellen aus Serienproduktion liegen im Bereich zwischen 11 % bis 15 % und damit unter denen der monokristallinen Siliziumzellen. Die niedrigeren Wirkungsgrade sind durch Behinderungen des photovoltaischen Effekts bedingt, die an den bei der Erstarrung entstandenen Kristallgrenzen auftreten. Die Herstellung polykristalliner Siliziumzellen ist hingegen deutlich weniger aufwendig und diese folglich kostengünstiger [23], [25].

### **C Dünnschichtzellen**

Die dritte wesentliche Solarzellengruppe bilden die sogenannten Dünnschichtzellen. Sie bestehen bspw. aus Kupfer-Indium-Diselenid (CIS), Gallium-Arsenid (GaAs), Cadmium-Tellurid (CdTe) oder amorphem Silizium. Während des Herstellungsprozesses werden die verwendeten Materialien auf Substrate aufgedampft. Als Substrate kommen vornehmlich Glas oder Edelstahlfolie zum Einsatz. Auf ihnen bilden sich Schichten, in denen die Atome anders als bei kristallinen Zellen amorphe, ungeordnete Strukturen bilden. Die so entstehenden Strukturen besitzen eine andere spektrale Empfindlichkeit, weshalb Dünnschichtmodule besseres Schwachlichtverhalten und höhere Wirkungsgrade bei diffuser Strahlung aufweisen. Dieses kann beim Einsatz in Deutschland vorteilhaft sein, da der Schwachlichtanteil 55 % des Lichteinfalls ausmacht [23]. Ein besseres Verhalten bei Schwachlicht und Teilverschattung hätte eine vergleichmäßigte Einspeisecharakteristik zur Folge und somit Vorteile hinsichtlich einer kontinuierlichen Versorgung.

Die Wirkungsgrade der Dünnschichtzellen sind im Bereich zwischen 5 % bis 10 % angegeben und somit vergleichsweise gering. Die Herstellung dieses Zelltyps ist aber vor allem auf Grund des hohen Automatisierungsgrades relativ preisgünstig [23], [25].

### **5.2.3 Betriebsverhalten von Photovoltaikanlagen**

Im Folgenden soll das Betriebsverhalten von Photovoltaikanlagen näher betrachtet wer-

den.

### 5.2.3.1 Nennleistung

Den unmittelbaren Zusammenhang zwischen dem elektrischen Strom und der auf den Modulen wirksamen Bestrahlungsstärke beschreibt Gleichung (5.9).

Dieser Zusammenhang gilt ebenfalls für die durch PV-Anlagen generierte elektrische Leistung [26].

$$P_{el} = U \cdot I \sim \dot{G}_G \quad (5.10)$$

Die Nennleistung von PV-Modulen und Anlagen wird zur besseren Vergleichbarkeit und Normierung in der Regel in „Watt Peak“ ( $W_p$ ) angegeben. Zur Ermittlung der Peak-Leistung eines jeden Moduls kommen international standardisierte Testbedingungen (STC, engl. standard test conditions) zum Einsatz. Diese lauten folgendermaßen:

- Bestrahlungsstärke von 1.000 W/m<sup>2</sup>
- Modultemperatur von 25° Celsius
- Air-Mass-Faktor von 1,5

Der verwendete Air-Mass-Faktor entspricht dabei einem für Zentraleuropa typischen Lichtspektrum. Die tatsächlich generierten Modulleistungen liegen in der Regel unterhalb der ermittelten Nennleistung, da die STC nur bei guten Witterungsbedingungen und vergleichsweise hohem Sonnenstand erreichbar sind [25].

**Tabelle 5.3** gibt einen Überblick über die typischerweise benötigten Flächen und Wirkungsgrade der unterschiedlichen Modultypen bei einer installierten Leistung von einem kW<sub>p</sub>. Die angegebenen Wirkungsgrade können sich im praktischen Einsatz durch Leckströme, Reflexionsverluste, Widerstände und Rekombinationen von Ladungsträgern noch reduzieren.

**Tabelle 5.3** Maximale Wirkungsgrade und Platzbedarf verschiedener Materialien [28]

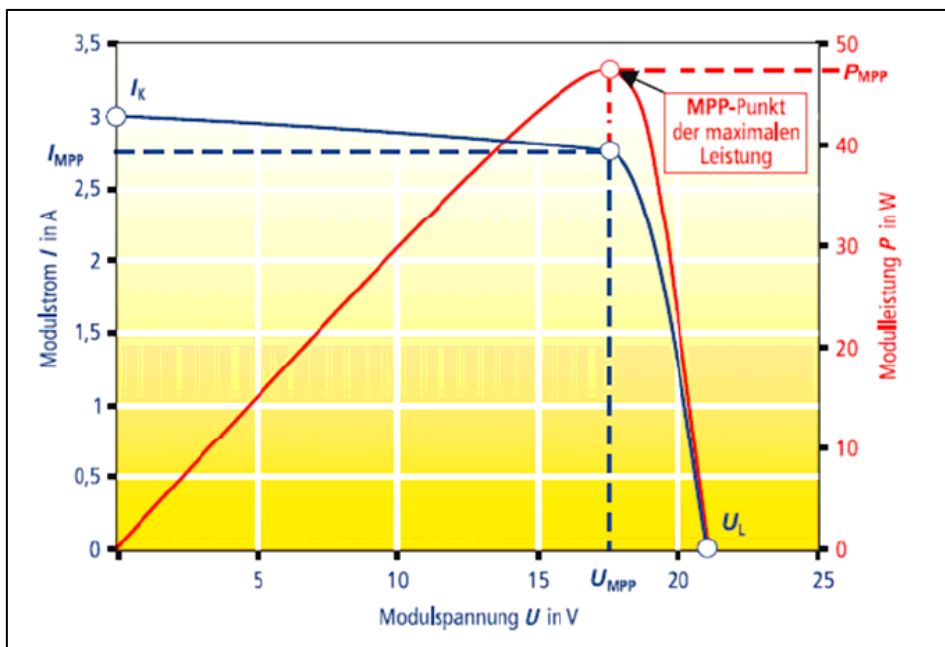
Solarzellenmaterial	Modulwirkungsgrad $\eta_M$ (Serienproduktion)	Benötigte Fläche für 1 kW <sub>p</sub>
Monokristallines Silizium	ca. 16 %	6 – 9 m <sup>2</sup>
Polykristallines Silizium	ca. 14 %	7 – 10 m <sup>2</sup>
Cadmium-Tellurid	ca. 9 %	9 – 17 m <sup>2</sup>
Kupfer-Indium-Diselenid	ca. 11 %	9 – 17 m <sup>2</sup>
Amorphes Silizium	ca. 7 %	15 – 26 m <sup>2</sup>

### 5.2.3.2 Modulkennlinien und Punkt maximaler Leistung

In **Bild 5.16** ist eine typische PV-Modulkennlinie mit den wichtigsten Arbeitspunkten dargestellt. Sie entspricht näherungsweise der Dioden-Gleichung von Shockley (Gleichung (5.11)) [26].

$$I = I_{\text{ph}} - I_0 \cdot \left( e^{\frac{e_0 \cdot U}{k \cdot T}} - 1 \right) \quad (5.11)$$

Die beiden Achsenschnittpunkte Kurzschlussstrom  $I_K$  und Leerlaufspannung  $U_L$  werden unter den STC ermittelt.  $I_K$  ist der der im Kurzschlussfall bei verbundenem Plus- und Minuspol der Solarzelle fließende Strom.  $U_L$  ist die an den offenen Klemmen des Moduls im Leerlauf messbare Spannung. Die Kennlinien von PV-Generatoren ergeben sich aus den Kennlinien der einzelnen Module in Abhängigkeit der gewählten Verschaltung.



**Bild 5.16** Kennlinie eines Solarmoduls [31]

### 5.2.3.3 Anlagenwechselrichter

Anlagenwechselrichter sind zentrale Bestandteile von PV-Anlagen. Sie erzeugen stabile Ausgangsspannungen, optimieren die Anlagenleistung und binden die zum Aufbau von Inselsystemen notwendigen Energiespeicher ein.

Der Anlagenstrom und damit die generierte Leistung sind von der augenblicklichen Einstrahlungsenergie und Temperatur der Module abhängig. Der Anlagenwechselrichter übernimmt daher die Regelung von Strom und Spannung des PV-Generators. Dabei steuert der Wechselrichter in der Regel denjenigen Arbeitspunkt auf der Generatorkennlinie an, der bei der aktuellen solaren Strahlungssituation die maximal mögliche elektr-

sche Leistung liefert. Diese optimale Kombination aus der Spannung  $U_{MPP}$  und dem Strom  $I_{MPP}$  nennt sich Maximum-Power-Point (MPP). Die Zusammenhänge zur Ermittlung der Leistung  $P_{MPP}$  im MPP sind in **Bild 5.16** dargestellt.

$$P_{MPP} = I_{MPP} \cdot U_{MPP} \quad (5.12)$$

Der Punkt maximaler Leistung ist aufgrund der witterungs- und tageszeitabhängigen Einstrahlung und Zelltemperatur fortlaufend nachzuführen. Dieses Regelprinzip des MPP wird dementsprechend als MPP-Tracking bezeichnet.

Ein weiteres Charakteristikum der Strom-Spannungs-Kennlinie ist der Füllfaktor (FF) [26].

$$FF = \frac{I_{MPP} \cdot U_{MPP}}{I_K \cdot U_L} \quad (5.13)$$

Dieser stellt das Verhältnis aus maximaler Leistung und dem Produkt aus Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom dar und ist somit ein Maß für die Güte der Solarzelle [23].

#### 5.2.3.4 Kennlinien unterschiedlicher Anlagenschaltungskonzepte

Innerhalb eines Solargenerators werden in der Regel mehrere PV-Module elektrisch miteinander gekoppelt. Die Verschaltung einzelner Module und die Bildung von Strängen innerhalb des PV-Generators erfolgt nach verschiedenen Konzepten. Sie können elektrisch parallel, in Reihe oder in einer Kombination aus beiden Schaltungsarten verbunden werden. Die Art und Weise des Zusammenschaltens bestimmt die generierbare Spannung und Stromstärke des gesamten Generators.

In Reihenschaltungen von Modulen ist die Stromstärke konstant, sie wird durch das Modul mit der geringsten Ausgangsstromstärke bestimmt. Ausgangsspannungen von Reihenschaltungen ergeben sich hingegen aus der Addition der Ausgangsspannungen der einzelnen Module. Vorteilhaft wirken sich hier die bei höheren Spannungen kleineren Ströme auf die in den Leitungen entstehenden Verluste aus. Die Verschattung von einzelnen Modulen oder Modulteilen kann allerdings zu starker Leistungsreduktion führen. Verschattete Solarzellen geben keinen elektrischen Strom mehr ab, sie verhalten sich wie in Sperrrichtung geschaltete Dioden. Da durch verschattete Zellen bzw. Module nun kein Strom mehr fließen kann, haben Teilverschattungen starke Auswirkungen auf den Ertrag des gesamten Stranges. Somit bestimmt das am geringsten bestrahlte Modul die Gesamtstromstärke einer Reihenschaltung. Verschattungen durch Hindernisse sind somit bei der Anlagenplanung und Errichtung zu beachten.

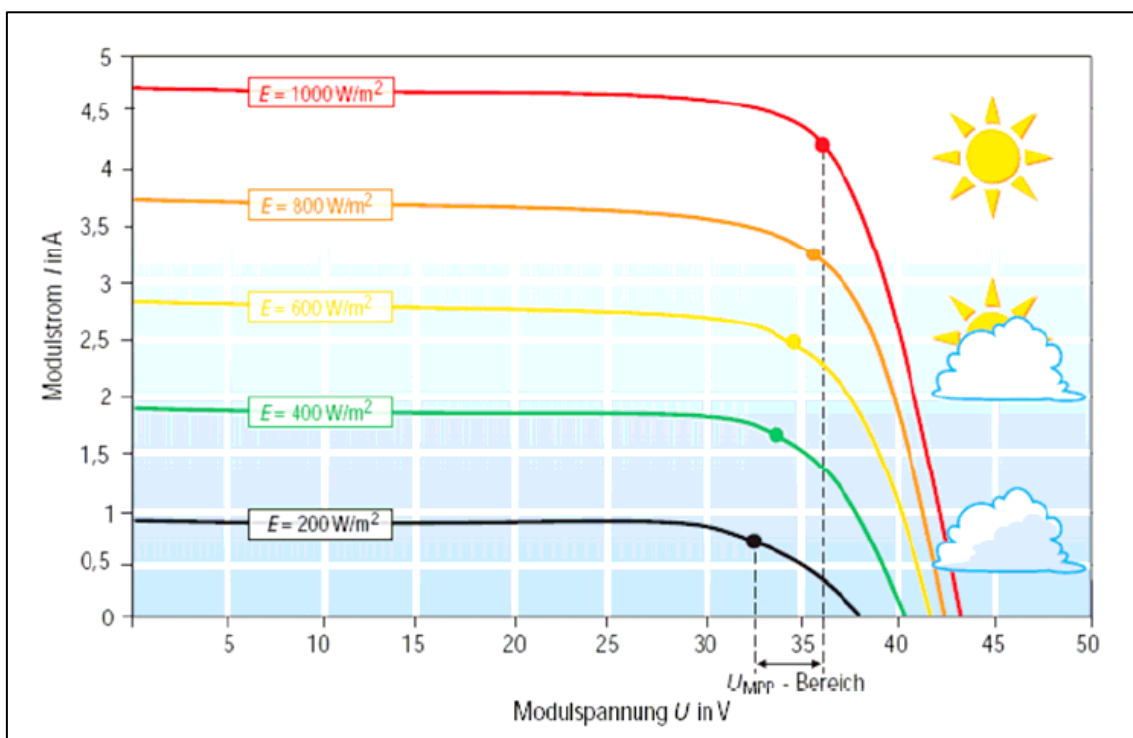
Bei parallel verschalteten PV-Modulen ergeben sich genau umgekehrte Auswirkungen.

Die Ausgangsspannung des Strangs bleibt gegenüber einem einzelnen Modul konstant. Der Ausgangsstrom der Anordnung setzt sich hingegen aus der Summe der Einzelströme aller parallel geschalteter Module additiv zusammen. Parallelschaltungen bieten sich bspw. bei unvermeidlichen Teilverschattungen einzelner Module oder unzulässig hohen Teilspannungen an. Zur Reduzierung von Leitungsverlusten aufgrund der höheren Ströme ist der Einsatz von Gleichstromkabeln mit höherem Querschnitt empfehlenswert.

Durch Kombinationen der vorgestellten beiden Schaltungsvarianten sind verschiedenartigste Anlagenkonzepte realisierbar [25], [26].

### 5.2.3.5 Kennlinien für unterschiedliche Strahlungsleistungen und Umgebungstemperaturen

Die durch PV-Module abgegebene elektrische Leistung wird maßgeblich durch die auf die Module auftreffende solare Bestrahlungsstärke beeinflusst. Den Zusammenhang zwischen eingestrahelter Leistung und der Strom-Spannungskennlinie von PV-Modulen zeigt die Darstellung in **Bild 5.17** [24].

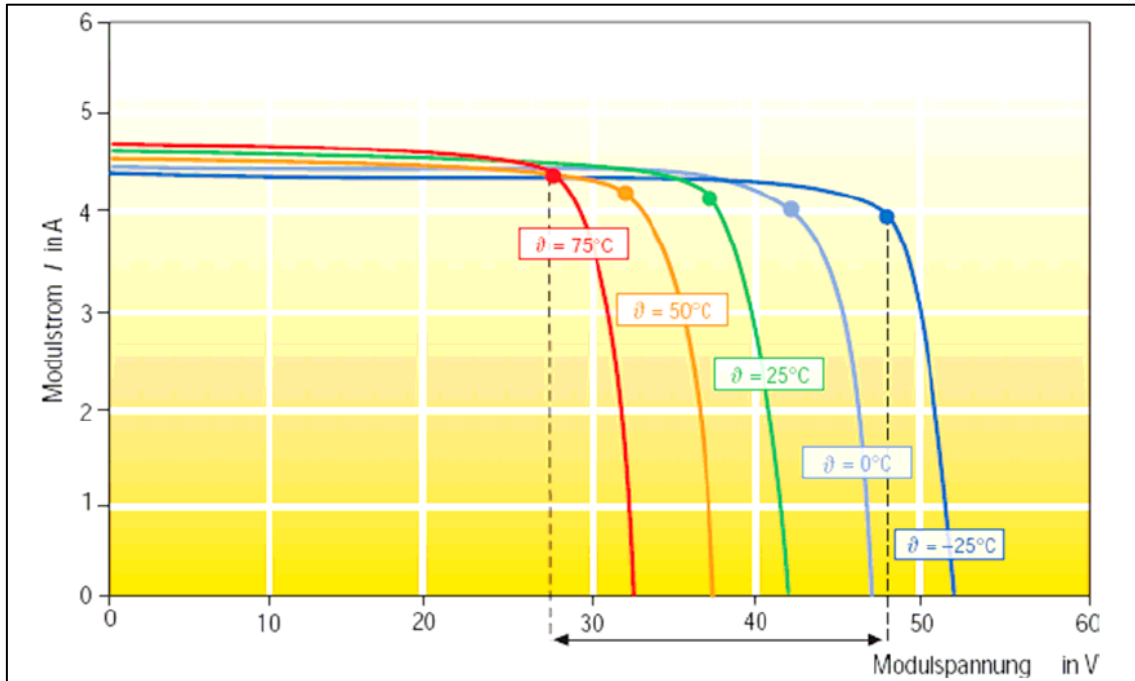


**Bild 5.17** Generatorkennlinie in Abhängigkeit der Bestrahlungsstärke [31]

Den ebenfalls bedeutsamen Zusammenhang zwischen Modultemperatur und abgebarbarer Leistung von PV-Modulen stellt das Diagramm in **Bild 5.18** dar. Es ist ersichtlich, dass eine Erwärmung der Module zu einer unmittelbaren Verringerung des Wirkungsgrads



führt. Für kristalline Zelltypen beträgt die Leistungsabnahme ca. 0,5 % bei einem Temperaturanstieg um 1 K. Eine Hinterlüftung der Module und deren Kühlung durch Wind wirkt diesem Effekt entgegen [24].



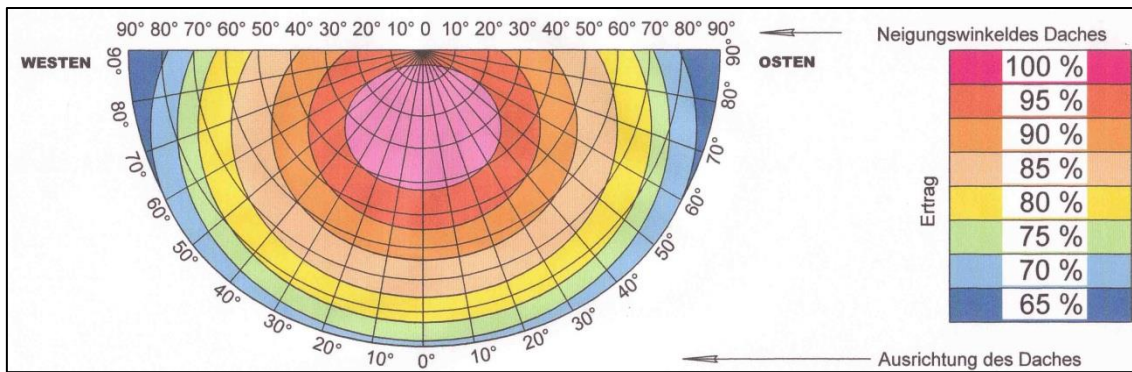
**Bild 5.18** Kennlinie in Abhängigkeit der Temperatur bei konstanter Bestrahlungsstärke [31]

### 5.2.3.6 Ausrichtung und Neigung der Photovoltaikmodule

Neben der Modultemperatur, der einfallenden Solarstrahlung und der Verschattung am Anlagenstandort sind für die abgegebene elektrische Leistung und damit den energetischen Ertrag der Module auch deren Ausrichtung und Neigung weitere relevante Parameter. Die abgegebene Modulleistung ist bei senkrechter Einstrahlung am höchsten.

Der Einfallswinkel der solaren Einstrahlung ist stark von der Tages- und Jahreszeit abhängig. So sind bspw. die Sonneneinstrahlung und damit auch der mögliche Energieertrag im Winter durch den dann flachen Einfallswinkel stark gedämpft. Diesem Effekt kann durch die Optimierung von Neigung und Ausrichtung der Module in Richtung der Einstrahlung in einem gewissen Rahmen entgegengewirkt werden. Um in Deutschland einen möglichst hohen Gesamtertrag über den Zeitraum des gesamten Jahres zu erreichen, ist eine Ausrichtung der Anlage nach Süden und ein Neigungswinkel von 30° gegenüber der Horizontalen anzustreben.

Die Darstellung in **Bild 5.19** ermöglicht eine Abschätzung der relativen Ertragsaussichten von PV-Anlagen in Abhängigkeit von Ausrichtung und Neigung der Module im Vergleich zu einer optimalen Anlagenpositionierung.



**Bild 5.19** Mögliche Energieerträge von PV-Anlagen in Abhängigkeit von Neigungswinkel und Ausrichtung [32]

In **Tabelle 5.4** sind typische Gesamtjahreserträge von in Deutschland installierten und betriebenen PV-Anlagen enthalten [23].

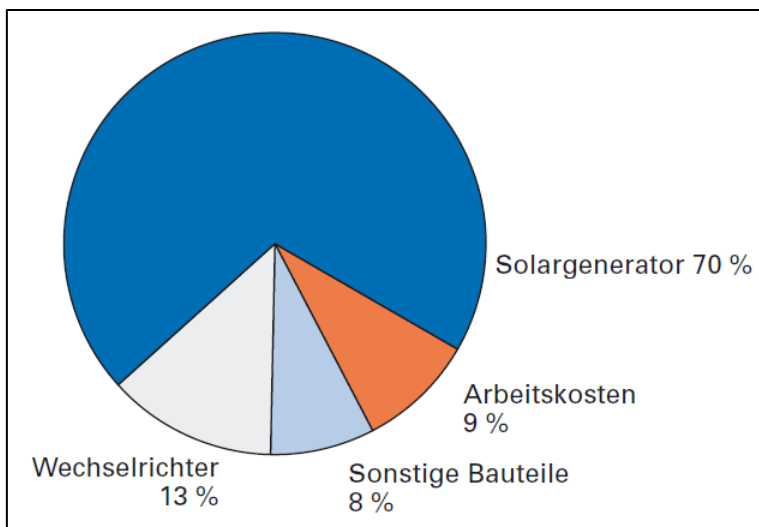
**Tabelle 5.4** Erträge unverschatteter und optimal ausgerichteter PV-Anlagen in Deutschland [28]

Mittelwert der jährlichen Sonneneinstrahlung (Neigung von 30° und Südausrichtung)		Typischer Ertragsbereich	Mittlerer Jahresertrag bei $PR^1 = 80\%$
Nordwestdeutschland	1.070 kWh/m <sup>2</sup>	1.030 kWh/m <sup>2</sup> – 1.180 kWh/m <sup>2</sup>	803 kWh/kW <sub>p</sub>
Ostdeutschland	1.150 kWh/m <sup>2</sup>	1.070 kWh/m <sup>2</sup> – 1.220 kWh/m <sup>2</sup>	863 kWh/kW <sub>p</sub>
Süddeutschland	1.220 kWh/m <sup>2</sup>	1.150 kWh/m <sup>2</sup> – 1.370 kWh/m <sup>2</sup>	915 kWh/kW <sub>p</sub>

#### 5.2.4 Typische Kosten von PV-Anlagen

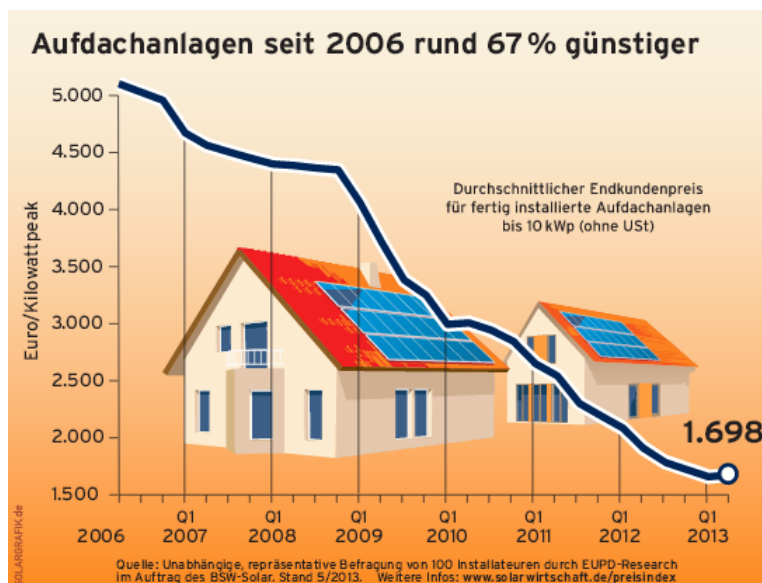
Der Gesamtpreis von PV-Anlagen ergibt sich aus der Summe der Einzelkosten des Generators, der Leitungen, des Wechselrichters, des Montagesystems, weiterer Teilkomponenten und der Installation. **Bild 5.20** zeigt hierzu die jeweiligen Kostenanteile der aufgezählten Komponenten am Gesamtpreis. Die genannten Größen stellen ungefähre Richtwerte dar.

<sup>1)</sup> Die Performance Ratio (PR) ist ein Maß für das Verhältnis zwischen Nutzertrag und Sollertrag einer PV-Anlage.



**Bild 5.20** Kostenanteile kleiner PV-Anlagen [28]

Die Preisentwicklung von PV-Anlagen ist in **Bild 5.21** beispielhaft für Aufdachanlagen kleiner Leistungsklassen dargestellt. Die in den letzten Jahren stark gefallen Investitionskosten sind hier klar ersichtlich.



**Bild 5.21** Preisentwicklung von Photovoltaikanlagen [33]

Eine Marktrecherche aus dem Jahr 2012 ergab noch etwas höhere Preise für die Installation von PV-Anlagen. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 5.5** enthalten.

Gründe für die Differenzen zwischen **Bild 5.21** und **Tabelle 5.5** sind zum einen die etwas älteren Werte in der Tabelle. Zum anderen umfasst die Darstellung in **Bild 5.21** Anlagen bis zu einer Bemessungsleistung von 10 kW<sub>p</sub>. Die festen Kosten, die bei allen Anlagen entstehen, sind ein wichtiger Grund für höhere spezifische Kosten bei Anlagen der kleineren Leistungsklassen.

**Tabelle 5.5** Kosten PV-Komplettsysteme bis 5 kW<sub>p</sub>

Installateur	Name des Komplettsystems	Nettopreis in €/kW <sub>p</sub>
Leistungsklasse: 1 bis 5 kW <sub>p</sub>		
Concept for you	Cenpac 3x	2.122
SET Energietechnik	Standard 1	1.503
Reinhard Solartechnik	RST-S03600	2.111
	RST-S04320	2.053
Saale Solartechnik	System-M	2.010
Neutron	k.A.	1.931
	k.A	2.096
GT-Solar	Energetik Komplettsystem	2.004
	Energetik Komplettsystem	1.850

Damit ergibt sich ein Spanne bei den Kosten von 1,5 – 2,1 t€/kW<sub>p</sub>.

## 6 Energiespeicher

Zur Gewährleistung einer fortlaufenden Energieversorgung von autarken Inselnetzen werden Speichersysteme benötigt. In diesem Bereich sind vor allem chemische Energiespeicher auf der Basis von Akkumulatoren etabliert.

### 6.1 Verfügbare Energiespeicher

Die konventionellen Solarbatterien sind elektrochemische Energiespeicher und lassen sich in Akkumulatoren auf Blei-Basis oder mit Lithium-Ionen Technologie unterscheiden. Die u. a. in der Autoindustrie langzeiterprobten Blei-Säure-Batterien zeichnen sich durch ihre verhältnismäßig geringen Kosten aus und werden normalerweise in Hybrid-systemen zur Energiespeicherung eingesetzt [10]. Für Lithium-Ionen-Akkumulatoren fehlen hingegen Langzeiterfahrungen. Sie besitzen jedoch Vorteile in der möglichen Anzahl der Auf- und Entladezyklen, der Entladetiefe, der Selbstentladung sowie im Wirkungsgrad. Eine genauere Auflistung der jeweiligen technischen Parameter ist in **Tabelle 6.1** aufgeführt.

**Tabelle 6.1** Technische Parameter von Akkumulatoren [11], [12], [14], [39]

	Bleiakkumulatoren	Lithium-Ionen-Akkumulatoren
Spezifische Energiedichte	30 – 40 Wh/kg	75 – 210 Wh/kg
Entladetiefe	50 – 80 %	bis nahezu 100 %
Leistungsdichte	75 – 300 W/kg	150 – 500 W/kg
Vollzyklenzahl	500 – 3000	1000 – 7000
Wirkungsgrad	80 – 90 %	bis 95 %
Selbstentladung	5 % pro Monat	1 – 2 % pro Monat
Betriebstemperatur <sup>2)</sup>	-20 – 45 °C	-20 – 45 °C
Investitionskosten	150 – 250 €/kWh	700 – 1000 €/kWh

Lithium-Ionen-Akkumulatoren werden in Abhängigkeit des eingesetzten Elektrodenmaterials und Aufbaus weiter untergliedert. Für den Aufbau können beispielsweise Lithium-Polymer-Akkumulatoren genannt werden, die kein flüssiges Elektrolyt enthalten. Hierbei wird das Elektrolyt eingedickt, ähnlich der Vorgehensweise bei Blei-Gel-Akkumulatoren, wodurch für die äußere Form des Akkumulators nahezu keinen Einschränkungen mehr bestehen. Als Beispiel für eine Variation des Anodenmaterials können Lithium-Titanat-Akkumulatoren genannt werden, die durch den Austausch der herkömmlich eingesetzten Graphit-Anode verbesserte Leistungseigenschaften und eine längere Lebensdauer besitzen. Daher wird ein Einsatzbereich insbesondere bei großen, stationär eingesetzten Zellen oder bei sehr hohen Leistungsanforderungen wie etwa bei Hybridfahrzeugen empfohlen [103]. Eine Qualitative Betrachtung der Eigenschaften wichtiger in der Forschung befindlicher Anodenmaterialien ist in Tabelle 6.2 dargestellt.

---

<sup>2)</sup> Klimatisierung erforderlich

**Tabelle 6.2** Eigenschaftsprofile von Anodenaktivmaterialien [103]

	Energie	Leistung	Lebensdauer	Sicherheit
Synthetischer Graphit	++	+	+	+
Naturgraphit	++	+	0	0
Amorpher Kohlenstoff	0	++	++	++
Lithium-Titanat	--	+++	+++	++++
Siliziumlegierungen	++++	+	--	-
Lithium	++++	-	-	--

Für die dauerhafte und unterbrechungsfreie Energieversorgung muss das System so ausgelegt sein, dass unter normalen Betriebsbedingungen die Batterie nicht bis zu ihrer Entladetiefe entladen wird. Dieses ist aufgrund der fluktuierenden Einspeisung und deren schlechter Vorhersagbarkeit nicht immer möglich. Die vorhandene Energie sollte daher zu jedem Zeitpunkt für eine Ladung des Batteriesystems genutzt werden. Dadurch resultieren im Allgemeinen keine Vollzyklen (vollständige Entladung und anschließend vollständige Ladung der Batterie), sondern Kleinstzyklen. Die Auswirkungen der Kleinstzyklen auf die Alterung von Solarbatterien sind bislang nicht ausreichend erforscht [11]. Die Veröffentlichungen gehen was die Auswirkungen von Kleinstzyklen betreffen weit auseinander. In [15] wird eine Verkürzung der Lebensdauer prognostiziert während in [13] ein aufsummieren der Energie der Teilzyklen zu einem Vollzyklus führt und somit Teilzyklen keine Auswirkungen auf die Lebensdauer besitzen. Eine abschließende Bewertung kann hier nicht vorgenommen werden. Wahrscheinlich ist jedoch für die Berechnung der Zyklen und damit der Lebensdauer neben der reinen Anzahl der Zyklen insbesondere die Tiefe auf die die Batterie entladen bzw. auf den sie wieder aufgeladen wird von entscheidender Bedeutung. In Abschnitt 14.2.2 wird verschiedene Lebensdauer verlängernde Betriebsstrategien vertieft eingegangen und Beispiele und Limitationen für die Ladestrategien genannt.

## 6.2 Dimensionierung der Energiespeicher

Die größte Herausforderung des Gesamtsystems liegt in der vollständigen Autarkie. Oftmals werden Energiespeicher zur Erhöhung des Eigenverbrauchs von Energie bspw. aus erneuerbaren Energiequellen eingesetzt. Dabei wird im Bedarfsfall weiterhin auf das vorgelagerte Netz zurückgegriffen. Nur in Randbereichen sind bisher autarke Sys-

teme mit einem hohen Leistungsbedarf zu finden. In kleineren Leistungsklassen finden diese Systeme schon serienmäßig, wie bspw. bei Parkscheinautomaten und Verkehrsleitsystemen, Anwendung. In höheren Leistungsklassen ist die Versorgung abgelegener Umweltüberwachungsstationen, bspw. auf See, zu realisieren. Die Energieversorgung von Telekommunikationsmasten oder Hütten in den Bergen fällt ebenfalls in diese Kategorie.

Die Dimensionierung der Energiespeicher ist u. a. stark von den verwendeten Energieerzeugungsanlagen abhängig. So sind durch das Speichersystem beim Einsatz von kombinierten Wind-PV-Hybridsystemen im Allgemeinen nur zwei bis drei Tage ohne Energieerzeugung zu überbrücken. Beim separaten Einsatz von KWEA oder PV-Anlagen sind es hingegen fünf bis sechs Tage [10].

Ein weiterer wichtiger Parameter der die Dimensionierung betrifft ist der Energieverbrauch. Bei einem Ausfall der Energieerzeugung bietet ein aufgeladener Energiespeicher die Sicherheit der Weiterversorgung unterbrechungsfreier Versorgung bis zur Instandsetzung.

Die Firma SMA bspw. bietet vollständige Systeme zur Versorgung autarker Mobilfunkbasisstationen an. Anlagen dieses Typs sind bereits mehrfach errichtet worden. Dabei werden Grenzen für die Dimensionierung von Energiequellen genannt. Um eine Überdimensionierung der Energiequelle zu vermeiden, sollte nach Abzug des Laststroms der maximale Ladestrom nicht überschritten werden. Eine Untergrenze gilt nur in Systemen ohne externe steuerbare Energiequelle (wie bspw. Blockheizkraftwerke). In diesen Systemen sollte zu Spitzenzeiten ein Ladestrom von mindestens 10 A bezogen auf eine Nennkapazität von je 100 Ah erreichbar sein [16].

### 6.3 Typische Kosten von Batteriespeichern

Im Folgenden soll ein kurzer Überblick über den aktuellen Markt für Energiespeichersysteme gegeben werden. Zur Ermittlung von Preisen wurden mehrere Unternehmen kontaktiert. In der folgenden **Tabelle 6.3** sind die recherchierten Preise und die entsprechenden Speicherkapazitäten zusammengestellt.

**Tabelle 6.3** Kosten verfügbarer Batteriespeicher

Hersteller	Batterietechnologie	Nutzbare Speicherkapazität in kWh	Entladetiefe in %	Abmessungen in m <sup>3</sup>	Nettopreis in €	Nettopreis pro kWh in t€
E3/DC	Lithium-Ionen	4,32	80	1 * 1 * 0,4	11.840	2,2
Voltwerk	Lithium-Ionen	5,28	60	0,6 m * 1,75 m * 0,7 m	12.000	1,36
MSTE Solar	Lithium-Ionen	4,32	80	0,6 m * 0,6 m * 0,8 m	8.925	1,65
Prosol	Lithium-Ionen <sup>3</sup>	5,88	70	0,6 m * 1,3 m * 0,5 m	12.400	1,47
Solarworld	Blei-Gel	3,45	50	0,9 m * 0,9 m * 0,25 m	5.900	0,86
Nedap	Blei-Säure	5,52	60	0,77 m * 0,5m * 0,15 m	6.295	0,68

Momentan sind Speichersysteme vor allem zur Kombination mit Photovoltaikanlagen konzipiert. Daher sind die recherchierten Systeme ursprünglich für die Speicherung elektrischer Energie aus Photovoltaikanlagen konstruiert. Technisch sind die meisten der betrachteten Systeme jedoch auch für einen Anschluss an eine KWEA oder ein anderes Energieerzeugungssystem geeignet. Bei den dargestellten Systemen ergibt sich ein Bereich des Volumens pro Speicherkapazität von 0,01 - 0,1 m<sup>3</sup>/kWh und ein Nettopreis pro kWh von ca. 1,4 – 2,2 t€ bei Li-Ion-Akkumulatoren und 0,7 – 0,9 t€ für Blei-Akkumulatoren. Im Vergleich zu den in Tabelle 6.1 dargestellten Kosten zeigt sich hier mehr als eine Verdoppelung bei der Verwendung von verfügbaren Speichersystemen. Für die Berechnung der Kosten wird im Folgenden mit den mittleren Kosten der verfügbaren Speichersystemen für jede Technologie gerechnet da diese auch die Kosten von benötigten Laderegler, Schaltschrank und Schutztechnik beinhalten. Diese gemittelten Kosten betragen somit 1,8 t€/kWh Li-Ion- und 0,8 t€/kWh für Blei-Batteriesysteme.

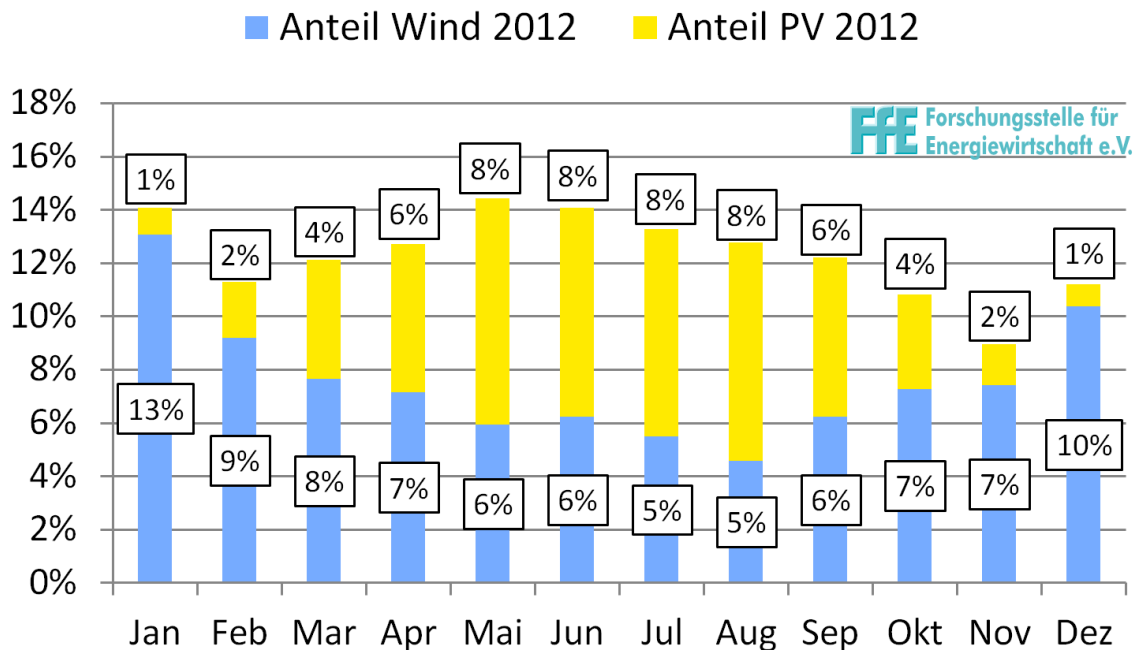
---

<sup>3</sup> Anschluss AC-seitig



## 7 Zusammenwirken von Photovoltaik- und Kleinwindenergieanlagen

Das Zusammenwirken von Photovoltaik und Windenergie bei der Bereitstellung elektrischer Energie birgt saisonale Vorteile. Diesen Zusammenhang stellt **Bild 7.1** dar, es zeigt den Anteil der beiden Technologien an der Bruttostromerzeugung für die Monate des Jahres 2012 in Deutschland.



**Bild 7.1** Anteile der Windenergie und Photovoltaik an der Bruttostromerzeugung [35]

Dabei ist ersichtlich, dass durch die jahreszeitlichen Verhältnisse des Dargebots an Wind und solarer Einstrahlung eine relativ konstante Energieerzeugung aus beiden Quellen möglich ist. Es ist jedoch zu beachten, dass die in **Bild 7.1** dargestellten Werte Mittelwerte für die Bundesrepublik Deutschland sind. Sie sind demnach standortunabhängig. Außerdem ist, da es sich um prozentuale Angaben handelt, der saisonale Unterschied der der Darstellung zugrundeliegenden elektrischen Lasten zu berücksichtigen. Die elektrische Netzlast in den Wintermonaten übertrifft die in den Sommermonaten.

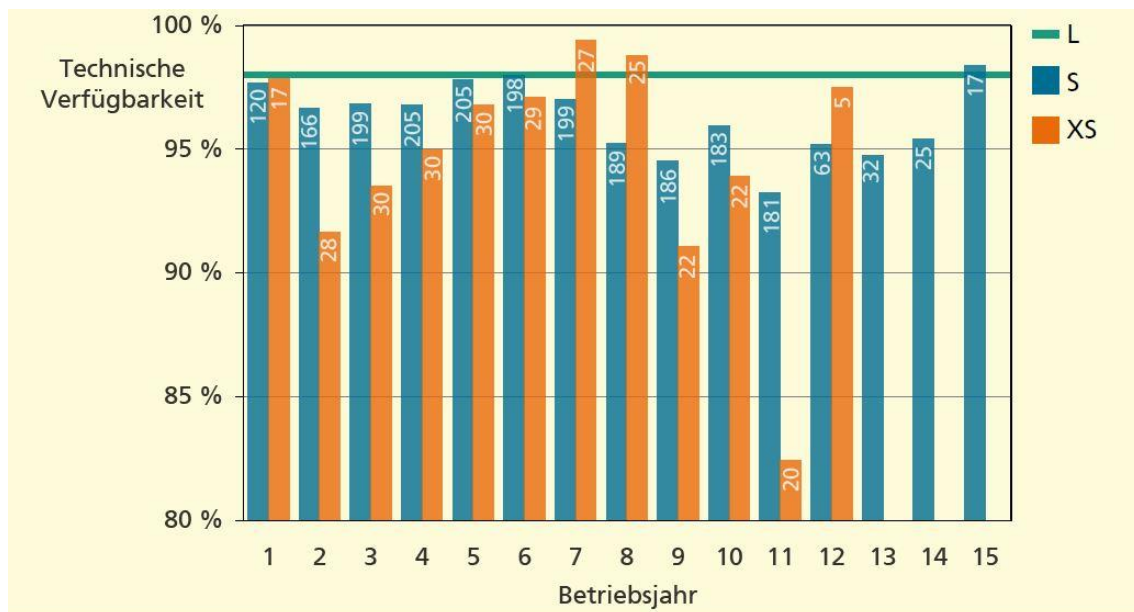
Nicht nur die saisonal unterschiedlichen Maxima sorgen für eine gute Ergänzung von Photovoltaik und Windkraft. Auch das tägliche Zusammenspiel kann eine in gewissem Rahmen gleichmäßige Energieerzeugung ermöglichen. In sonnenstarken Zeiten sind oft schwache Windverhältnisse anzutreffen, während Wetterlagen mit starken Winden häufig mit Wolkenbildung verbunden sind und somit eine geringere Globalstrahlung und folglich geringere Erzeugungswerte der Photovoltaikanlagen zur Folge haben.

## 8 Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Wartung

Die Zuverlässigkeit von autarken Energieversorgungssystemen kann nur durch eine entsprechende Überdimensionierung der Erzeugungsanlagen und der Batteriespeicher erreicht werden. Dabei ist ein Optimum zwischen Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit der Anlage anzustreben.

Der Ausfall eines Betriebsmittels kann unterschiedliche Auswirkungen haben. Fällt die Batterie oder der Laderegler aus, ist ein Aufrechterhalten des gesamten Systems zu allen Zeitpunkten nicht möglich. Bei Fehlern der KWEA oder der PV-Anlagen können Messungen und die Bearbeitung von Daten in Abhängigkeit der weiterhin erzeugten Leistung bzw. des Ladezustands des Batteriesystems gegebenenfalls ohne Unterbrechung und damit ohne Datenverlust bis zur Instandsetzung weiterbetrieben werden. Daher sind die Ausfallwahrscheinlichkeiten der einzelnen Systemkomponenten hinsichtlich der Zuverlässigkeit des Gesamtsystems von Bedeutung.

Für PV-Anlagen werden in entsprechenden Veröffentlichungen Ausfallraten von 0,11 Fehlern pro Jahr mit einer durchschnittlich benötigten Zeit zur Reparatur von 72 Stunden angegeben. Für Windenergieanlagen großer Leistungsklassen beläuft sich die angegebene Ausfallrate auf 0,22 Fehler pro Jahr bei durchschnittlich 60 Reparaturstunden [17]. Diese Zahlen sind jedoch nicht repräsentativ für KWEA und werden daher detaillierter betrachtet. Bei den Störungsursachen sind zwischen WEA und KWEA keine großen Unterschiede festzustellen. Bei KWEA ist jedoch prozentual eine Erhöhung der Schädigungen bei Sturmschäden und Blitzeinschlägen festzustellen. Verbesserte Werte zeigen KWEA hingegen bei Bauteildefekten [105]. Bei der Verfügbarkeit zeigen sich hingegen sehr große Unterschiede. Das liegt zu großen Teilen an der Ausfallzeit. Während beim Kauf großer WEA häufig ein Service- und Wartungsvertrag mit abgeschlossen wird und so eine schnelle Fehlerklärung durch spezialisiertes Personal erfolgt, ist dies bei KWEA nicht der Fall. Dort kann die Ausfallzeit in Abhängigkeit des Schadensfalls mehrere Wochen in Anspruch nehmen [105]. Die sich dadurch ergebende technische Verfügbarkeit liegt bei KWEA somit deutlich geringer, wie die folgende Abbildung zeigt.



**Bild 8.1** Technische Verfügbarkeit von KWEA; S:  $P_N \leq 200$  kW; XS:  $P_N \leq 10$  kW [105]

Bei der Wartung kann erneut auf Erfahrungen beim Betrieb von Repeater- und Basisstationen für Mobilfunknetze zurückgegriffen werden. Dabei werden höchste Anforderungen an die Verfügbarkeit derartiger Versorgungssysteme gestellt. Um solche Anlagen zuverlässig und wirtschaftlich betreiben zu können, sind die Anlagen mit Systemen zur Selbstdiagnose und zur Fernüberwachung ausgerüstet. Die Wartung der Anlagen ist somit bedarfsgerecht durchführbar [16].

Die jährlichen Betriebskosten für Wartung, Instandhaltung und Versicherung liegen bei KWEA pro kW installierte Leistung deutlich höher als bei WEA größerer Leistungsklassen [105]. Jährlich belaufen sie sich auf ca. 3 % der Investitionskosten der KWEA.

## 9 Lebenszyklus, Nachhaltigkeit und Emissionen

Im folgenden Kapitel wird eine Abschätzung der Nachhaltigkeit und der Lebensdauer der eingesetzten Komponenten vorgenommen.

### 9.1 Energieerzeugungsanlagen

#### 9.1.1 Photovoltaik

Die Gewinnung von hochreinem Silizium als auch die Züchtung monokristalliner Strukturen ist sehr energieintensiv. Dabei werden für eine monokristalline 5 kWp Anlage 83 % der im Lebenszyklus benötigten Energie allein für die Modulherstellung benötigt [101]. Der Energiebedarf für die Errichtung, Entsorgung, Herstellung der Wechsel-

richter und Gestelle, usw. besitzen dagegen eine untergeordnete Bedeutung. Insbesondere bei der Herstellung von Dünnschichtmodulen mit amorphen Strukturen aber auch bei multikristallinen Siliziumzellen wird weniger Energie zur Modulherstellung benötigt. Bis die Energie die für die Herstellung von Photovoltaikanlagen benötigt wird, durch während des Betriebes erzeugte Energie amortisiert wird, können je nach Technologie und Standort einige Jahre (Energierücklaufzeit) vergehen.

Die bei der Herstellung eingesetzten Materialien unterscheiden sich für die Solarmodule. Siliziumwafer-Module vieler Hersteller enthalten häufig substituierbares Blei (z. B. in Lötverbindungen) sonst aber keine als toxisch einzustufenden Materialien. Dünnschichtmodule dagegen enthalten je nach Technologie Selen und Indium oder Cadmium und Tellur und damit teilweise als giftig eingestufte Stoffe.

Beim Recycling von PV-Modulen besitzen Siliziumwafer-Module nach aktuellem Kenntnisstand ebenfalls Vorteile. Da die Branche jedoch am Anfang steht sind auch für Dünnschichtmodule weitere Reduzierungen der Umweltbelastungen zu erwarten [101]. Als Lebensdauer eines Photovoltaikmoduls kann konservativ geschätzt von 20 Jahren ausgegangen werden.

### **9.1.2 Kleinwindenergieanlagen**

Da die Herstellung von KWEA je nach Typ und Hersteller sehr unterschiedlich ist und von Holz über GFK bis Metall viele Materialien verwendet werden können, ist im Allgemeinen keine Aussage zur Nachhaltigkeit zu treffen. Das Produktangebot spannt eine große Spanne zwischen technisch hochwertigen Konstruktionen bis hin zu Selbstbaulösungen.

Als Lebensdauer einer Windenergieanlage kann von 10 – 15 Jahren ausgegangen werden.

WEA sind im Gegensatz zu PV-Anlagen nicht Emissionsfrei. Sie erzeugen sowohl Schallemissionen als auch Schattenwurf die jeweils bei einer Überschreitung der zulässigen Grenzen zu einem Verbot der Aufstellung führen können. Die Genehmigung ist in den Bundesländern unterschiedlich geregelt und richtet sich häufig nach der Anlagensamthöhe. Die autarke Energieversorgung ist jedoch nur mit einem großen Abstand zu Anwohnern wirtschaftlich sinnvoll, sodass die vorhandenen Grenzwerte für die Immission keine Einschränkung darstellen sollten.

## **9.2 Energiespeicher**

Bei der Herstellung einer Batterie wird zwischen 40- bis 500-mal mehr Energie benötigt

als sie bei der Nutzung zur Verfügung stellen kann. Durch den Einsatz von Akkumulatoren kann diese schlechte Energiebilanz in den meisten Fällen abgemildert werden [102].

Je nach Technologie enthalten Gerätebatterien Wertstoffe wie Zink, Eisen, Aluminium, Lithium und Silber jedoch auch Quecksilber, Cadmium und Blei die bei unsachgemäßer Entsorgung für die Umwelt gefährdend bzw. giftig sind [102].

Für Wiederverwertung muss zwischen den einzelnen Akkumulator-Technologien unterschieden werden, da sich die Aufbereitung hinsichtlich des Aufwands als auch bei den tatsächlich wiederverwerteten Bestandteilen stark unterscheidet.

Die Wiederverwertbarkeit für Bleiakkumulatoren gilt dabei als sehr gut [74]. Die Hauptbestandteile von NiMH-Akkumulatoren sind Nickel, Eisen und seltene Erden. Dabei können mit Verfahren der Wiederverwertung das enthaltene Kobalt zu 100 %, Nickel zu 96 % und die seltenen Erden zu 99 % zurückgewonnen werden.

Als Hauptinhaltsstoffe von Lithium-Ionen-Akkumulatoren sind Graphit, Kobalt, Nickel und Lithium zu nennen. Insbesondere die Demontage und Verwertung der Lithium-Ionen-Akkumulatoren stellt wegen des hochreaktiven Lithiums, das aktuell noch ein Abfallprodukt ist, eine Herausforderung dar [102]. Insgesamt kann jedoch bei Lithium-Ionen-Akkumulatoren auch mit viel Aufwand nur wenig brauchbares Material zurückgewonnen werden. Die Wiederverwertbarkeit ist im Vergleich zu anderen Technologien daher als weniger gut einzustufen [74].

Als kalendarische Lebensdauer kann bei Bleiakkumulatoren von ca. 5 - 15 Jahren ausgegangen werden. Die Herstellerangaben der Lebensdauer bei Lithium-Ionen-Akkumulatoren bewegen sich im Bereich von ca. 15 - 20 Jahren.

## **10 Kommerzielle Inselsysteme**

Die Anwendung von Inselsystemen hat sich in vielen Bereichen durchgesetzt und zu standardisierten kommerziellen Lösungen geführt. Dieses sind beispielsweise Kleinstanwendungen in Taschenrechnern und Uhren mit einer Leistung bis 1 W. Für größere Anwendungen sollen im Folgenden Beispiele verschiedener Leistungsklassen mitsamt der Systemkomponenten und preislichen Größenordnungen dargestellt werden. Die angegebenen Preise enthalten keine Umsatzsteuer.

### **PV-Erzeugung und DC-Last bis 300 W**

Im kleineren Leistungsbereich sind bspw. für den Einsatz in Wohnmobilen komplette

Systeme mit aufeinander abgestimmten Komponenten erhältlich. Dabei werden PV-Module auf den Dächern der Fahrzeuge montiert, die die vorhandenen Bordbatterien als Speicher nutzen. Zu den installationsfertigen Systemen gehören neben Solarmodulen und Laderegler auch die erforderlichen Montagekomponenten und Halterungen. Die Kosten einer 110-W-Anlage mit monokristallinen Modulen werden mit ca. 420 € angegeben. Etwas leistungsstärkere 280-W-Systeme mit polykristallinen Modulen sind für etwa 940 € verfügbar [18].

### **Hybride Erzeugung und einphasige AC-Last bis 1 kW**

Für hybride Inselanlagen mit KWEA- und PV-Erzeugung sind ebenfalls Komplettlösungen in verschiedenen Leistungsklassen verfügbar. Im kleineren Leistungsbereich bis etwa 1 kW elektrischer Last sind bspw. Systeme bestehend aus zwei Solarmodulen mit jeweils 140 Wp und einem Windgenerator mit einer Leistung von 200 W und eingebautem Laderegler erhältlich. Die Erzeugerkomponenten werden mit zwei 12-V-Blei-Gel-Batterien mit einer Kapazität von je 150 Ah sowie einem Wechselrichter mit Batterieladeregler kombiniert. Der angegebene Preis des Gesamtsystems liegt bei ca. 2.860 € [19].

### **Hybride Erzeugung und einphasige AC-Last bis 3,5 kW**

Zur Versorgung von AC-Lasten bis 3,5 kW ist folgendes Hybridsystem für ca. 8.400 € geeignet [19].

- Vier monokristalline PV-Module, Leistung je 200 Wp
- Windgenerator mit Laderegler, Leistung 700 W
- Wechselrichter mit eingebautem Solar- u. Netzladeregler, Leistung 3,5 kW
- Vier 12-V-Blei-Gel-Batterien, Kapazität je 230 Ah

### **PV-Erzeugung und einphasige AC-Last bis 5 kW**

Größere AC-Lasten bis 5 kW können bspw. durch folgendes System für ca. 13.450 € versorgt werden [19].

- Zehn monokristalline PV-Module, Leistung je 200 Wp
- PV-Wechselrichter, Leistung 1,7 kW
- Bidirektionaler Batteriewechselrichter, Leistung 5 kW
- Zwölf 12-V-Blei-Gel-Batterien, Kapazität insgesamt 690 Ah

## 11 Autarke Stromversorgungskonzepte

Im diesem Kapitel werden die dargestellten Energieerzeugungsanlagen auf die in Kapitel 4 parametrisierten Verbraucher mit dem aufgezeigten Lastprofil hin ausgelegt. Dabei werden unterschiedliche Szenarien, die von einer einzelnen Versorgung der Verbraucher durch eine Energieerzeugungsanlage bis hin zum Hybridsystem reichen, bei Variation der charakteristischen Leistungsparameter und der Dimensionierung auf den Platzbedarf, die Verfügbarkeit und die Kosten hin untersucht, verglichen und bewertet.

Bei allen Szenarien wurde dabei eine maximale Entladetiefe von 80 % und eine Ladezustand bei Start der Berechnungen von 50 % angenommen.

Für das erste Szenario „PV – 600 Wp“ ist eine Speicherdimensionierung für eine Reserve von einer Woche eingeplant, die 600 Wp der PV-Anlage ergeben sich dadurch aufgrund der Mindestdimensionierung der Erzeugung nach Abschnitt 6.2.

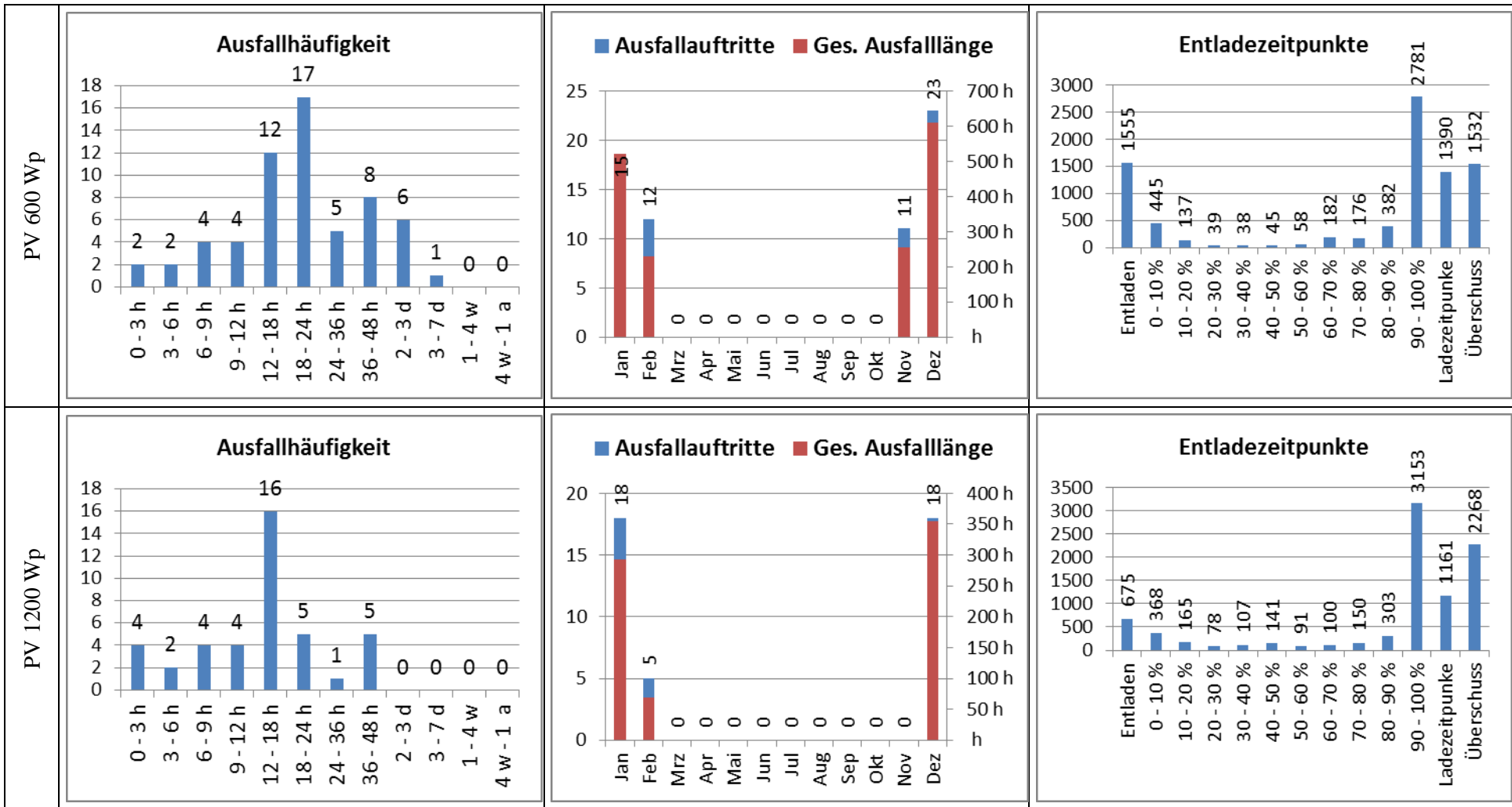
Für die Bestimmung der Lebensdauer der Batteriesysteme wird angenommen, dass die kalendarische Lebensdauer die Grenze darstellt. Dies ist der Fall, da die Berechnungen der dem Speicher übers Jahr entnommenen Energiemenge bezogen auf die Leistung des Speichers zu einer theoretischen Vollzyklenzahl pro Jahr von 15 – 50 in den Szenarien führt. Und damit nicht im Bereich einer Einschränkung für die Lebensdauer liegt.

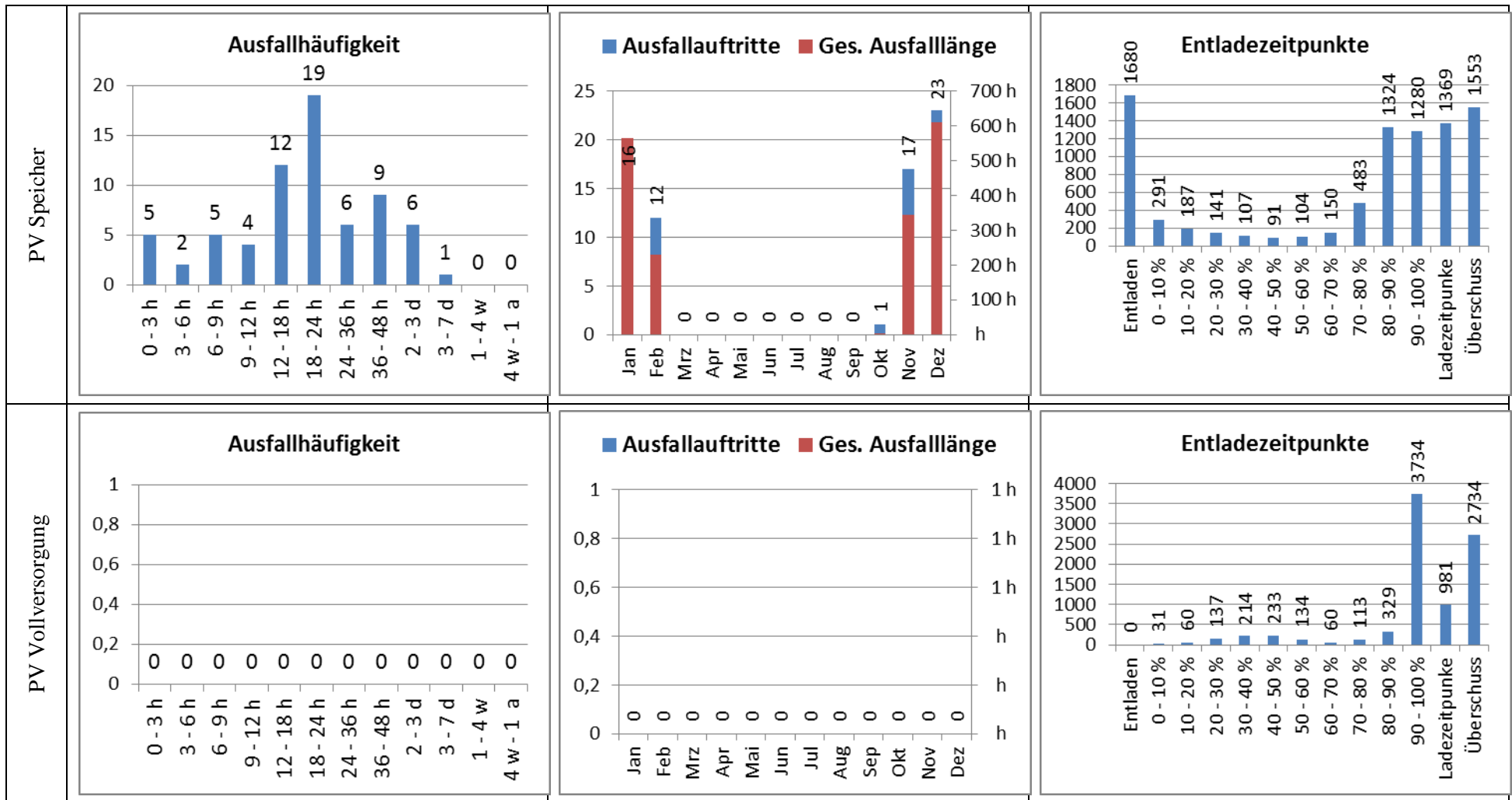
**Tabelle 11.1** Definition der Szenarien und Ergebnisse aus der Berechnung

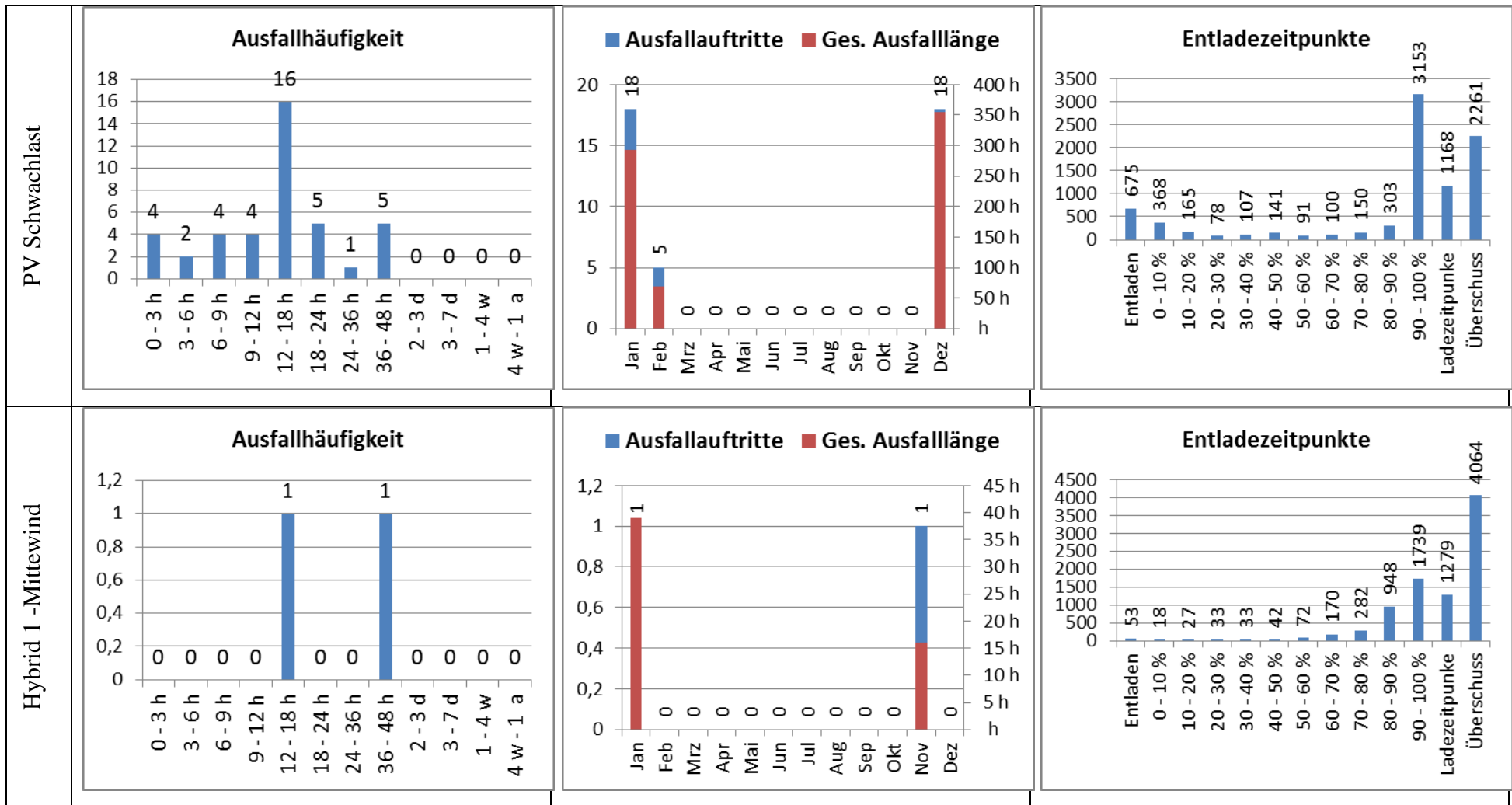
Szenario		PV 600 Wp	PV 1200 Wp	PV Speicher	PV Voll- versorgung	PV Schwach- last	Hybrid 1 Mittelwind	Hybrid 2 Schwachwind	KWEA Mittelwind	KWEA Starkwind	
Energiebedarf	Täglich in Wh	900	900	900	900	450	900	900	900	900	
	Wöchentlich in Wh	6.300	6.300	6.300	6.300	3.150	6.300	6.300	6.300	6.300	
Energiespeicher	Kapazität in Wh	6.300 (7 Tage)	6.300 (7 Tage)	2.700 (3 Tage)	8.900 (10 Tage)	3.150 (7 Tage)	2.700 (3 Tage)	2.700 (3 Tage)	6.300 (7 Tage)	4.500 (5 Tage)	
	Abmessungen in m <sup>3</sup>	0,063 - 0,63	0,063 - 0,63	0,027 - 0,27	0,089 - 0,89	0,0315 - 0,315	0,027 - 0,27	0,027 - 0,27	0,063 - 0,63	0,045 - 0,45	
	Lebens- dauer in a	Li-Ion	15 - 20	15 - 20	15 - 20	15 - 20	15 - 20	15 - 20	15 - 20	15 - 20	15 - 20
		Blei	5 - 15	5 - 15	5 - 15	5 - 15	5 - 15	5 - 15	5 - 15	5 - 15	5 - 15
	Preis in €	Li-Ion	11.340	11.340	4.860	16.020	5.670	4.860	4.860	11.340	8.100
		Blei	5.040	5.040	2.160	7.120	2.520	2.160	2.160	5.040	3.600
Photovoltaik	Leistung in kWp	0,6	1,2	0,6	2,2	0,6	0,6	0,6	0	0	
	Standort	Syke	Syke	Syke	Syke	Syke	Syke	Syke	-	-	
	Jahresertrag in kWh	556	1.112	556	2.038	556	556	556	-	-	
	Platz- bedarf in m <sup>2</sup>	Mono	3,6 - 5,4	7,2 - 10,8	3,6 - 5,4	13,2 - 19,8	3,6 - 5,4	3,6 - 5,4	3,6 - 5,4	-	-
		Poly	4,2 - 6	8,4 - 12	4,2 - 6	15,4 - 22	4,2 - 6	4,2 - 6	4,2 - 6	-	-
		Amorph	9 - 15,6	18 - 31,2	9 - 15,6	33 - 57,2	9 - 15,6	9 - 15,6	9 - 15,6	-	-
		CdTe	5,4 - 10,2	10,8 - 20,4	5,4 - 10,2	19,8 - 37,4	5,4 - 10,2	5,4 - 10,2	5,4 - 10,2	-	-
Preis in €	900 –	1.800 –	900 –	3.300 –	900 –	900 –	900 –	900 – 1.260	0	0	

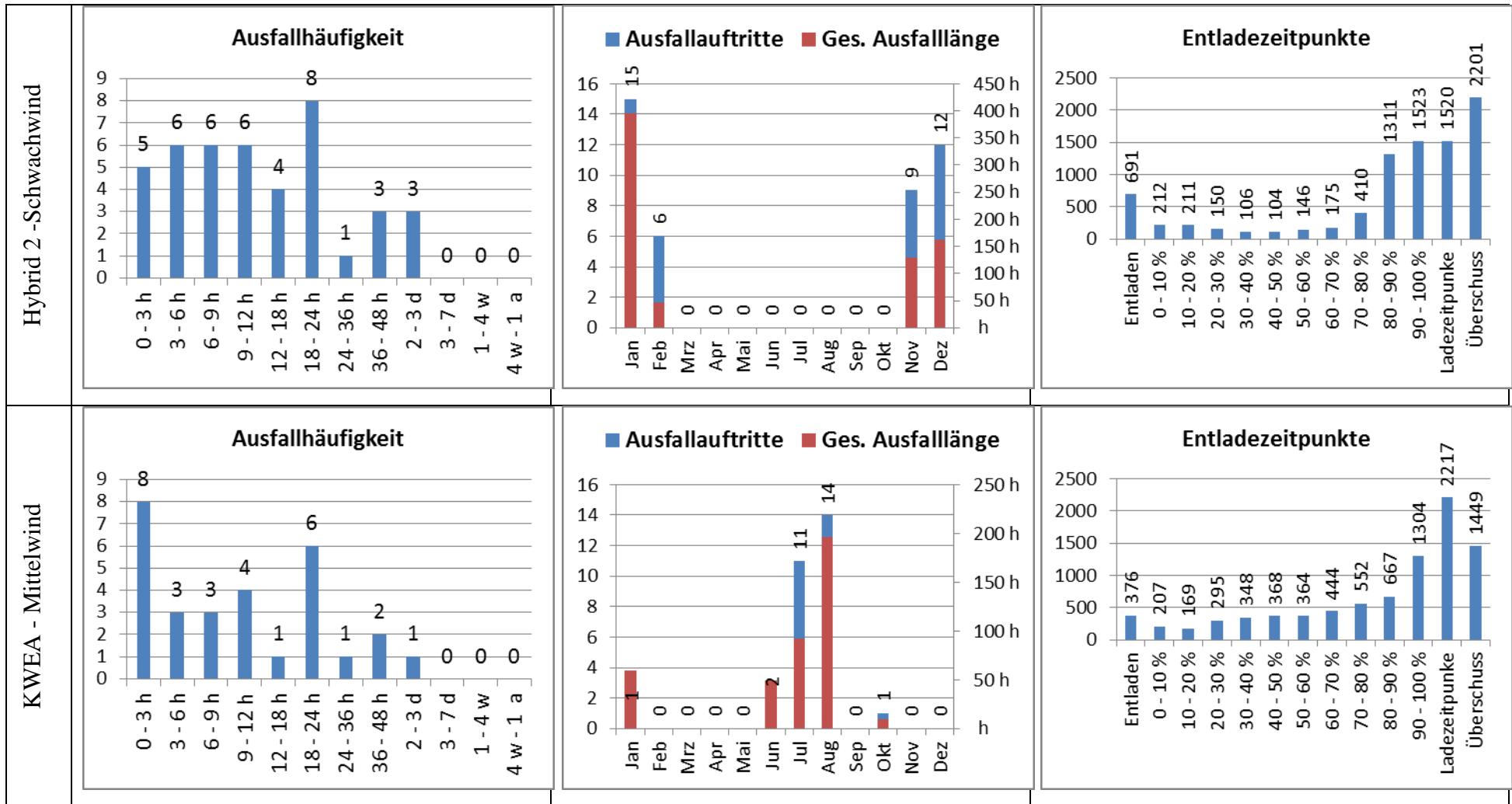


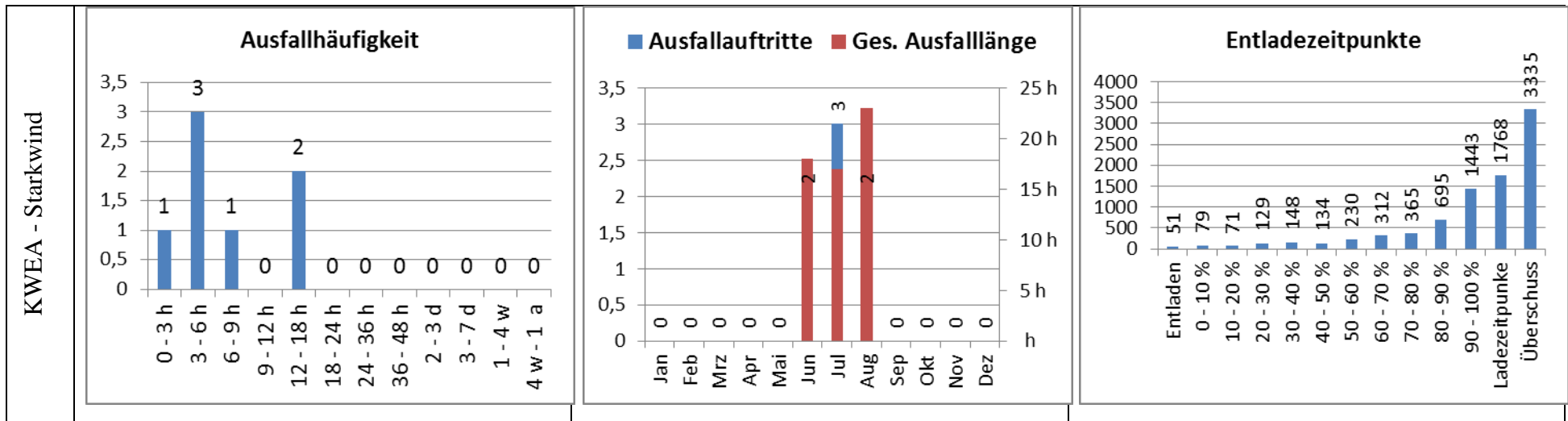
Szenario		PV 600 Wp	PV 1200 Wp	PV Speicher	PV Voll- versorgung	PV Schwach- last	Hybrid 1 Mittelwind	Hybrid 2 Schwachwind	KWEA Mittelwind	KWEA Starkwind
		1.260	2.520	1.260	4.620	1.260	1.260			
Wind	Anlage	Keine	Keine	Keine	Keine	Keine	Ampair 600	AeroCraft Ac 752	AeroCraft Ac 752	Ampair 600
	Leistung in kW	-	-	-	-	-	0,600	0,750	0,750	0,600
	Standort	-	-	-	-	-	Hannover Ø=3,6 m/s	Magdeburg Ø=2,5 m/s	Hannover Ø=3,6 m/s	Emden Ø=4,3 m/s
	Jahresertrag in kWh	-	-	-	-	-	534	167	573	908
	Preis in €	-	-	-	-	-	2.390	3.950	3.950	2.390
Ergebnisse	Verfügbarkeit in %	81,6	91,8	80	100	91,8	99,4	91,6	95,4	99,3
	Überschüssige ungenutzte Energie in %	51	73	52	84	73	70	58	45	64
	Längste Ausfallzeit in h	85	46	85	0	46	39	67	59	18
	Gesamtpreis in €	5.940 – 12.600	6.840 – 13.860	3060 - 6120	10.420 – 20.640	3.420 – 6.930	5.450 – 8.510	7.010 – 10.070	8.990 – 15.290	5.990 – 10.490











Im Folgenden werden die dargestellten Ergebnisse für die einzelnen Szenarien ausgewertet.

Durch die gewählte Dimensionierung des Speichers und der PV-Anlage im Szenario „PV 600 Wp“ entsteht eine Verfügbarkeit von lediglich 81,4 % des Jahres. Die gewählte Dimensionierung der PV-Anlage ist dabei auf die angegebene Untergrenze für autarke Inselnetze ohne extern steuerbare Energiequellen ausgelegt. Dabei zeigt sich, dass dieser Wert aufgrund der saisonalen Schwankungen der Globalstrahlung für eine dauerhafte Versorgung zu gering ist. Daher erfolgt die Betrachtung im Szenario „PV 1200 Wp“ bei einer Verdoppelung der Leistung der Einspeisung. Dadurch ergibt sich eine Steigerung der Verfügbarkeit um mehr als 10 % auf den Wert 91,8 %, bei nur einer geringen Steigerung der Kosten. Der Platzbedarf für die PV-Anlage verdoppelt sich dabei jedoch ebenfalls, sodass standortabhängig eine Begrenzung des Zubaus von PV-Leistung durch die vorhandene Fläche eine starke Limitation darstellen kann. Hinzu kommt, dass die, aufgrund eines vollständig aufgeladenen Energiespeichers, nicht nutzbare Energie um mehr als 20 % ansteigt. Dabei ist zu beachten, dass die genutzte Energie aufgrund der höheren Verfügbarkeit in dem betrachteten Szenario „PV 1200 Wp“ insgesamt höher ist als Szenario „PV 600 Wp“.

Die Darstellung der Entladezeitpunkte des Szenarios „PV 600 Wp“ zeigen wie wenig der Energiespeicher bei der gewählten Dimensionierung zwischen 20 % und 60 % genutzt wird. Die Reduzierung der Kapazität des Speichers von 7 auf 3 Tage im Szenario „PV Speicher“ hat daher nur eine Reduzierung der Verfügbarkeit um weniger als 2 % bei einer Kostenreduktion von fast 50 % zur Folge. Dieser Effekt tritt aufgrund der großen saisonalen Schwankungen der Globalstrahlung auf. Über das Sommerhalbjahr ist das Speichersystem nahezu komplett geladen und arbeitet die meiste Zeit im Bereich von 90 – 100 %, während in den Wintermonaten ein Arbeitspunkt im unteren Kapazitätsbereich vorhanden ist. Der Energiespeicher wird dann nicht mehr auf seine volle Kapazität aufgeladen und bietet daher nahezu keinen Vorteil in der Verfügbarkeit gegenüber einem kleineren System.

Das Szenario „PV Vollversorgung“ ist so dimensioniert, dass bei dem gewählten Lastprofil eine 100-prozentige Verfügbarkeit entsteht. Dabei sind mehrere Möglichkeiten der Dimensionierung denkbar die eine 100-prozentige Verfügbarkeit herstellen würden. Die Extremfälle bilden dabei ein stark überdimensionierter Energiespeicher und somit nahezu keine ungenutzte Einspeisung oder eine stark überdimensionierte Einspeisung

und damit sehr viel nicht nutzbare Energie ab.

Die im „PV Vollversorgung“ entstehenden Gesamtkosten machen deutlich, dass eine solche Dimensionierung nicht sinnvoll ist und für eine garantierte 100-prozentige Versorgung eine extern steuerbare Energiequelle wie z. B. eine Brennstoffzelle die Methode der Wahl darstellen würde.

Das Szenario „PV Schwachlast“ macht deutlich, dass eine Halbierung des Energieverbrauchs deutliche Einsparungen bei den Kosten zur Folge hat, und somit energiesparende Betriebszustände der Verbraucher am Accesspoint ein großes Potential für Kosteneinsparungen bieten. Die sich in diesem Szenario einstellende Verfügbarkeit, Ausfallzeit usw. ist identisch mit der im Szenario „PV 1200 Wp“.

Die Ergebnisse des ersten Hybridszenarios zeigen den Vorteil einer Einspeisung aus mehreren Energiequellen auf. Die Verfügbarkeit liegt mit 99,4 % sehr hoch. Die Betrachtung der Lade- und Entladezeitpunkte macht deutlich, dass kein saisonaler Arbeitspunkt im unteren Kapazitätsbereich besteht. Zusätzlich ist durch die Entladung des Batteriesystems nahezu nur im oberen Kapazitätsbereich automatisch ein lebensdauerschonendes Betriebsverhalten vorhanden.

Das Szenario „Hybrid 2 – Schwachwind“ zeigt im Vergleich dazu eine deutlich geringere Verfügbarkeit. Dies ist der geringen mittleren Windgeschwindigkeit und dem sich dadurch einstellenden geringen Jahresertrag der KWEA zuzuordnen. Die mittlere Windgeschwindigkeit liegt an Schwachwindstandorten meistens unter der Ansprechschwelle von KWEA. Dadurch ergeben sich sehr kleine Erträge. Auch bei einer Windabschattung durch Hindernisse ist der Ertrag von Windenergieanlagen stark reduziert. Bei der Auswahl der KWEA hat daher die Einschaltgeschwindigkeit ein sehr hohes Gewicht.

Ein Vorteil von KWEA im Vergleich zur PV ist die etwas geringere saisonale Schwankung. Einen weiteren Vorzug besitzt die KWEA durch ihren geringeren Platzbedarf, bzw. den Platzbedarf am oberen Ende der Mastkonstruktion. Die Rotordurchmesser bewegen sich im Bereich von 1 bis 2 Meter und liegen was den Flächenbedarf betrifft somit in Bereichen einer größeren PV-Anlage. Diese Fläche ist jedoch vertikal und nicht wie bei PV-Anlagen nahezu horizontal. Nachteilig sind, wie in Kapitel 8 dargestellt, die geringere Verfügbarkeit, die höhere Wartungsintensivität und zusätzlich der Preis- und Technologievorsprung von PV-Anlagen.

Im Szenario „KWEA – Mittelwind“ ist die alleinige Versorgung aus Windenergie dar-



gestellt. Dabei ergibt sich für den gewählten Standort eine Verfügbarkeit von 95,4 %. Das bedeutet, dass wie schon beschrieben eine geringere saisonale Schwankung der Windeinspeisung im Gegensatz zur Globalstrahlung vorhanden ist. Die Ausfallauftritte in den Sommermonaten zeigen das gute saisonale Zusammenwirken von PV und Wind erneut auf.

Das letzte Szenario zeigt erneut die Ortsabhängigkeit der Windenergieeinspeisung. Dabei wird deutlich, dass in Starkwindgebieten, wie sie nahezu in ganz Norddeutschland vorherrschen und auch in bergigen Regionen in Mittel- und Süddeutschland vorliegen, angenähert eine alleinige Versorgung möglich ist.

Im Folgenden soll die Ortsabhängigkeit der PV-Einspeisung bestimmt werden. Wie bereits ausgeführt, ist die große saisonale Schwankung der Einspeisung ein großes Problem für die kontinuierliche Versorgung. Über das Sommerhalbjahr ist eine komplette Versorgung an allen Standorten möglich. Die Schwierigkeit liegt in den Wintermonaten. Dabei ist statistisch der Monat mit der geringsten Globalstrahlung der Dezember. Dort liegt die gemittelten Monatssummen für die Globalstrahlung aus den Jahren 1981 – 2010 in Norddeutschland bei 11 – 15 kWh/m<sup>2</sup>, in Mitteldeutschland bei 16 – 20 kWh/m<sup>2</sup> und in Süddeutschland bei 21 – 25 kWh/m<sup>2</sup> [9]. Diese geringen Abweichungen von wenigen kWh im Monat über Deutschland zeigen, dass auch in Süddeutschland eine gesicherte Versorgung ausschließlich aus PV-Anlagen nur mit einer erheblichen Überdimensionierung der Anlagen erfolgen kann.

Die Ergebnisse zeigen, dass ein reines PV-Systemkonzept, aufgrund der sehr großen saisonalen Schwankungen des Energieangebots, immer eine Überdimensionierung der Anlagenkomponenten erfordert und damit, um eine hohe Verfügbarkeit zu erreichen, hohe Gesamtkosten besitzt. Das wirtschaftlich technische Optimum stellt an nahezu allen Standorten ein Hybridsystem da. Einerseits bietet es die Sicherheit einer weiterhin möglichen Energieversorgung beim Ausfall einer Energieerzeugungseinheit. Andererseits sorgt es bei den saisonal sowie täglich unterschiedlichen Versorgungszeitpunkten der Erzeuger für eine kontinuierliche Energieversorgung zu einem günstigen Gesamtpreis.

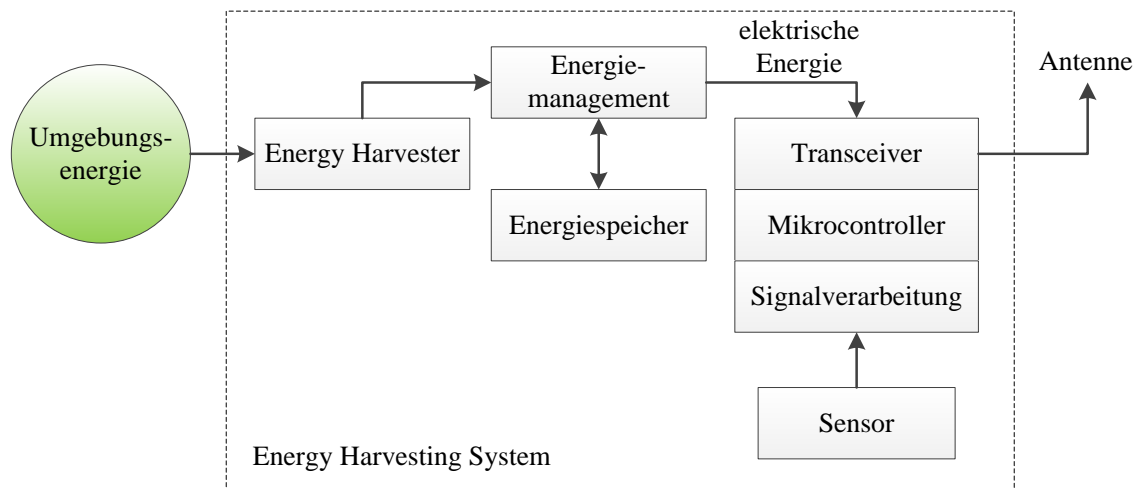
Die Systemkonzept mit nur einer KWEA kann standortabhängig ebenfalls eine hohe Verfügbarkeit erreichen bietet aber im Vergleich zum Hybridkonzept was die Gesamtkosten als auch Sicherheit betrifft, nahezu keine Vorteile.

## 12 Einleitung / Konzept

Nachdem der 1. Teil des vorliegenden Berichts die autarke Energieversorgung des Accesspoints, dem drahtlosen Datenübergabepunkt am Bauwerk, betrachtet, behandelt der folgende Teil die autarke Energieversorgung einzelner Sensoren (sensorautark) bzw. einer Gruppe von Sensoren (knotenautark) am Brückenbauwerk. Dabei wird der Fokus auf drahtlose Monitoring-Systeme gelegt, die anwendungsabhängig Kostenersparnisse gegenüber drahtgebundenen Systemen besitzen können. Die Energieversorgung wird dabei mittels „Energy Harvesting“, also der Energiegewinnung aus der unmittelbaren Umgebung, wie beispielsweise Sonnenlicht, Vibration, Temperaturdifferenzen usw. vorgenommen. Technologieübergreifend ist die elektrische Leistungsbereitstellung durch diese Harvester sehr gering, sie befindet sich im Bereich von einigen  $\mu\text{W}$ . Daher sind für die Entwicklung eines autarken Versorgungskonzepts alle Hard- und Softwarebereiche bezüglich ihres Energieverbrauchs zu optimieren.

Die zur Bauwerksüberwachung eingesetzte Sensorik ist prinzipiell unabhängig vom Versorgungskonzept. Jedoch müssen zur autarken Versorgung sehr energieeffiziente Messsysteme eingesetzt werden, da nur begrenzt Energie zur Verfügung steht. Durch die sehr geringen Leistungen der Harvester und die eingeschränkte Verfügbarkeit aufgrund der natürlichen oder erzwungenen Fluktuation der Energiegewinnung besteht die Notwendigkeit eines Energiemanagementsystems, das beispielsweise die Ladung vorhandener Energiespeicher überwacht und optimiert.

Das Energy Harvesting System, nach **Bild 12.1**, wird durch die Funkübertragung der Messdaten komplettiert. Dabei sind unterschiedliche Funkstandards möglich, die sich in der Netzwerktopologie, Reichweite der Übertragung, Datenübertragungsraten, Sicherheit usw. unterscheiden und somit in Abhängigkeit von unterschiedlichen Anwendungsparametern und Monitoring-Szenarien ausgewählt werden müssen.



**Bild 12.1** Komponenten eines Energy Harvesting Systems [46]

In den nachfolgenden Kapiteln werden nacheinander alle Komponenten des Energy Harvesting Systems grundlegend dargestellt und auf ihre Einsatzmöglichkeiten am Brückenbauwerk überprüft.

## 13 Verbrauchsmomente auf Sensorebene

### 13.1 Energiebedarf der Sensorik

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der eingesetzten Sensorik dargestellt. Dabei erfolgt eine Einteilung der Sensoren in Anwendungsklassen die die Messprinzipien zusammenführen. Durch den potentiellen Einsatz der Sensoren im Energy Harvesting System ist der Energiebedarf der Sensorik ein entscheidendes Kriterium und soll daher ermittelt werden. Der gesamte Energiebedarf der Sensorik beinhaltet jedoch ebenfalls den Energiebedarf der Schaltungstechnik die notwendig ist um die erforderliche Messgenauigkeit erreichen zu können. Daher wird die Schaltungstechnik im Detail für die einzelnen Messprinzipien in den folgenden Abschnitten dargestellt.

#### 13.1.1 Temperatur

Durch Temperaturschwankungen entsteht beispielsweise eine Ausdehnung oder Verkürzung der Tragwerke, Lagerverschiebungen, usw. Zusätzlich ist die Temperatur notwendig um Aussagen über Feuchtemessungen und Frequenzanalysen treffen zu können. Somit ist die Temperaturmessung ein entscheidender Parameter um Einflüsse und Auswirkungen im und am Bauwerk bewerten zu können.

Die konventionelle Messung der Temperatur erfolgt über den Spannungsabfall bei einem konstanten Messstrom über einem temperaturabhängigen Widerstand, beispiels-

weise einem Pt 100 Element. Andere Messverfahren können auch mittels Thermogeneratoren, dessen Wirkungsprinzip in Abschnitt 3.2 dargestellt ist, ausgeführt sein. In **Tabelle 13.1** sind beispielhaft jeweils zwei Applikationen für diese Ausführungsarten dargestellt.

**Tabelle 13.1** Temperatursensoren [86]

Sensorart	Widerstandsthermometer	Widerstandsthermometer	Thermoelement	Thermoelement
	JUMO 902150 Pt100	JUMO 902210/3x Pt1000	Typ T	Typ T
Genauigkeit in $\pm$ °C	0,3 + 0,005  T	0,3 + 0,005  T	0,5	1
Genauigkeitsklasse	Klasse B	Klasse B	Typ T Klasse 1	Typ T Klasse 2
Temperaturbereich in °C	-50 bis +400	-50 bis +400	-200 bis 350	-200 bis +350
Erforderliche Schaltungstechnik	Konstantstromquelle (o. ä.) A/D-Wandlung		Nullstellenkompensation Verstärkung (optional) A/D-Wandlung	

Als ein entscheidendes Auslegungskriterium für ein energieautarkes System ist die Leistungsaufnahme der beiden Messmethoden zu nennen. Thermoelemente erzeugen in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz an den Kontaktstellen eine Spannung. Da jedoch keine feste Referenztemperatur an einer Kontaktstelle vorhanden ist, ist zur Bestimmung der Temperatur eine Nullstellenkompensation und somit Schaltungstechnik notwendig. Aufgrund der geringen Ausgangsspannungen ist zusätzlich häufig eine Verstärkung mit dem entsprechenden Energiebedarf erforderlich. Das Ausgangssignal muss anschließend zur Digitalisierung mit Hilfe eines A/D-Wandlers umgesetzt werden.

Für ein Widerstandsthermometer ist ebenfalls zusätzliche Schaltungstechnik erforderlich. Dabei wird beispielsweise mit Hilfe einer Konstantstromquelle am Platinwiderstand und einem in Reihe geschalteten Messshunt ein Spannungsfall hervorgerufen. Der Spannungsfall an dem Messshunt kann mit einem A/D-Wandler aufgenommen werden. Einfacher integrierbar, platzsparender und energieeffizienter sind hingegen Micro-Elektro-Mechanical System (MEMS)-Temperatursensoren. Durch die Möglichkeit sie in Ruhezeiten in den Sleepmodus zu versetzen sind sie für den Einsatz am autarken Sensorknoten prädestiniert. In **Tabelle 13.2** sind Temperatursensoren aufgeführt die speziell für niedrige Leistungen ausgelegt sind.

**Tabelle 13.2** Integrierte Low-Power Temperatursensoren auf Silicium-Basis [87][88]

	TMP20 TI	TMP102 TI	TMP 112 TI	MCP9804 MicroCHip
Ausgangssignal	Analog	Digital	Digital	Digital
Auflösung	-	12 Bits	12 Bits	12 Bits
Genauigkeit in $\pm$ °C	2,5 (max.) -20 bis 100 °C	2 (max.) bei -25 bis 85 °C	0,5 (max.) bei 0 bis 65 °C	0,25 (typ.) 1 (max.) bei -40 bis +125
Temperaturbereich in °C	-55 bis +130	-40 bis +125	-40 bis +125	-40 bis +125
Spannungs- versorgung in V	1,8 bis 5,5	2,7 bis 5,5	1,4 bis 3,6	2,7 bis 5,5
<b>Strom in Sleepmodus in <math>\mu</math>A</b>	<b>~ 0,02</b>	<b>bis 1</b>	<b>bis 1</b>	<b>0,1 (typ.) 2 (max.)</b>
<b>Aktiver Betriebsstrom in <math>\mu</math>A</b>	<b>bis 6</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>200 (typ.) 400 (max.)</b>
Messdauer in ms	Abhängig vom A/D-Wandler	26 (typ.) 35 (max-)	26 (typ.) 35 (max-)	30 bis 250 (typ.)

Die in **Tabelle 13.2** aufgeführten Sensoren liegen was die Messgenauigkeit betrifft im Bereich der Thermoelemente also etwas unter den Möglichkeiten die mit Widerstandsthermometern erreicht werden können. Die digitalen Sensoren sind jedoch ohne großen schaltungstechnischen Aufwand in die Systeme aufgrund der standardisierten I<sup>2</sup>C-Schnittstelle integrierbar.

### 13.1.2 Feuchtigkeit

Die Messung der Feuchtigkeit wird in die Luftfeuchtigkeits-, Bodenfeuchtigkeits- und die Betonfeuchtemessung unterteilt.

Zur Messung der Luftfeuchte können beispielsweise kapazitive oder Impedanzsensoren, auf Schwingquarzen basierende Sensoren oder weitere eingesetzt werden.

Kapazitive Feuchtigkeitssensoren besitzen einen ähnlichen Aufbau wie Plattenkondensatoren und basieren auf der Änderung der Kapazität des aufgetragenen, porösen Dielektrikums durch die unterschiedliche Dielektrizitätszahlen von feuchter und trockener Luft. Daraus resultiert in einem Schwingkreis eine Frequenzänderung mit der auf die Feuchtigkeitsänderung geschlossen werden kann. Bei dieser Art der Sensorik ist aufgrund von Alterungsvorgängen eine regelmäßige Prüfung mit Nachjustierung (3 Monate

-5 Jahre) bzw. ein Austausch (1 - 10 Jahre) unerlässlich [77].

Für den Einsatz am Sensorknoten sind kapazitive Sensoren mit integriertem Mikrocontroller aufgrund der einfachen Integrierbarkeit zu bevorzugen. Beispielhaft sind in **Tabelle 13.3** zwei energiesparende, integrierte Luftfeuchtesensoren aufgeführt.

**Tabelle 13.3** Integrierte Low-Power Luftfeuchtesensoren [89]

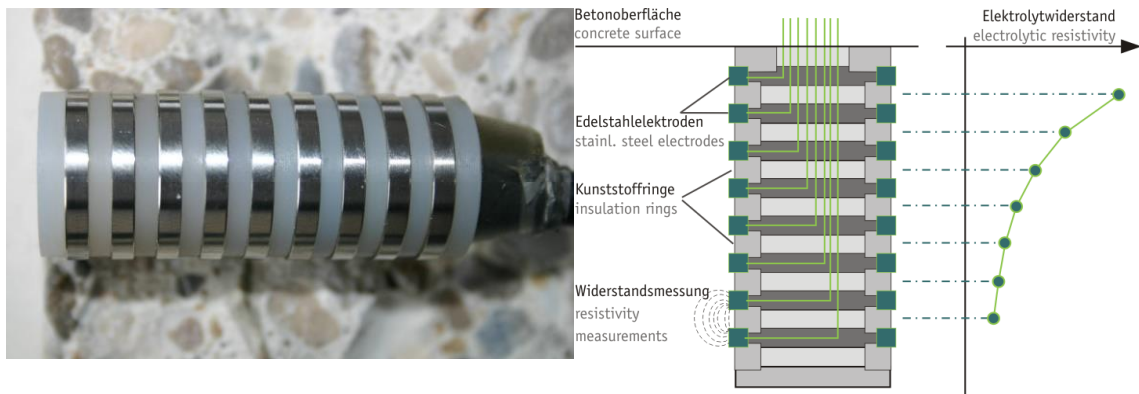
	Sensirion SHT21	Sensirion SHTC1
Ausgangssignal	Digital	Digital
Auflösung	8 / 12 Bit	-
Genauigkeit in %RH	2,5	3
Messbereich in %	0 bis 100	0 bis 100
Temperaturbereich in °C	-40 bis +125	-40 bis +125
Spannungsversorgung in V	2,1 bis 3,6	1,62 bis 2,16
<b>Strom in Ruhezustand in <math>\mu\text{A}</math></b>	<b><math>\sim 0,15 / 0,4 \text{ (max)}^4</math></b>	<b><math>\sim 0,7 / 2,2 \text{ (max)}</math></b>
<b>Aktiver Betriebsstrom in <math>\mu\text{A}</math></b>	<b>200 bis 330<sup>4</sup></b>	<b><math>\sim 385 / 465 \text{ (max)}</math></b>

Die Bodenfeuchte kann ebenfalls über kapazitive Sensoren erfasst werden die auf dem gleichen Prinzip basieren. Dabei ist eine Kalibrierung notwendig da die Bodenkapazität stark von der Bodenzusammensetzung abhängt. Bei den in [57] dargestellten Beispielen von Monitoring-Szenarien an Brückenbauwerken ist jedoch keine Bodenfeuchtemessung durchgeführt worden, daher wird im Folgenden nicht weiter darauf eingegangen.

Die Messung der Betonfeuchtigkeit gestaltet sich als ungleich schwieriger da nur indirekte Verfahren eingesetzt werden können [57]. Ein erprobtes Verfahren ist die Multiring-Elektrode. Dabei wird der Elektrolytwiderstand zwischen zwei benachbarten Edelstahlring-Elektroden bestimmt. Mit Hilfe einer Wechselstrom-Messung ergibt sich ein Widerstandsprofil das in ein Feuchtprofil umgerechnet werden kann. Beispielhaft ist eine Multiring-Elektrode und das Messprinzip in **Bild 13.1** dargestellt.

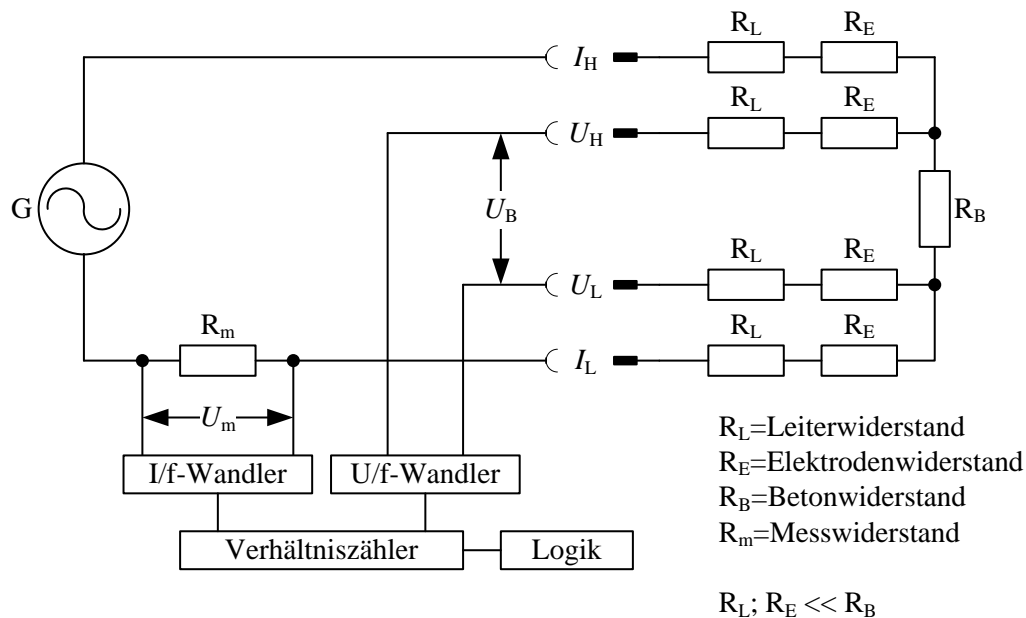
---

<sup>4</sup> Bei einer Auflösung von 8 Bit



**Bild 13.1** a) Multiring-Elektrode b) Messprinzip [58]

Zur Bewertung des Energiebedarfs wird im Folgenden das Messprinzip für die Erfassung des Elektrolytwiderstandes mit Hilfe von **Bild 5.2** dargestellt und erläutert.



**Bild 13.2** Messaufbau der Multiring-Elektrode [78]

An einem Wechselstromgenerator wird ein sinusförmiger Wechselstrom (max. 10 mA) mit einer Frequenz von 108 Hz erzeugt. Dieser Stromkreis schließt sich über einen Messwiderstand über die Leiter- und Elektrodenwiderstände und den Betonwiderstand. Der Messstrom ruft über dem Betonwiderstand einen Spannungsfall (max. 1 V) hervor, der, unter Vernachlässigung der Leiter- und Elektrodenwiderstände, direkt an den mittleren Klemmen gemessen werden kann. Diese Spannung wird gleichgerichtet und in eine proportionale Frequenz für die weitere Auswertung umgewandelt.

Über den definierten Messwiderstand wird der vom Generator erzeugte Strom gemessen und ebenfalls in eine proportionale Frequenz umgesetzt. In einem definierten Zeitinter-

vall wird über das Verhältnis der Impulse der beiden Frequenzen die Strom- und Spannungsmessern miteinander verknüpft und einer Logik übergeben. Abschließend kann aus diesem Verhältnis die Betonfeuchtigkeit abgeleitet und ausgegeben werden [78].

Für die benötigte Leistung bedeutet diese Systematik, dass eine maximale Generatorleistung von 10 mW ( $1\text{ V} \times 10\text{ mA}$ ) während eines Messintervalls benötigt wird. Die Länge des Messintervalls kann für eine Bestimmung der notwendigen Energie nur abgeschätzt werden. Zu dieser Leistung sind noch die Leistungen der U/f- und I/f-Wandler und des Verhältniszählers je Messintervall hinzu zuaddieren. Hinzukommt, dass dieser Vorgang für jeden eingebauten Abstand der Elektroden in der Betonoberfläche erneut auszuführen ist, sodass eine Umschaltung der Erzeugung und Auswertung auf die einzelnen Zuleitungen zu den Elektroden möglich sein muss. Dabei steigt der Energiebedarf, wenn wie in **Bild 13.1** von acht Edelstahlelektroden ausgegangen wird, auf den siebenfachen Wert.

Für die Auswertung sind sowohl Handauslesegeräte als auch eine automatische Messwerterfassung verfügbar. Für eine automatische Messwerterfassung der Multiring-Elektrode stehen spezielle Messknoten mit integriertem Mikrocontroller zur Verfügung (Camur II MRE Node). Das klassische Messkonzept sieht dabei vor alle eingebauten Messknoten mittels eines (Camur II) BUS, bestehend aus einer Stromversorgungsleitung und einem CAN-BUS-Kabel, mit einem Controller zu verbinden. Das notwendige CAN-BUS-Kabel stellt dabei eine autarke Versorgung der einzelnen Sensorknoten in Frage. Eine autarke Lösung wäre eine Funkübertragung des CAN-BUS mit einer Auswerteeinheit am Accesspoint. Dazu stehen „WLink Nodes“ zur Verfügung, von denen ein Master am Accesspoint und ein Slave am Sensorknoten installiert werden muss. Zum Aufbau des Netzwerkes am Messknotenpunkt ist dadurch zusätzlich eine Energieversorgung (Camur II FixVolt) notwendig.

Am Accesspoint ist zusätzlich zur Energieversorgung ein „Camur II Bus Interface“ erforderlich um den WLink Node einzubinden und per USB eine Verbindung zum Embedded PC herzustellen. Der notwendige Leistungsbedarf für die einzelnen Baugruppen ist in **Tabelle 13.4** dargestellt.



**Tabelle 13.4** Parameter eines Camur II Messsystems [59]

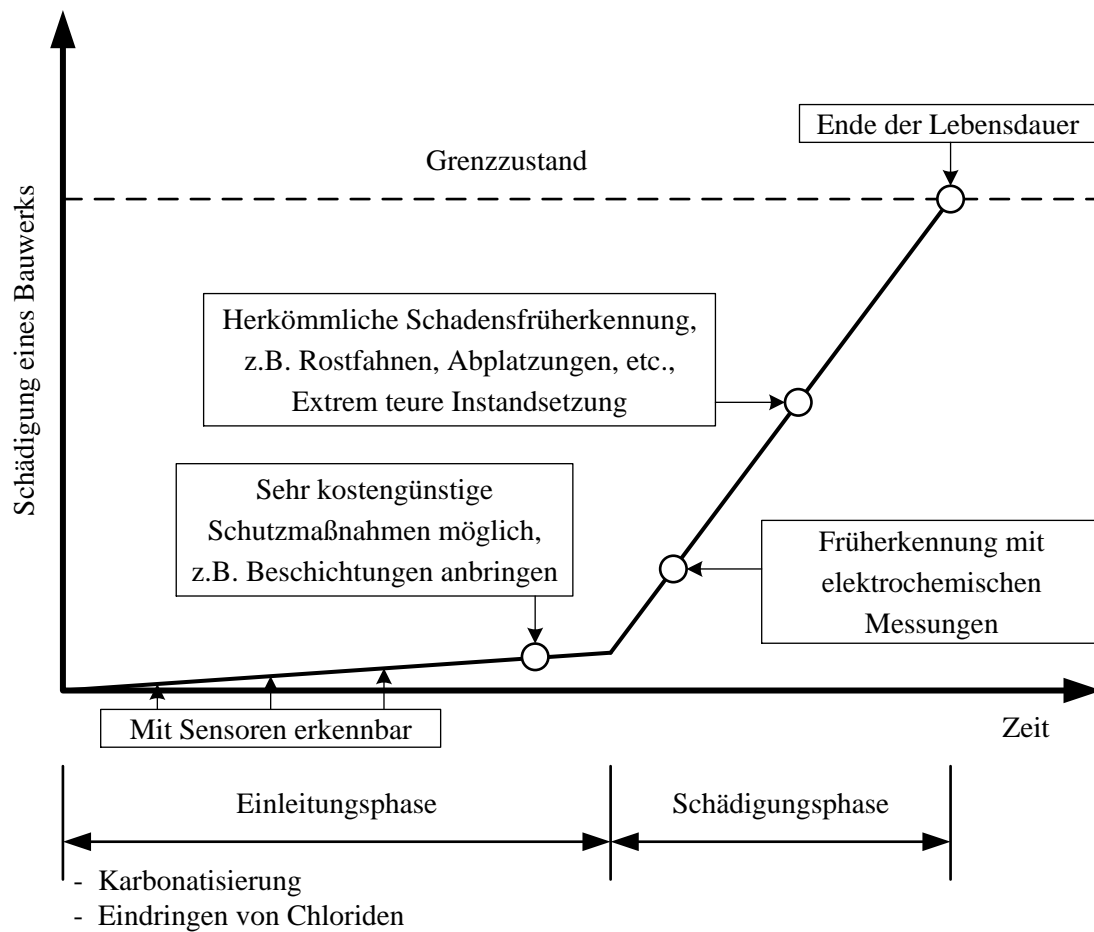
Sensorart	MRE Node	WLink Node	Bus Interface	Fix Volt
Einsatzort Accesspoint	Möglich	Ja	Ja	Ja
Einsatzort Messknoten	Ja	Ja	Nein	Ja
Versorgungsspannung	12 – 48 V	12 – 48 V	12 – 48 V	18 – 30 VAC 20 – 40 VDC
<b>Strom in mA @ 24 V</b>	<b>18</b>	<b>5 Standby 20 Transmit</b>		<b>150 - 7500</b>
Abmessungen in mm <sup>3</sup>	63 x 82 x 34	82 x 82 x 37	65 x 91 x 41	113 x 103 x 83

Bei der Betrachtung wird deutlich, dass der Leistungsbedarf der Messknoten die Erzeugung mittels der vorgestellten Energy Harvester überschreitet. Weiterhin ist das Messintervall zu beachten, das bei allen Messungen zur Bauteilfeuchte zwischen Tagen bis Monaten liegt [82]. Aufgrund dieser langsamen Schädigungsvorgänge und des hohen Energiebedarfs der Messungen ist eine autarke Versorgung der Messknoten nicht die Methodik der Wahl. Einfacher ist ausgehend vom Accesspoint eine Anbindung der Messknoten mittels eines BUS-Systems. Der erhöhte Energiebedarf am Accesspoint ist mit deutlich geringem Aufwand bereitstellbar.

Ein zusätzlicher Vorteil dieses Systems ist die leichte Einbindung von Anodenleitern bzw. Bohrkernanoden die zur Korrosionsmessung (siehe Abschnitt 13.1.3) eingesetzt werden. Für diese Messsysteme sind ebenfalls Knoten zum Anschluss an das Camur II System vorhanden.

### 13.1.3 Korrosion

Bei der Problematik von Korrosion sind grundsätzlich Stahl- und Stahlbetonbrücken zu unterscheiden. Bei Stahlbrücken kann die Korrosion mittels einer visuellen Prüfung relativ leicht und früh erkannt und somit behoben werden. Bei Stahlbetonbauwerken ist eine visuelle Schädigung, wie **Bild 13.3** zeigt, erst bei weitem Fortschritt der Korrosion zu erkennen.



**Bild 13.3** Schädigungsverlauf an Stahlbetonbauwerken [63]

Wie **Bild 13.3** darstellt sind Sensoren und elektrochemische Messungen für eine Früherkennung vorhanden. Dabei ist für die elektrochemische Messung vor allem die Bestimmung des pH-Wertes zu nennen. Jedoch ist die universelle Einsetzbarkeit des Messverfahrens zur pH-Wert-Bestimmung aufgrund verschiedener Limitationen wie Zuverlässigkeit, Dauerhaftigkeit, etc. stark eingeschränkt [57].

Der chloridinduzierten Korrosion werden 66 Prozent aller Schäden an Brückenbauwerken im deutschen Autobahnnetz zugeordnet [78]. Wie **Bild 13.3** zeigt, ist das Eindringen von Chloriden ein Faktor der die Depassivierung und damit die Korrosion von Stahlbetonbauwerken bestimmt. Mittels Monitoring des Chloridgehalts lassen sich zuverlässige Aussagen über das Korrosionsrisiko der Stahlbewehrung treffen [80]. Daher bieten Chloridsensoren für eine Früherkennung ein großes Potential.

Bei der Chloridverteilung im Beton kann es zu stark ausgeprägten lokalen Minima und Maxima kommen, sodass Punktsensoren zu falschen Rückschlüssen führen können. Da lediglich Punktsensoren zur Verfügung stehen ist eine dauerhafte Überwachung schwer zu realisieren und gegebenenfalls nachträglich, für besonders gefährdete Stellen, als

Ergänzung zu herkömmlichen Methoden einsetzbar [80].

Ein volumenaufgelöstes Messverfahren könnte diese Punktabhängigkeit lösen, ein entsprechendes Sensorsystem ist jedoch nicht verfügbar. Die meisten Verfahren sind zerstörende Messverfahren die Labortest benötigen, jedoch genaue Ergebnisse liefern. Ein neuer elektrochemischer Ansatz verwendet eine Silber-Silberchlorid-Elektrode die dauerhaft in den Beton eingebracht werden kann. Dabei wird das elektrische Potential gegen eine Referenzelektrode aus z. B. aus Manganoxid  $\text{MnO}_2$  bestimmt. Die Messung des Potentials ist mit Hilfe eines A/D-Wandlers ggf. mit einer notwendigen Verstärkung möglich. Die Lebensdauer eines solchen Systems wird aktuell noch von der Lebensdauer der Referenzelektroden stark begrenzt [83]. Zusätzlich treten weitere Alterungseffekte auf, die zu einem relevanten Drift in den Messergebnissen führen [80]. Da es sich bei der Messung um den aktuellen Stand der Forschung handelt sind weitere Entwicklungen notwendig. Perspektivisch ist ein Einsatz der Ag/AgCl-Elektrode am autarken Messknoten aufgrund des geringen Leistungsbedarfs jedoch möglich.

Eine direkte Korrosionsmessung kann mit Hilfe einer Widerstandsmessung, einer Potentialmessung oder einer Korrosionsstrommessung durchgeführt werden. Auf letzte wird im Folgenden vertieft eingegangen. Als auf dem Markt verfügbare Sensoren sind für die Korrosionsstrommessung der Anodenleiter für Neubauprojekte und die Spreizringanode für den nachträglichen Einbau zu nennen. Die Spreizringanode wird bei bestehenden Bauwerken in ein Bohrloch (nicht horizontal) eingesetzt und gegen die Bohrlochwandung gespreizt. Die Korrosion der sechs ringförmigen Einzelanoden ist durch Messung des Korrosionspotentials und des Korrosionsstroms gegen die Titanischoxid-Kathode messbar, die in ein separates Bohrloch eingesetzt wird [60]. Der Anodenleiter basiert auf dem gleichen Messprinzip ist jedoch robuster und redundant aufgebaut um Anforderungen während des Baus standzuhalten und so ein Langzeitmonitoring zu gewährleisten.



**Bild 13.4** a) Spreizanode mit Spreizvorrichtung b) Anodenleiter

Für den Einsatz in einem Energy Harvesting System sind beide nicht optimiert. Bei der Auslesung wird eine Erfassung mit einem Handgerät empfohlen, da zuverlässige Aussagen über die Korrosion bei einer bis vier Messungen im Jahr möglich sind. Dabei sind nur Langzeiteffekte entscheidend da kurzzeitige Schwankungen eine untergeordnete Bedeutung besitzen [60], [63].

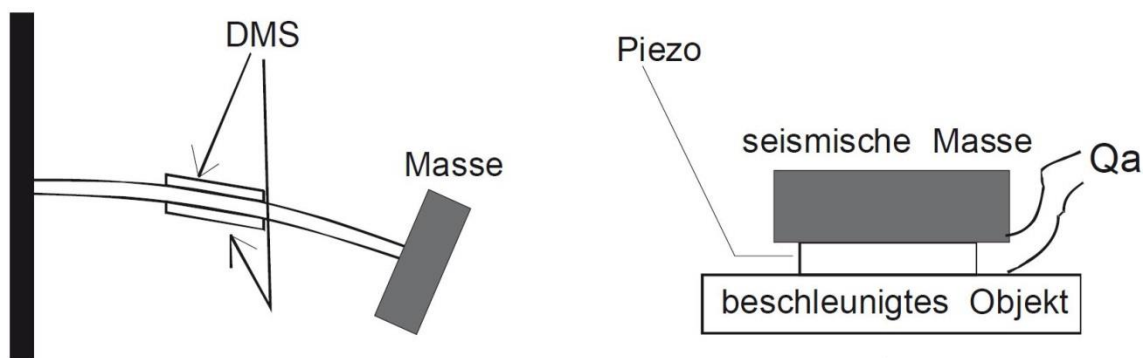
Bei der Messung sind 22 Einzelmessungen durchzuführen. 8 Spannungsmessungen, 7 Strommessungen, 1 Temperaturmessung am eingebauten PT 1000 sowie 6 Impedanzmessungen [62]. Für die Umschaltung zwischen den Messungen sind Multiplexer notwendig. Die Spannungsmessungen und Strommessungen können mit A/D-Wandlern durchgeführt werden. Die Impedanzmessungen können mit Hilfe von Impedanz-Convertern ausgeführt werden.

Für den Aufbau von Monitoring-Systemen sind ebenfalls Lösungen für eine automatische Messwerterfassung vorhanden. Wie schon die Multiringelektrode kann auch der Anodenleiter mittels eines speziellen Knotens an das Camur II BUS-System angeschlossen werden. Für die Versorgung des Knotens ist eine Spannung von 12 bis 48 V erforderlich bei einem konstanten Nennstrom von 18 mA (bei 24 V).

#### 13.1.4 Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsgrößen

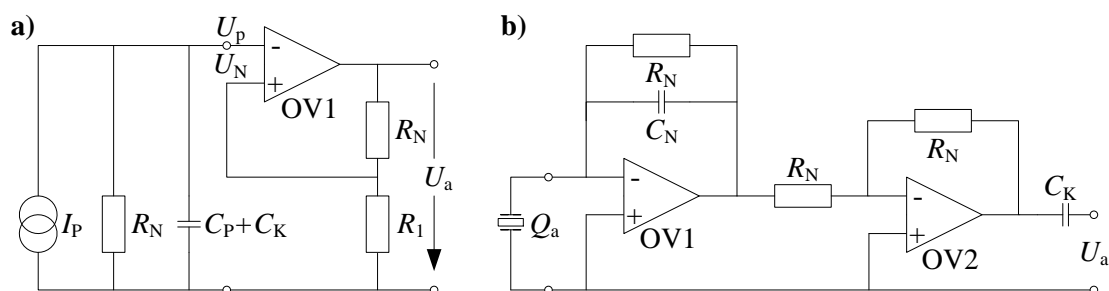
Mit Hilfe von Beschleunigungssensoren ist es möglich eine Frequenzanalyse eines Brückenbauwerks durchzuführen und damit durch Veränderungen des Spektrums auf Fehler der Bauwerksstruktur zu schließen. Für diese Analyse sind jedoch zusätzlich die Temperatur und die Bauteilfeuchte zu messen da diese Einfluss auf das Ergebnis besitzen.

Das Grundprinzip der linearen Beschleunigungsmessung ist in **Bild 5.5** dargestellt.



**Bild 13.5** Grundaufbau von Beschleunigungssensoren [77]

Bei einer Beschleunigung oder Vibration wird eine Masse ausgelenkt. Diese Auslenkung wird mit Hilfe eines Sensors aufgenommen. Dabei können, wie in **Bild 13.5** gezeigt wird, verschiedene Arten von Sensoren eingesetzt werden. Piezo-Sensoren haben im Gegensatz zu den anderen Sensoren den großen Vorteil, dass sie keine externe Energieversorgung benötigen. Über Ladungs-Spannungswandler können die Ladungssignale der Piezo-Sensoren ausgelesen werden. Die eingesetzten Verstärkerschaltungen sind die Elektrometer- oder die Ladungsverstärkerschaltung.



**Bild 13.6** a) Elektrometerverstärker b) Ladungsverstärker [90]

Der Nachteil von Piezo-Sensoren mit Ladungsausgang ist die Störempfindlichkeit. Bei der Übertragung zum Ladungsverstärker sind kurze und spezielle störarme Sensorkabel erforderlich. Daher besitzen viele Sensoren intern eine Verstärkerschaltung die das über dem Piezo-Generator erzeugte Ladungssignal in ein nutzbares Spannungssignal umwandeln. Diese Piezo-elektrischen Sensoren benötigen somit ebenfalls einen Versorgungsspannung die beim herstellerübergreifenden Integrated Electronics Piezo-Electric-Standard (IEPE) zwischen 24 und 30 V liegt. Für die Übertragung wird ein Konstantstrom von 2 - 20 mA angewendet, der somit zu einem hohen Leistungsbedarf von Piezo-Sensoren mit Spannungsausgang führt. In **Tabelle 13.5** sind zwei Piezo-elektrische Sensoren für Bauwerksuntersuchungen bei tiefen Frequenzen dargestellt.

**Tabelle 13.5** Piezo-elektrische Beschleunigungssensoren [91]

	Metra KB12	Metra KB12VD
Technologie	Piezo-elektrisch	Piezo-elektisch
Ausgangssignal	Landung	Spannung
Empfindlichkeit	6500 pC/g	10.000 mV/g
Messbereich in g	± 3	± 0,6
Genauigkeit in %	± 20	± 10, ± 2
Temperaturbereich in °C	-20 bis +80	-20 bis +80
Spannungsversorgung in V	Nicht erforderlich	12 bis 14
<b>Strom im Standby in µA</b>	<b>Abhängig vom eingesetzten Ladungs-Spannungswandler</b>	
<b>Aktiver Betriebsstrom in µA</b>	<b>Abhängig vom eingesetzten Ladungs-Spannungswandler</b>	<b>2000 bis 20.000</b>

Für den Einsatz im energieautarken Sensorknoten sind integrierte Beschleunigungssensoren aufgrund des niedrigen Energiebedarfs ebenfalls einsetzbar. Beispielhaft sind in der **Tabelle 13.6** zwei energiearme Beschleunigungssensoren dargestellt.

**Tabelle 13.6** Integrierte Beschleunigungssensoren [92], [93]

	Analog Devices ADXL362	Kionix KXCNL
Technologie	MEMS	MEMS
Ausgangssignal	Digital	Digital
Auflösung	8 / 12 Bit	8 / 12 Bit
Messbereich in g	±2 / ±4 / ±8	±2 / ±4 / ±6 / ±8
Genauigkeit in mg/LSB	1 bis 4	1 bis 4
Temperaturbereich in °C	-40 bis +85	-40 bis +85
Spannungsversorgung in V	1,6 bis 3,5	1,7 bis 3,6
<b>Strom im Standby in µA</b>	<b>~0,01 / 0,27 (Wake-Up)</b>	<b>8 / 2 (Off-mode)</b>
<b>Aktiver Betriebsstrom in µA</b>	<b>~1,8 / 13 (max.)</b>	<b>50 (max.)</b>

Der Vergleich zwischen den Piezo-elektrischen und den integrierten Beschleunigungs-

sensoren zeigt den großen Unterschied im Leistungsbedarf dieser Technologien. Piezoelektrische Sensoren mit Ladungsausgang benötigen im Standby betrieb zwar keine Leistung, für die Ladungsverstärkung im aktiven Betriebsmodus liegt der Leistungsbedarf jedoch nahe den Leistungsbereichen von Sensoren mit Spannungsausgang und damit deutlich über denen von integrierten Beschleunigungssensoren.

Die Dauer der Messungen ist für den Energiebedarf ebenfalls von entscheidender Bedeutung. Dabei ist für die Beschleunigungsmessung bei stochastischen Auswertungen aufgrund der niedrigen Frequenzen eine minimale, zusammenhängende Messzeit von 15 bis 20 Minuten pro Analyse genannt [54]. Daher ist hier ein sehr niedriger Leistungsbedarf der Sensorik erforderlich.

### **13.1.5 Weg-, Verzerrungs- und Winkelgrößen**

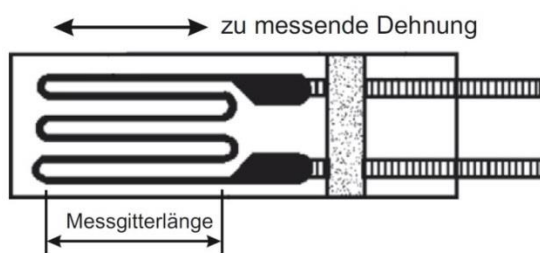
Verformungsbasiertes Monitoring kann eine direkt Schädigungsidentifizierung des Tragwerks ermöglichen und hat daher eine besondere Bedeutung beim Langzeitmonitoring [64].

Die Messung von Weggrößen kann in Abhängigkeit der Aufgabenstellung und des Messbereichs von Wegaufnehmern, Lasersensoren, elektronischen Schlauchwaagen, Schwingsaitenaufnehmern, Seilzugsensoren oder trigonometrischen Nivellements durchgeführt werden [53]. Aufgrund der Robustheit werden Wegaufnehmer beim Einsatz im Freien bei kleinen Weglängen wirtschaftlich eingesetzt. Lasersensoren und Schwingsaitenaufnehmer besitzen einen relativ hohen Strombedarf, trigonometrischen Nivellements sind sehr teuer und werden daher nicht weiter betrachtet [53], [64]. Schlauchwaagensysteme basieren auf der Messung der Druckänderung aufgrund von Höhenänderungen gegenüber einem Bezugspunkt. Dabei sind die einzelnen Sensoren mit Schlauchverbindungen für ein flüssiges Medium und eine Entlüftung in Reihe verbunden. Aufgrund der Verlegung dieser Schläuche ist eine autarke Energieversorgung der einzelnen Sensorknoten nicht plausibel. Beispielhaft sind in der folgenden Tabelle Sensoren für ein Monitoring von Weggrößen aufgeführt.

**Tabelle 13.7** Sensoren für Wegmesssysteme [94], [95]

	a.b.jödöden SM27	Glötzl GHD3
	Wegaufnehmer Automatisierungstechnik	Schlauchwaagensystem : Sensor
Ausgangssignal	Analog, wegproportional (0 bis 4 V)	Digital
Auflösung	-	16 Bit
Messbereich in mm	5 bis 20	200 / 500 / 900
Genauigkeit in %	<0,25 / <0,5	
Temperaturbereich in °C	-20 bis +85	-20 bis 80
Spannungsversorgung in V	4,5 bis 5,5	18 bis 36V
<b>Strom im Sleepmode in mA</b>	-	-
<b>Aktiver Betriebsstrom in mA</b>	< 5	<b>35 (max)</b>

Für die Messung von Verzerrungsgrößen werden Dehnungsmesstreifen (DMS) oder faseroptische Dehnungssensoren eingesetzt. Bei Dehnungsmesstreifen ändert sich der elektrische Widerstand in Abhängigkeit der Dehnung. Diese Widerstandsänderung kann mit Hilfe von Messschaltungen z.B. einer Wheatstoneschen Messbrücke erfasst werden. Der prinzipielle Aufbau ist in **Bild 13.7** dargestellt.

**Bild 13.7** Aufbauskinne eines DMS [77]

Für den Einbau bei der Konstruktion des Bauwerks sind DMS zum Einbetonieren in Beton vorhanden. Für den nachträglichen Einbau sind DMS beispielsweise zum Aufkleben oder mittels Befestigungen auf/am Beton erhältlich. Beim Aufkleben wird der Messstreifen direkt am Messobjekt angebracht, was eine sorgsame Auswahl auch unter Beachtung der Robustheit notwendig macht. Beim Einbetonieren werden aufgrund der Belastungen während des Baus besonders robuste DMS eingesetzt.



Bild entfernt - Bildrechte nicht geklärt

**Bild 13.8** a) DMS aufgeklebt auf Beton, b) einbetonierbare DMS, c) Skizze Einbetonierung [96]

Beim Anschluss der Sensoren bestehen jedoch Unterschiede. Während die Sensoren zum Aufkleben als  $120\ \Omega$  Viertelbrücke ausgeführt werden sind die Sensoren zum Einbetonieren als  $350\ \Omega$  Vollbrücke ausgeführt. Optional kann mit einer Umschaltung durch einen Multiplexer noch eine Temperaturmessung gegen einen Bezugspunkt durchgeführt werden.

Der Leistungsbedarf der jeweiligen Brückenschaltungen hängt von der Brückenspeisespannung ab. Diese liegt üblicherweise im Bereich von 2 - 5 V, kann jedoch z. B. bei niederohmigen DMS oder beim Aufbringen auf einen schlecht wärmeleitendes Material aufgrund der Verlustleistung auch niedriger ausfallen. Die Leistung für die Vollbrücke bestimmt sich mit Hilfe folgender Formel:

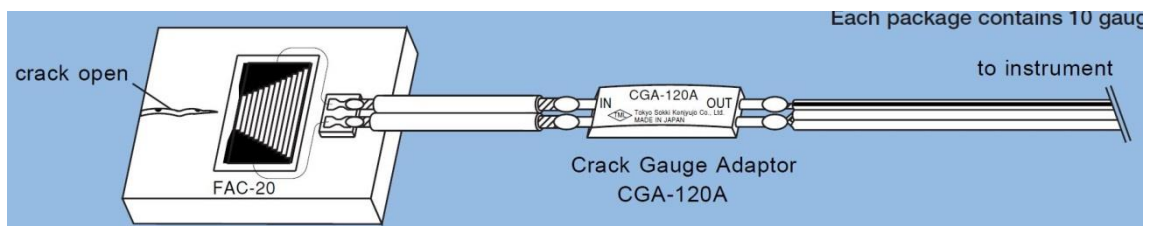
$$\text{-----} \tag{13.1}$$

Mit Hilfe von Formel (13.1) wird deutlich, dass mit steigender Speisespannung der Leistungsbedarf der Brückenschaltung quadratisch ansteigt. Eine zu niedrige Speisespannung hat jedoch negative Auswirkungen auf die Genauigkeit und die Auflösung, sodass ein Kompromiss gefunden werden muss. Für den Einsatz von DMS im Energy Harvesting Bereich sollte zusätzlich große Widerstände eingesetzt werden um den Ruhestrom bzw. Messstrom so gering wie möglich zu halten und somit einen geringen Leistungsbedarf zu ermöglichen. Bei Vollbrücken sind alle Widerstände vorgegeben, bei Halb- bzw. Viertelbrücken können Sie jedoch, in gewissen Grenzen, frei gewählt werden. Für die oben genannte Vollbrücke wird eine Speisespannung von 2 V empfohlen, sodass sich nach Formel (13.1) ein Leistungsbedarf von **11,4 mW** ergibt. Bei Auslegung der Viertelbrücke mit weiteren  $120\ \Omega$  Widerständen ergibt sich hingegen bereits

eine Leistung von **33,3 mW** (@ 2 V).

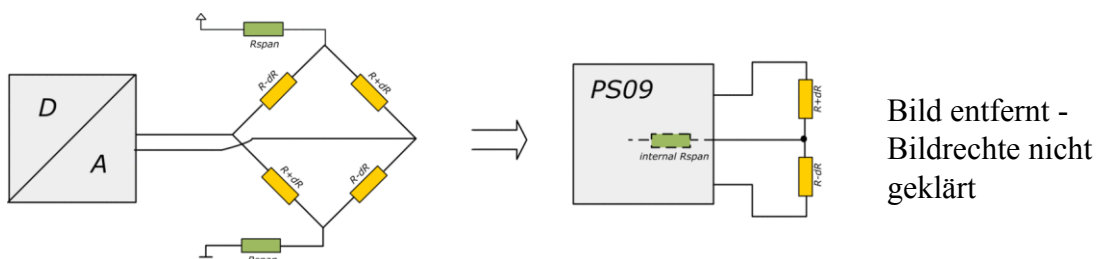
Die Ausgangsspannung besitzt bei allen Schaltungen einen linearen Zusammenhang zur Eingangsspannung, sodass die Eingangsspannung sehr stabil gehalten werden muss. Dieses wird im Allgemeinen von einem Verstärker übernommen der zusätzlich das Ausgangssignal auf eine für den A/D-Wandler angepasste Größe verstärkt. Der Zeitraum der Messung der zur Bestimmung des Energiebedarfs notwendig ist wird von der Geschwindigkeit des A/D-Wandlers bestimmt.

Weiterhin sind zur Überwachung von entstandenen Rissen, wie in **Bild 13.9** zu sehen, spezielle Riss-DMS vorhanden. Diese DMS werden nach Sichtprüfung nachträglich auf sich ausbildenden Rissen aufgebracht. Bei Vergrößerung des Risses wird alle 0,5 mm jeweils einer der 41 Stege des Messstreifens durchtrennt. Mit Hilfe einer Widerstandsmessung wird die Widerstandsänderung aufgenommen wodurch Rückschlüsse auf den Rissfortschritt gezogen werden. Mit Hilfe eines Adapters kann der Riss-DMS wie eine normale Viertelbrücke eingesetzt werden. Der Widerstand des DMS wird dabei von  $1 \Omega$  auf  $120 \Omega$  transformiert, sodass der Energiebedarf sinkt.



**Bild 13.9** Riss-DMS [96]

Die Firma Acam bietet als Alternative zur klassischen Brückenschaltung eine energiearme Lösung zur Auswertung von DMS an. Dabei wird die Dehnung über Entladezeiten eines Kondensators, die durch einen Time-Digital-Converter aufgenommen werden, bestimmt.



**Bild 13.10** Vergleich der Schaltungstechnik: Vollbrücke und PicoStrain [97]

Dabei ist der Anschluss von Halb-, Vollbrücken und weiteren DMS-Sensorschaltungen möglich. Ein weiterer Vorteil ist die einfache Integration durch die I<sup>2</sup>C-Schnittstelle.

Die Leistungs-Parameter des in **Bild 13.10** dargestellten PS09 werden in **Tabelle 13.8** dargestellt.

Dehnungsmesstreifen sind Punktsensoren. Daher sind individuell an die Brückenkonstruktion angepasste neuralgische Punkte zur Überwachung auszuwählen bzw. bei Riss-DMS erst nach Schadenseintritt und visueller Erkennung ein Auswahl des Standortes möglich. Ein volumenaufgelöstes Messverfahren für die Dehnung ist mit intrinsischen faseroptischen Messverfahren möglich.

Faseroptische Dehnungssensoren bzw. faseroptische Messmethoden können grundsätzlich in extrinsische und intrinsische Messverfahren unterteilt werden. Bei extrinsischen Verfahren ist der eingesetzte Lichtwellenleiter (LWL) nur die Verbindung zum Sensor, während bei intrinsischen Systemen der LWL selbst als Sensor genutzt wird. Bei beiden Verfahren ist jedoch eine zentrale Auswerteeinheit erforderlich die mit dem Sensor verbunden ist. Aufgrund des hohen Energiebedarfs der Auswerteeinheit ist dabei nur eine zentrale Aufstellung am Accesspoint möglich. Ein Vorteil eines faseroptischen Systems ist, dass neben der Dehnung auch die Verformung, die Temperatur, die Betonfeuchtigkeit und nach aktuellem Forschungsstand auch die ph-Wert-Bestimmung und Chlorsensoren implementiert werden könnten. Ein Vergleich der vorgestellten Messsysteme für Verzerrungsgrößen ist in **Tabelle 13.8** dargestellt.

**Tabelle 13.8** Messsysteme und Sensoren für Verzerrungsgrößen [96][97][98]

	Preusser Messtechnik FLM / WFLM Viertelbrücke	Preusser Messtechnik KM Vollbrücke	Acam PicoStrain PS09	FiberSensing BraggMETER FS2100
	DMS Aufkleben an Beton	DMS Einbetonierbar	DMS	Faseroptisches Sensorsystem: Auswerteeinheit
Ausgangssignal	Analog	Analog	Digital	Digital
Auflösung	Abhängig von Speisespannung, Verstärkung und A/D-Wandler	Abhängig von Speisespannung, Verstärkung und A/D-Wandler	26 Bit	-
Messbereich in $\mu\text{m}/\text{m}$	100.000	5.000	-	-
Temperaturbereich in $^{\circ}\text{C}$	-20 bis + 80	-20 bis + 80	-40 bis 125	0 bis 40
Spannungsversorgung in V	Typ. 2 bis 5 kleiner möglich	Typ. 2 bis 5 kleiner möglich	2,1 bis 3,6V	9 bis 36V
<b>Strom im Sleepmode in mA</b>	-	-	<b>0,002</b>	<b>62,5<sup>5</sup> @ 24 V</b>
<b>Aktiver Betriebsstrom in mA</b>	<b>16 bis 42 kleiner möglich +Verstärkung +A/D Wandlung</b>	<b>6 bis 14 kleiner möglich +Verstärkung +A/D Wandlung</b>	<b>0,007 @ low current config. / 0,39 (max. speed)</b>	<b>1666<sup>5</sup> @ 24 V</b>

Zur Bestimmung von Winkelgrößen werden Inklinometer, auch Neigungs- bzw. Winkelsensoren genannt, eingesetzt. Die gängigen Sensoren sind Servo-Inclinometer, MEMS-, elektrolytische Neigungs-, magnetoresistive Neigungs- und Kompassensoren deren Einsatz von der benötigten Genauigkeit, der Auflösung, der Wiederholbarkeit, der Temperaturabhängigkeit, der Erschütterungsfestigkeit und vom Preis abhängt [77]. Dabei wird häufig das Prinzip der Schwerkraftverschiebung genutzt, sodass sie als Beschleunigungssensoren mit sehr hoher Dämpfung angesehen werden können. Durch diese Konstruktion ist wie bei Beschleunigungssensoren ein Aufbau in MEMS-Technologie mit den bekannten Energieeinsparungen möglich.

---

<sup>5</sup> Leistung im Sleepmode: 1,5 W; Nennleistung: 40 W

**Tabelle 13.9** Sensorik für Winkelgrößen [99], [100]

	Balluff BSI0002	muRata SCA830-D07
	Neigungssensor	Inklinometer MEMS
Ausgangssignal	Analog	Digital
Auflösung	0,01°	16 Bit
Messbereich in °	-45 bis +45	-90 bis + 90
Genauigkeit in %	0,1°	-
Temperaturbereich in °C	-40 bis 85	-10 bis +125
Spannungsversorgung in V	3 bis 10	3,0 bis 3,6
<b>Strom im Sleepmode in mA</b>	-	<b>0,1</b>
<b>Aktiver Betriebsstrom in mA</b>	<b>&lt; 33</b>	<b>~5 / 6,3 (max)</b>

### 13.1.6 Bewertung des Einsatzes von Sensorik für autarke Einsatzgebiete

Im folgenden Abschnitt wird die in den vorherigen Abschnitten vorgestellte Sensorik auf ihren möglichen Einsatz am Sensorknoten hin bewertet. Dabei ist eine Unterscheidung hinsichtlich des Versorgungskonzeptes zu treffen. Die Unterscheidungen sind:

- Einsatzbereich am energieautarken Sensorknoten ohne Einschränkungen: **V1**
- Einsatzbereich am energieautarken Sensorknoten mit Einschränkungen: **V2**
- Energieversorgung durch kabelgebundene Verbindung zum Accesspoint: **V3**

Als Einschränkungen in Versorgungskonzept V2 könnten beispielsweise der Einsatz an einem Knoten mit mehreren Sensoren betrachtet werden oder ein hoher Wert beim Messintervall. D. h. für die Versorgung der Sensoren mit Versorgungskonzept V2 sind größere Dimensionierungen für die im folgenden Kapitel vorgestellten Energy Harvester notwendig.

**Tabelle 13.10** Einteilung der Sensorik nach Versorgungskonzept

Parameter		Sensoren	Energiebedarf	Messhäufigkeit	Konzept
Temperatur		Thermoelement	Mittel	Mittel	V2
		Widerstands-thermometer	Mittel	Mittel	V2
		MEMS	Sehr gering	Mittel	V1
Feuchte	Luftfeuchte	Integrierter Sensor	Sehr gering	Mittel	V1
	Materialfeuchte	Multi-Ring-Elektrode	Hoch	Sehr Selten	V1
Korrosion	Chlorid-Sensoren	Ag/AgCl	Mittel	Sehr Selten	V1
	Korrosionsstrom-messung	Anodenleiter Spreizringanode	Hoch	Sehr Selten	V1
Beschleunigung		Piezo-elektrisch Spannungsausgang	Mittel	Sehr Häufig	V3
		Piezo-elektrisch Ladungsausgang	Mittel	Sehr Häufig	V3
		MEMS	Sehr gering	Sehr Häufig	V2
Weggröße		Wegaufnehmer	Mittel	Nach Bedarf	V1 - V2
		Schlauchwaagensysteme	Hoch	Nach Bedarf	V3
Verzerrungsgröße		DMS Messbrücke	Mittel	Mittel	V1
		DMS Entladekurve	gering	Sehr Häufig	V2
		Faseroptisch	Sehr hoch	Sehr Häufig	V3
Rissentwicklung		Riss-DMS	Mittel	Mittel	V1
				Sehr Häufig	V2 - V3
Neigung		Inklinometer	Mittel	Häufig	V2
		MEMS	Gering - Mittel	Sehr Häufig	V2

## 13.2 Mikrocontroller

Der Mikrocontroller ist die zentrale Einheit im Energy Harvesting System und daher von entscheidender Bedeutung. Dabei werden Mikrocontroller mit Low-Power-Architekturen eingesetzt die sehr geringe Ströme im Sleepmodus und sehr schnelle Auf-

wachzeiten besitzen. Das Prinzip ist den Mikrocontroller so oft und so lang wie möglich im Sleepmodus zu betreiben und nur ereignisbasiert oder zu festen Zeitpunkten aufzuwecken.

Des Weiteren sind für Anwendungen im Energy Harvesting Ausstattungsmerkmale wie AD-Wandler, digitale Schnittstellen, Speichertechnologien, integrierte Ladestrategien usw. erforderlich. Auch Mikrocontroller mit integriertem Transmitter haben aufgrund ihrer Kompaktheit ein Einsatzpotential.

### 13.2.1 Low Power Architektur

Mikroprozessoren haben sich schon früh in ihrer Entwicklung in die jeweiligen Einsatzgebiete wie PC oder Mikrocontroller aufgeteilt. Der Einsatz von Mikrocontrollern im Bereich des Energy Harvestings unterscheidet sich zu konventionellen Anwendungen insoweit, dass bei vielen Anwendungen versucht wird Aufgaben immer schneller lösen zu können. Wie bereits erwähnt, ist das Ziel beim Energy Harvesting so energieeffizient und wenig wie möglich zu arbeiten. Für den Vergleich einzelner Mikrocontrollerarchitekturen in Bezug auf die Energieeffizienz sind jedoch Standards erforderlich, die eine verlässliche Beurteilung ermöglichen. Diese sind aktuell nicht vorhanden, sodass ein Vergleich diffizil ist [46].

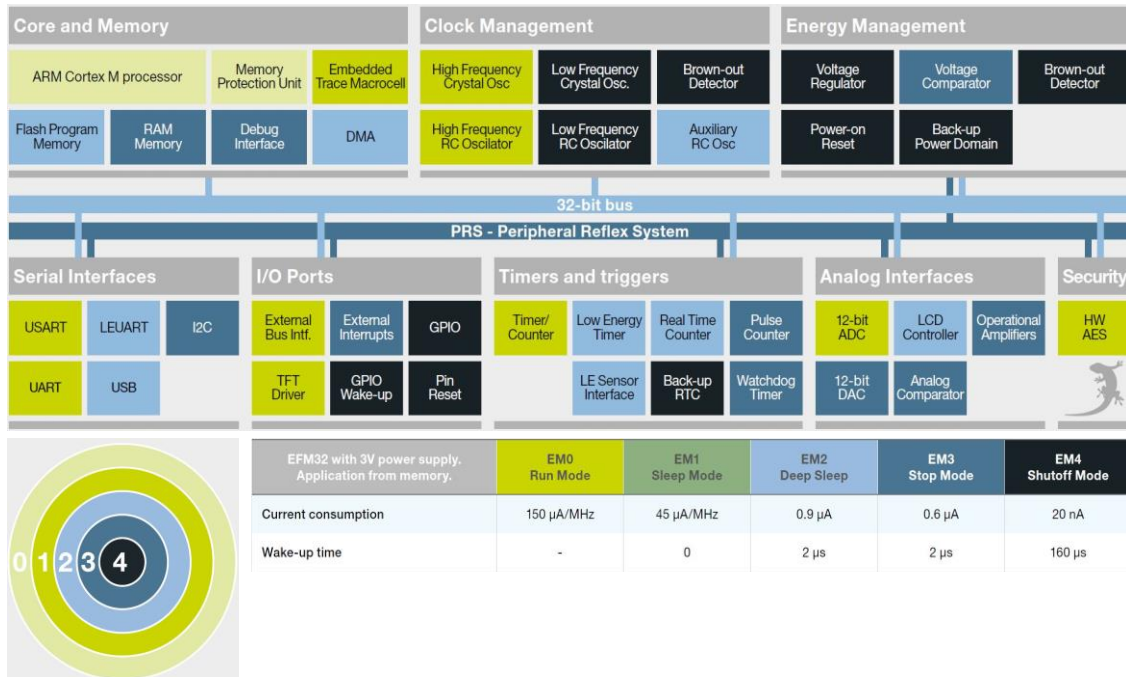
Mikrocontroller(-familien) die sich für den Einsatz besonders eignen sind die PIC-Mikrocontroller von Microchip, MSP-Mikrocontroller von Texas Instruments, AVR-Mikrocontroller von Atmel, sowie die 8051-Mikrocontroller von diversen Herstellern als auch Mikrocontroller mit ARM-Architektur [46]. Dabei ist die 8051-Familie als Urvater der Mikrocontroller als Beispiel zu nennen, in dem gar keine explizite Energiesparvorrichtungen vorhanden sind, sondern das Prinzip einfach darauf beruht, dass der Mikrocontroller nur kurz eingeschaltet und danach nicht in Sleep- oder sonstige Energiesparmodi versetzt, sondern einfach abgeschaltet wird. Hierfür ist dann vor allem eine schnelle Startzeit entscheidend. Für den Langzeiteinsatz, wie beim Monitoring, ist die Second Source<sup>6</sup> Problematik ebenfalls ein Kriterium die den Ausschlag hinsichtlich etablierter Mikrocontroller-Familien geben könnte.

Als Beispiel für eine energiearme Architektur kann die Gecko-Serie der Firma Energy

---

<sup>6</sup> Mit dem Begriff Second Source (engl. Für Zweitlieferant) werden in der Materialwirtschaft und der Produktionswirtschaft eine oder mehrere alternative Lieferanten für ein Produkt bezeichnet, welches baugleich und kompatibel zu einem anderen Produkt ist.

Micro (übernommen von Silicon Labs) genannt werden, die auf dem Cortex-M ARM-Mikrocontroller basiert. Der Aufbau des Mikrocontrollers soll mit Hilfe des **Bild 13.11** dargestellt werden.



**Bild 13.11** Aufbau des EMF32-Mikrocontrollers [66]

**Bild 6.1** zeigt den Aufbau des Mikrocontrollers, dabei sind die fünf verschiedenen Betriebsmodi farblich dargestellt. Es ist zu sehen, dass in Abhängigkeit des Modus die unterschiedlichen Anwendungen hinzu bzw. abgeschaltet werden und somit der Energiebedarf deutliche Unterschiede aufweist.

Eine weitere interessante Applikation ist die Möglichkeit direkt am Sensorknoten die Daten auszuwerten was Vorteile bei der Datenspeicherung und Datenübertragung bietet. Der MSP430FR5969 „Wolverine“ von Texas Instruments bietet die Möglichkeit eine Fast Fourier Transformation (FFT) direkt im Sensorknoten auszuführen. Der Mikrocontroller bietet ebenfalls verschiedene energiesparende Betriebsmodi an. Daher gilt es zu überprüfen, ob eine FFT am Sensorknoten mit den Einsparungen die dadurch entstehen, insgesamt energiesparender ist, als die Übertragung der gesamten Daten ohne vorherige Auswertung.

Eine weitere Möglichkeit Energie zu sparen ist ein integrierter Transmitter im Mikrocontroller, sodass nur ein Chip benötigt wird. Beispielsweise ist die CC430-Reihe von Texas Instruments als diese kompakte Lösung ausgeführt. Dabei ist jedoch der Funkstandard der mit diesen Controllern möglich ist zu beachten.

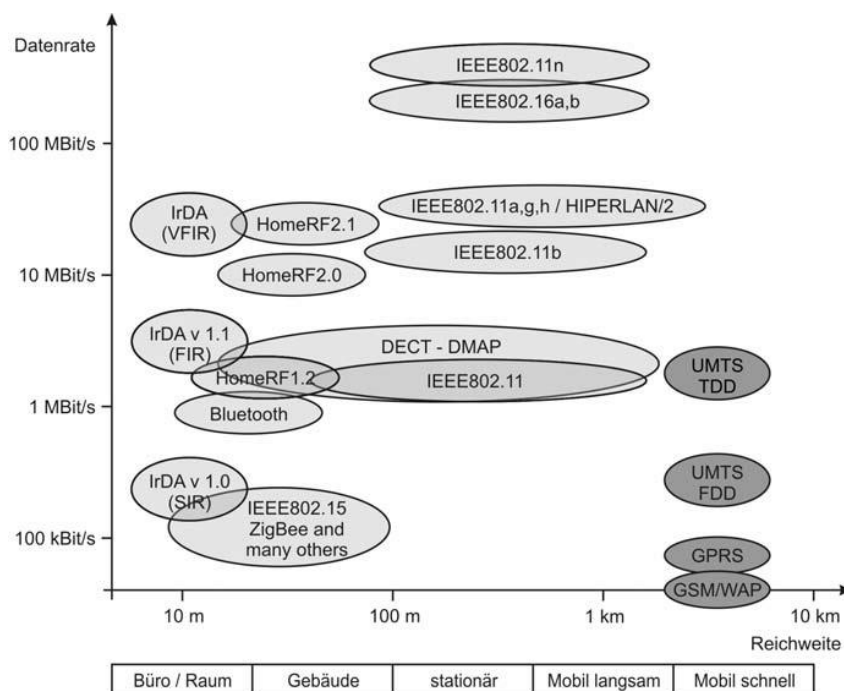


### 13.3 Funktechnologie

Bei der Datenübertragung sind in den letzten Jahren verschiedene Standards entstanden die in diesem Kapitel dargestellt werden. Die Standards unterscheiden sich in den verwendeten Frequenzbändern, Datenraten, Modulationsverfahren und dadurch beispielsweise auch in den überbrückbaren Reichweiten die in Abhängigkeit von der verwendeten Netzwerktopologie von entscheidender Bedeutung sein können. Für den Bereich im Energy Harvesting System sind erneut die Energieeffizienz und damit ein schlankes Funkprotokoll von entscheidender Bedeutung.

#### 13.3.1 Funkstandards

Die Funkstandards sind jeweils für unterschiedliche Einsatzgebiete und Fokussierungen entwickelt worden. Beispielsweise ist der IEEE 802.11 Standard für hohe Datenraten konzipiert worden. Eine Einteilung der Funkstandards nach Datenrate und Reichweite ist in **Bild 13.12** dargestellt.



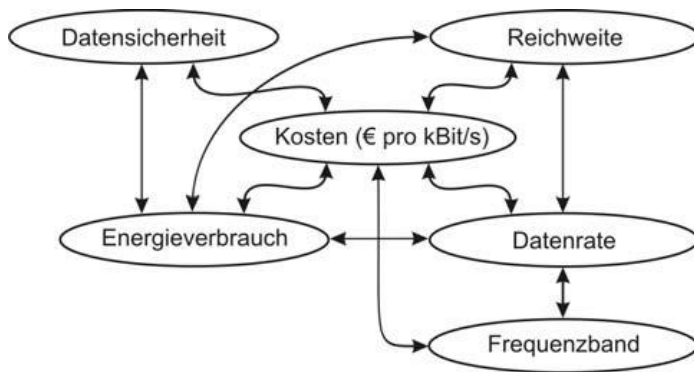
**Bild 13.12** Drahtlose Funkstandards im Vergleich [70]

**Bild 7.1** zeigt die Unterschiede der Funkstandards. Im Bereich der Gebäudeüberwachung sind keine hohen Datenraten und Reichweiten notwendig. Ein Vergleich verschiedener Protokolle die sich aus diesen Bedingungen ergeben ist in **Tabelle 13.11** dargestellt.

**Tabelle 13.11** Vergleich der Funkstandards [46], [70]

	WLAN	Bluetooth	ZigBee	EnOcean	SimpliciTI
Standard	IEEE 802.11a/b/g/h	IEEE 802.15.1	ZigBee Alliance IEEE 802.15.4	EnOcean Alliance	Texas Instruments
Frequenz	2,4 GHz 5 GHz	2,402 - 2480 GHz	868 MHz 2,4GHz	868 MHz	868 MHz 2,4 GHz
Datenrate (max.)	11/54/135/600 Mbit/s	1 Mbit/s	0,25 Mbit/s	0,125 Mbit/s	0,25 Mbit/s
Netzteilnehmer	32 (/b)	8	>65.000		
<b>Batterielebensdauer in Tagen</b>	<b>0,5 - 5</b>	<b>1 - 7</b>	<b>100 - 1000+</b>		
Topologie (s. Abschn. 7.2)	P2P/ Sternnetz	P2P/ Sternnetz	P2P/ Sternnetz/ Maschennetz	P2P/ Sternnetz	P2P/ Sternnetz
Reichweite: Gebäude Freifeld	25 - 40 > 100	5 -10 100	14 175	30	

Die **Tabelle 13.11** zeigt verschiedene standardisierte als auch proprietäre Verfahren. Dabei zeigt sich, dass die Übertragung in unterschiedlichen Frequenzbändern stattfinden kann. Generell gilt folgender physikalischer Zusammenhang der besagt, dass mit höherer Übertragungsfrequenz die Dämpfung des Systems steigt und dadurch die Reichweite der Übertragung geringer wird. Bei den proprietären Verfahren ist bei der Beschaffung der Transceiver immer die Second-Source Problematik zu berücksichtigen. Daher sollten standardisierte Verfahren eingesetzt werden. Bei diesen sticht ZigBee bei der Anzahl der Netzteilnehmer heraus wo quasi keine Begrenzung besteht. Auch ist bei ZigBee eine Maschentopologie möglich wodurch die Reichweite des Netzwerkes erhöht wird, ohne die Leistung der Übertragungsmodule steigern zu müssen. Ein weiterer Vorteil von ZigBee ist der geringe Energiebedarf der lange Batterielebensdauern ermöglicht. Der Energiebedarf hängt jedoch von vielen Einwirkungen ab, die mit Hilfe von **Bild 13.13** aufgezeigt werden sollen.

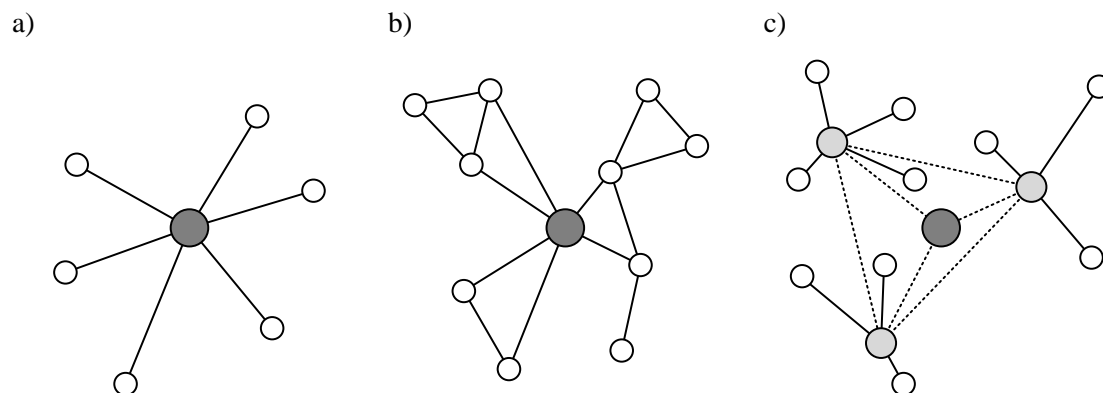


**Bild 13.13** Einwirkungen des Energieverbrauchs bei Funkübertragungen [70]

Auch die Datensicherheit hat einen großen Einfluss auf den Energieverbrauch. Generell kann man sagen, je höher die Datensicherheit desto größer der Aufwand bei der Datenmodulation und Codierung und umso größer ist der Energiebedarf. Beispielsweise ist die Übertragung von Daten unter Einsatz des EnOcean Standards in der Regel unidirektional, und somit falls Fehler auftreten keine erneute Übermittlung möglich.

### 13.3.2 Netzwerktopologie

In **Bild 13.14** sind verschiedene Topologien von Sensornetzwerken dargestellt.



**Bild 13.14** Topologie von Sensornetzwerken a) Star b) Multihop c) Multihop mit Clustering

Bei der Stern-Topologie senden die Sensorknoten ihre Daten nur an eine zentrale Recheneinheit, wodurch hohe Reichweiten benötigt werden können. Bei der Multihop-Topologie können Daten von einem Sensorknoten über einen anderen weitergeleitet werden, was die Reichweite eines Netzes vergrößert. Eine Erweiterung zur Multihop-Topologie ist die Clusterbildung. Einzelne Sensorgruppen werden zu einem Cluster (Gruppe), zusammengefasst. In diesen Cluster wird ein Sensorknoten mit gleichzeitiger Datenanalyse beauftragt, was eine Datenreduktion im kompletten Netzwerk zur Folge haben könnte. Die unterschiedlichen Topologien von Sensornetzwerken besitzen jeweils Vorteile und Limitationen in unterschiedlichen Bereichen die mit Hilfe von **Tabel-**

le 13.12 aufgezeigt werden.

**Tabelle 13.12** Vergleich der Netzwerktopologien [57]

	Vorteile	Nachteile
Stern-Topologie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einfache Konfiguration und Programmierung</li> <li>• Keine Funktionseinschränkung der verbleibenden Sensoren bei Ausfalls eines Knotens</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beschränkte Reichweite</li> <li>• Beschränkte Anzahl von Sensoren aufgrund von limitierter Bandbreite des Funknetzes</li> <li>• <b>Bei großer Funkstrecke hoher Energiebedarf</b></li> </ul>
Multihop-Topologie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Theoretisch keine Beschränkung der Sensorknoten</li> <li>• Geringe Störung aufgrund begrenztem Funkbereich</li> <li>• <b>Gegenüber Stern verringerter Energiebedarf</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Problematisch hinsichtlich Energiebedarf bei großen Netzen aufgrund von Zeitsynchronisation und zu übertragender Datenmenge</li> <li>• Mögliche Überlastung einiger zentraler Sensorknoten</li> </ul>
Multihop-Topologie mit Clustering	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Geringster Energiebedarf aufgrund von Clusteranalysen in Verbindung mit Datenreduktion bei großen Sensornetzen</b></li> <li>• Möglichkeit für effiziente, energiesparende Zeitsynchronisation innerhalb von Clustern</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erhöhter Aufwand an Programmierung und Konfiguration</li> <li>• Mögliche Überlastung einiger zentraler Sensorknoten</li> </ul>

Eine Auswahl ist in Abhängigkeit der Monitoring-Szenarien zu treffen. Auch Strukturelle Gegebenheiten wie die Bauwerksgröße besitzen Einfluss auf die jeweilig nutzbare Topologie.

## 14 Energiebereitstellung auf Sensorebene

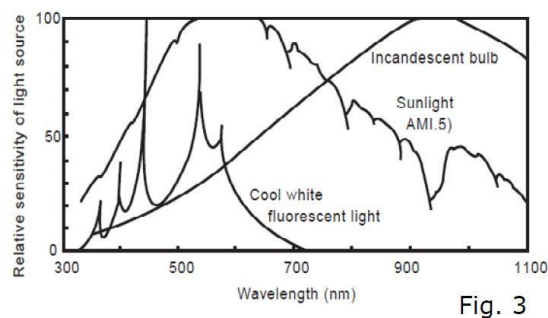
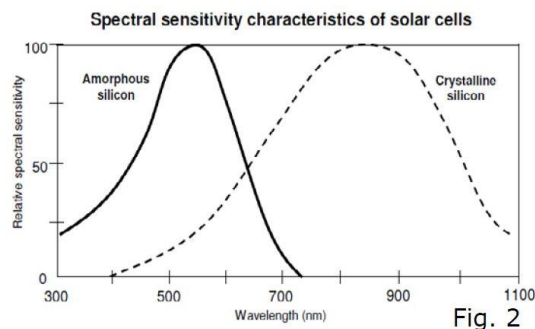
### 14.1 Energy Harvester

Die unterschiedlichen Bauelemente mit denen Energie der Umgebung entzogen werden kann werden Energy Harvester genannt. Diese sollen im folgenden Kapitel vorgestellt werden.

#### 14.1.1 Solarzelle

Die Wirkungsweise einer Solarzelle ist bereits im Abschnitt 5.2 erläutert worden. Im Folgenden wird daher nur auf die Spezifikationen im sensor- bzw. knotenautarken Bereich eingegangen.

Die Solaranlage ist u. a. aufgrund der hohen Leistungsabgabe die gebräuchlichste Art des Energy Harvestings. Solarzellen sind auf Modulen jeglicher Größe weltweit im Einsatz um die Energie der solaren Strahlung in elektrische Energie zu wandeln. Die aktuellen kommerziellen Anwendungsgebiete liegen dabei hauptsächlich im Bereich der Hausinstallation und somit im Innenbereich. Daher werden bei diesen Systemen aufgrund des Spektrums des Lichtes häufig Solarzellen aus amorphem Silizium eingesetzt, da diese eine bessere Leistungsausbeute bei künstlichem und diffusem Licht besitzen, wie **Bild 3.1** zeigt [81].



**Bild 14.1** Spektrale Charakteristiken der Solarzellen und Einstrahlung [81]

Des Weiteren zeichnen sich Solarzellen durch ihre kleinen Stückpreise, die sich auf weniger als 1 Euro belaufen, aus. Beispielhaft sind in **Bild 14.2** zwei Solarzellen der Firma EnOcean dargestellt.

Bild entfernt - Urheberrechte nicht geklärt

**Bild 14.2** ECS 300/ ECS 310 - Solarzellen [85]

In der Tabelle 3.1 sind die wichtigsten Daten der Solarzellen zusammengestellt:

**Tabelle 14.1** Parameter der dargestellten Solarzellen [85]

	ECS 300	ECS 310
Größe	35 x 12,8 x 1,1 mm <sup>3</sup>	50 x 20 x 1,1 mm <sup>3</sup>
Nennleistung @200 lux, 25 °C	14 µW	42 µW
Leerlaufspannung @200 lux, 25 °C	4 V	4 V
Kurzschlussstrom @200 lux, 25 °C	6,5 µA	14 µA
Temperaturbereich	-20 °C ... +65 °C	-20 °C ... +65 °C

Die Parameter der Datenblätter machen deutlich, dass nur sehr kleine Leistungen aufgrund der kleinen Ströme zur Verfügung stehen. Um die Verluste und den nicht gewünschten Verkabelungsaufwand so gering wie möglich zu halten muss die Solarzelle nah an der Sensorik angebracht sein. In Abhängigkeit der erforderlichen Messgrößen in dem jeweiligen Monitoring-Szenario kann jedoch nicht davon ausgegangen werden, dass ausreichend solare Strahlung vorhanden ist. Beispielfhaft müssen Sensoren für die Korrosionsmessungen an den Bewehrungen angebracht sein und somit möglicherweise im Beton vergossen werden. Des Weiteren sind Sensoren z. B. in Installationsschächten oder unterhalb der Brücke angeordnet, in denen ebenfalls keine direkte Sonneneinstrahlung vorhanden ist.

Aufgrund der vielfältig vorhandenen Erfahrungen mit Solarzellen an zum Teil widrigen Einsatzorten ist ein Einsatz im Einzelfall in Abhängigkeit der Messgröße und des Monitoring-Szenarios zu Prüfen.

#### 14.1.2 Thermoelektrische Generatoren

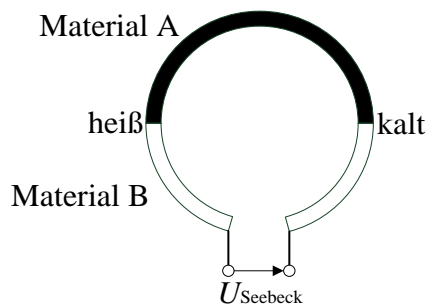
Weitere Energie Harvester, die eine vergleichsweise hohe Leistung bereitstellen, sind thermoelektrische Generatoren (TEG).

Dabei ergibt sich durch den Seebeck-Effekt eine Spannung bei einer vorhandenen Temperaturdifferenz.

(14.1)

Der materialabhängige Seebeck-Koeffizient  $\alpha$  und somit das eingesetzte Material haben entscheidenden Einfluss auf die Ausgangsspannung. Der Seebeck-Effekt entsteht in einem Leiter, dessen Enden auf unterschiedlichen Temperaturniveaus liegen. Dabei kann dieser Effekt nur in Leiter- oder Halbleitermaterialien auftreten. Die Ladungsträger sind in dem Material frei beweglich und besitzen bei höherer Temperatur  $T_h$  eine höhere Beweglichkeit, somit sinkt dort die Ladungsträgerdichte. Am kalten Ende des

Leiters ist aufgrund der Temperatur  $T_k$  die Beweglichkeit klein und damit die Ladungsträgerdichte hoch. In diesem Zustand besteht ein Konzentrationsgefälle der Ladungsträger, woraus sich der bekannte Wärmestrom von dem Bereich mit höherer Temperatur zu dem Bereich niedrigerer Temperatur hin einstellt. Die Leiterenden werden dabei konstant auf den jeweiligen Temperaturen gehalten, sodass das Konzentrationsgefälle einem elektro-statischen Potential entspricht. Das sich daraus aufbauende elektrische Feld wirkt dem Ladungsträgertransport entgegen, sodass sich ein Gleichgewicht einstellt. Mit einem Leiter aus einem Material ist der Thermo-Effekt zur Erzeugung von elektrischer Energie jedoch nicht nutzbar, da während des Abgreifens der Spannung an den Leiterenden sich diese auf dieselbe Temperatur einstellen würden, da die Messspitzen keine unterschiedliche Temperatur aufweisen. Um den Effekt auszunutzen, wird eine Kopplungsschaltung zweier verschiedener Materialien genutzt. Die einfachste Ausführung ist in **Bild 14.3** dargestellt.



**Bild 14.3** Thermopaar zur Ausnutzung des Seebeck-Effektes [65]

Aufgrund dieser Paarung von zwei Materialien ergibt sich in Gleichung (14.1) die folgende Änderung.

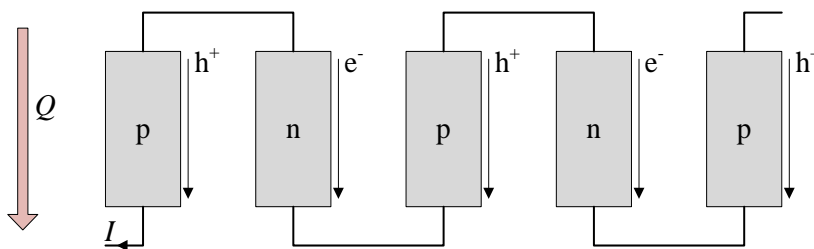
$$(\alpha \quad ) \quad (14.2)$$

In Abhängigkeit der gewählten Materialien ergeben sich verschiedene Seebeck-Koeffizienten. Diese entstehen durch die Thermokräfte in einem Material. Aus der thermoelektrischen Spannungsreihe werden die Materialien gegenüber dem Referenzmaterial Platin in ihren Werten bestimmt. In **Tabelle 14.2** sind verschiedene Werte gegenübergestellt. Dabei ist zu beachten, dass diese Werte bei einer Temperaturdifferenz von 100 K bestimmt werden. Die Differenz  $(\alpha_B - \alpha_A)$  wird in der Einheit mV/K angegeben.

**Tabelle 14.2** Thermospannung ausgewählter Materialpaarungen [44]

Material	( $\alpha$ )
Konstantan	-3,2 mV/K
Nickel	-1,9 mV/K
Kupfer	0,7 mV/K
Eisen	1,9 mV/K

Die ausnutzbare Leistung kann noch weiter erhöht werden, indem die Packungsdichte vergrößert wird. Daraus ergibt sich der Schritt, einen thermoelektrischen Generator aus dicht gepackten Halbleitern aufzubauen. Ein solcher hoch integrierter Thermogenerator besteht aus paarweise zusammengesetzten n- und p-dotierten Halbleitern. Hinzu kommt, dass der Seebeck-Koeffizient bei p- und n-dotierten Halbleitern ein unterschiedliches Vorzeichen besitzt ( $\alpha_p > 0, \alpha_n < 0$ ) und sich somit aufgrund der Addition der Koeffizienten nach Gleichung (14.2) besonders hohe Spannungen generieren lassen [45]. In **Bild 14.4** wird das Prinzip der Verschaltung verdeutlicht. Dabei sind die Halbleiterelemente thermisch parallel und elektrisch in Reihe geschaltet.

**Bild 14.4** Schaltungsaufbau TEG aus Halbleiterelementen

Bei einem Temperaturgradienten über dem Bauelement entsteht ein Wärmestrom, der in den jeweiligen Halbleitermaterialien einen Löcher- und Elektronenstrom hervorruft. Dieser Ladungsträgertransport erzeugt einen nutzbaren elektrischen Strom. Bei einer Zusammenschaltung von  $n$  Thermopaaren entsteht eine  $n$ -fache Vergrößerung der Thermospannung. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die entnommene Energie immer noch sehr niedrig ist. Dies liegt zum einen an der Carnot-Effizienz, die vor allem bei kleinen Temperaturdifferenzen sehr gering ist, sowie an der kleinen Material-Effizienz. Die Material-Effizienz wird in Gleichung (14.3) definiert [45].

$$\text{---} \quad (14.3)$$

In die Material-Effizienz die sich aus der Gütezahl  $Z$  und der Temperatur zusammen-



setzt, geht der Seebeck-Koeffizient quadratisch ein und hat neben der elektrischen Leitfähigkeit  $\sigma$  und der thermischen Leitfähigkeit  $\lambda$  einen entscheidenden Einfluss. Der Wirkungsgrad des Thermogenerators wird durch die Material-Effizienz und den Carnot'schen Wirkungsgrad  $\eta_c$  bestimmt.

$$\frac{\sqrt{1}}{\sqrt{1}} \quad \text{---} \quad (14.4)$$

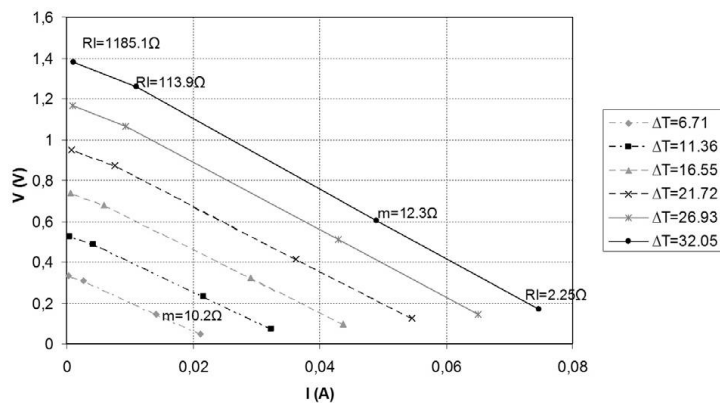
Je besser das Material ist, desto besser ist auch der dimensionslose Faktor  $ZT$ . Bei heutigen Materialien liegt  $Z$  in einer Größenordnung von 2 bis  $3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  [65]. Mit diesen Werten ergeben sich für die gesamte Anordnung Wirkungsgrade von ca. 5 % bei  $\Delta T = 100 \text{ K}$  bis 20 % bei  $\Delta T = 900 \text{ K}$ . Hier fällt auf, dass die Temperaturdifferenzen sehr groß sein müssen.

Für die optimale Energieausbeute sind eine thermische und eine elektrische Leistungsanpassung erforderlich. Bei der thermischen Leistungsanpassung sind die Komponenten so abzustimmen, dass die thermischen Widerstände des Heiß-  $K_h$  und des Kaltseitenwärmetauschers  $K_k$  die für die Aufnahme bzw. Abgabe der Wärme an die Umgebung notwendig sind (z. B. Kühlkörper bei Konvektion) dem thermischen Widerstand des Thermoelements entsprechen.

(14.5)

Dabei wird deutlich, dass für eine optimale Leistungsausbeute individuell an die vorhandenen Wärmequellen angepasste thermische Widerstände notwendig sind.

Bei der elektrischen Leistungsanpassung ist der Innenwiderstand des Thermogenerators entscheidend. Die Last muss um die maximale elektrische Leistung entnehmen zu können mit diesem Innenwiderstand übereinstimmen. Der Innenwiderstand ändert sich, wie **Bild 14.5** zeigt, in Abhängigkeit der der Temperaturdifferenz, sodass eine dynamische Anpassung wünschenswert wäre.



**Bild 14.5** Ausgangscharakteristik eines Thermogenerators

Auf dem Markt sind zwei Arten von Thermogeneratoren vorhanden. Zum einen Halbleiter-Thermogeneratoren und zum anderen Peltier-Elemente. Der Effekt, bei dem durch das Anlegen einer Spannung eine Temperaturdifferenz erzeugt wird, ist unter dem Namen Peltier-Effekt bekannt und wird z. B. zur Kühlung von Prozessoren genutzt. Peltier-Elemente besitzen, da sie für die umgekehrte Aufgabenstellung konzipiert werden, einen geringeren Wirkungsgrad bei der Energiegewinnung als Halbleiter-Thermogeneratoren und erzeugen eine geringere Ausgangsspannung. Daher benötigen sie spezielle DC/DC Wandler um die kleinen Spannungen nutzbar zu machen. Ein wesentlicher Vorteil dieser Elemente ist jedoch der geringe Preis. **Bild 14.6 a** zeigt den Vergleich der TEG.

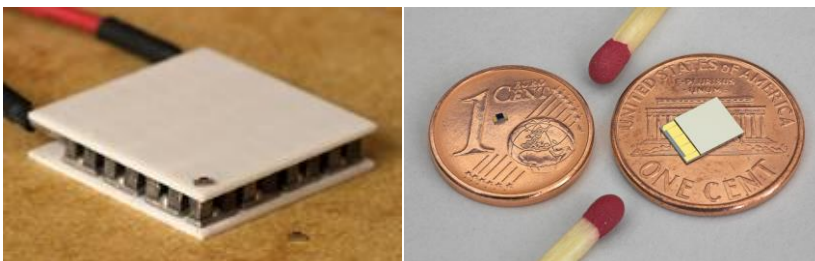


Bild entfernt -  
Urheberrechte  
nicht geklärt

**Bild 14.6 a)** Vergleich Peltier-Element (groß) zum Halbleiter-Thermogenerator, **b)** Größenordnung Halbleiter-Thermogenerator **c)** Systemaufbau Halbleiter-Thermogenerator [47]

In **Bild 14.6 c** ist ein der Aufbau eines Halbleiter-Thermogenerator mit natürlicher Konvektion dargestellt. Dabei ist zu sehen, dass beim Halbleiteraufbau nicht automatisch ein Gesamtsystem im Mikro-Maßstab entsteht.

In Bezug auf die Anwendung von TEG in Brückenbauwerken ist die Temperaturdifferenz von einigen 100 K um hohe Wirkungsgrade und Ausgangsleistung zu erreichen

nicht gegeben. Hier sind nur keine Temperaturdifferenzen vorhanden bei denen die Möglichkeit der Nutzung zu untersuchen ist. Die geringe Temperaturdifferenz könnte jedoch in gewissen Bereichen über die Größe der Thermogeneratoren ausgeglichen werden da diese als Halbleiterstruktur sehr gut skalierbar sind [46]. In **Bild 3.7** ist ein Anwendungsbeispiel für einen Halbleiter-Thermogenerator für den Außenbereich-Einsatz dargestellt.

Bild entfernt - Bildrechte nicht geklärt

**Bild 14.7** Außenbereich-Lösungen für TEG

Beispielhaft sind im Folgenden die Parameter, Leistungsdaten und die Leistungskurve eines TEG Demo Kit aufgeführt.

**Tabelle 14.3** Parameter und Leistungsdaten vom TEG Demo Kit [106]

EverGen		Marlow Industries, inc		
Thermal Energy Harvesting Demo Unit Solid to Air		EHA-PA1AN1-R02-L1		
Einschalttemperaturdifferenz		5,5 K		
	2,3 V	3,3 V	4,1 V	5,0 V
P @ $\Delta T = 10$ K	0,1 mW	0,2 mW	0,2 mW	0,2 mW
P @ $\Delta T_{\text{Max}} = 60$ K	1,3 mW	1,7 mW	2,0 mW	2,3 mW
Größe		74 x 36 x 38 mm <sup>3</sup>		

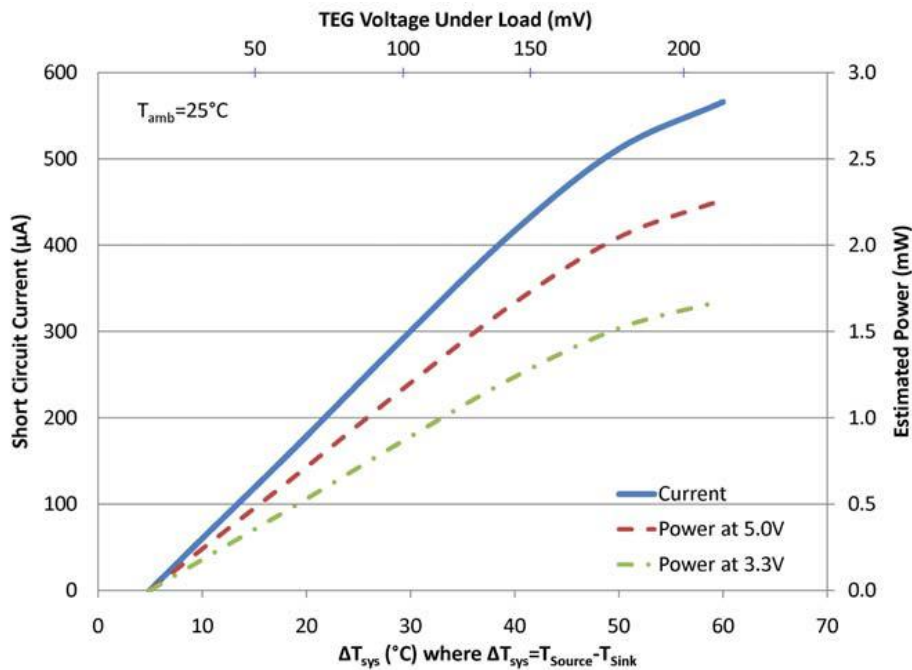


Bild 14.8 Leistungskurve des TEG Demo Kit [106]

### 14.1.3 Elektrodynamische Wandler

Das Prinzip hinter der Umwandlung von Bewegungsenergie in elektrische Energie basiert auf dem Induktionsgesetz, welches erstmals 1831 von Michael Faraday beschrieben wurde. Es besagt, dass in einer Leiterschleife die mit einem sich ändernden magnetischen Fluss durchsetzt wird, eine Spannung an den Leiterenden entsteht. Wird dabei eine Spule mit  $N$  Leiterschleifen eingesetzt ergibt sich die Gleichung (14.6) des Induktionsgesetzes wie folgt.

$$- \int \vec{B}$$
(14.6)

Dieses Prinzip wird benutzt, um mechanische Energie in elektrische Energie in mikroskopischen Größenordnungen umzuwandeln. Bild 14.9 zeigt dabei drei verbreitete Möglichkeiten einer Umwandlung der Energien.

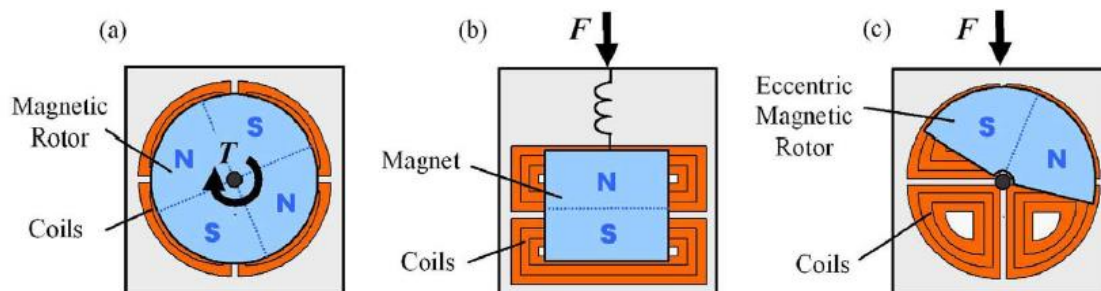
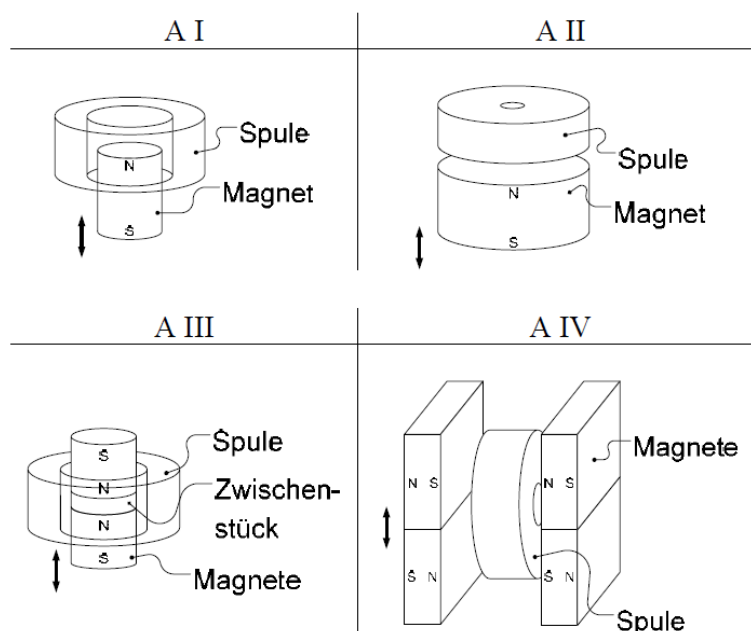


Bild 14.9 Drei Möglichkeiten der Energiewandlung: a) aus kontinuierlich rotierender Energie,

b) aus oszillierender Energie, c) aus chaotischer Energie [51]

Diese Generatoren werden dabei in die drei Kategorien nach **Bild 14.9** eingeordnet wobei überall Permanentmagnete zur Felderzeugung eingesetzt werden. Ist die Quelle der mechanischen Energie rotarisch und liegt die Energie kontinuierlich vor so kann mit dem Aufbau in Form von **Bild 14.9 a** eine optimale Energiewandlung erfolgen. Der Generatortyp in **Bild 14.9 b** ist die passende Konfiguration für vibrierende bzw. oszillierende Energien. Der Permanentmagnet schwingt über den Windungen und induziert dort eine Spannung aufgrund der Bewegung. **Bild 14.9 c** zeigt einen Hybridtyp aus den beiden vorherigen Versionen. Mit diesem Aufbau kann zum einen rotarische Energie, oszillierende Energie als auch chaotisch vorkommende Energie umgewandelt werden. Ein Beispiel für diesen Generatortyp ist die Uhrenlinie Kinetic von Seiko, die mit einem solchen hybriden Generator aus der Bewegungsenergie des menschlichen Armes einen Akkumulator speist.

Da bei Brückenbauwerken meist von Vibrationen ausgegangen werden kann, ergibt sich der zweite Generatortyp als Lösungsansatz. Bei der Betrachtung dieser elektromagnetischen Vibrationswandler, muss eine weitere Unterscheidung getroffen werden. Der Aufbau zwischen der jeweiligen Spule und des Permanentmagneten wird in vier Kategorien eingeteilt [48]. Dabei nimmt der Permanentmagnet die Schwingungen auf während die Spulen fest angebracht sind.



**Bild 14.10** Kopplungsarchitekturen von permanentenerregten Vibrationswandlern [48]

In **Bild 14.10** sind vier der am häufigsten verwendeten Vibrationswandler dargestellt.

Bei gleicher Anregung stellen sich unterschiedliche Ausgangsleistungen und Ausgangsspannungen bei den Architekturen ein. Dabei erzeugt Typ A IV die größte Ausgangsleistung und Typ A II die höchste Ausgangsspannung [48]. Die Festlegung auf eine Architektur ist somit nicht trivial, da auch die nicht elektrischen Faktoren am Einsatzort wie beispielweise die Bauteilform Beachtung finden müssen.

Um bei kleinen Generatorgrößen ein ausreichend starkes magnetisches Feld für die Induktion bereitzustellen, müssen die passenden Materialien für die Permanentmagnete (PM) gewählt werden. Eine Unterscheidung wird in drei verbreiteten Materialklassen vorgenommen. Die günstigste Materialklasse ist dabei die der oxidkeramischen Ferrite. Diese bestehen hauptsächlich aus Eisenoxid ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) und Metallkarbonat (z. B.  $\text{BaCO}_3$ ). Dieses gemahlene Gemisch wird in Form gebracht, indem es erst gepresst und danach gesintert wird. Dabei können verschiedenste Formen hergestellt werden, die aufgrund der Materialeigenschaften der Ausgangsstoffe, zwar hart, aber spröde sind. Eine weitere PM-Materialklasse sind Legierungen wie beispielsweise AlNiCo. Dieses besteht aus einer Mischung von Aluminium, Nickel, Cobalt, Kupfer, Eisen und in seltenen Fällen auch Titan. AlNiCo wird in Form gegossen und bekommt eine harte Struktur. Die Seltenerd-Magnete besitzen die größten magnetischen Feldstärken. Dazu gehört das sehr teure Neodym-Eisen-Bor ( $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ) sowie Samarium-Cobalt ( $\text{SmCo}_5$ ). Um  $\text{SmCo}_5$  in eine Form zu bringen, wird es mit Kunststoff gesintert. Das entstandene Material ist dabei aber ebenfalls sehr spröde. Auch NdFeB-Magnete werden als Pulver in Form gesintert. Bei der Auswahl eines Permanentmagneten müssen sowohl technische als auch wirtschaftliche Faktoren einbezogen werden. Die entscheidenden technischen Parameter sind das Energieprodukt  $(BH)_{\text{MAX}}$ , die Koerzitivfeldstärke  $H_C$  und die Remanenzinduktion  $B_R$ . Äußere Parameter setzen sich aus der Korrosionsbeständigkeit, der maximalen Betriebstemperatur, der Curie-Temperatur und der Dichte zusammen. Ausgewählte Werte sind in **Tabelle 14.4** gegenübergestellt.

**Tabelle 14.4** Typische Kennwerte von Permanentmagneten ,[49],[50]

	$B_R$ in T	$H_C$ in kA/m	$(BH)_{MAX}$ in kJ/m <sup>3</sup>	Max. Betriebs- temperatur in °C	Dichte in g/cm <sup>3</sup>	Preis in €/kg
oxidker. Ferrite	0,2 - 0,4	185 - 260	8 - 28	~ 250	~ 5	3,4
AlNiCo	1,26	52	43	540	7,3	34
NeFeB	1,12 - 1,4	840 - 995	265 - 385	80 - 180	~ 7,5	85
SmCo	0,85 - 1,15	600 - 800	145 - 256	300	8,4	170

Da ein elektromagnetischer Vibrationswandler einem Feder-Masse-Dämpfersystem entspricht, kann die maximale Energie nur dann gewonnen werden, wenn die Vibrationsfrequenz der mechanischen Resonanzfrequenz gleichgesetzt wird [51]. Somit muss eine Anpassung an die jeweilige Brücke vorgenommen oder breitbandige Wandlungssysteme eingesetzt werden. Generell liegen die Resonanzfrequenzen von Brückenbauwerken im ein bis zweistelligen Frequenzbereich [52]. Grundsätzlich kann gesagt werden, dass Wandler mit niedrigen Resonanzfrequenzen größer Ausmaße besitzen. Beispielhaft beträgt die Baugröße eines Prototyps der auf eine Frequenz von 6 Hz ausgelegt ist 500 cm<sup>3</sup>.

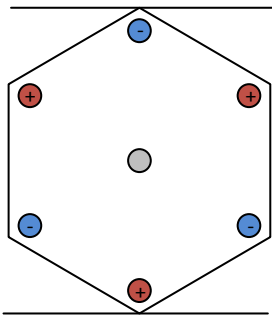
Die im nächsten Abschnitt dargestellten Piezo-Generatoren erzeugen ebenfalls Energie aus Vibration. Daher sind beide Systeme direkt miteinander vergleichbar und dadurch einfacher zu Bewerten. Dabei sind die Baugröße, die Energiedichte, die Lebensdauer und weitere Faktoren für den Einsatz entscheidend. Generell kann gesagt werden, dass das Einsatzgebiet elektrodynamischer Wandler bei kurzzeitigen (heftigen) unregelmäßigen Stößen liegt [46]. Bei gleichmäßiger Vibration wie sie an rotierenden Maschinen auftreten besitzen Piezo-Generatoren Vorteile, sodass der Einsatz für befahrene Brückenbauwerke wahrscheinlicher ist.

#### 14.1.4 Piezo-Generatoren

Der Piezo-Effekt wurde gegen 1880 von den Brüdern Jacques und Pierre Curie bei Versuchen mit Kristallen entdeckt. Sie beobachteten eine elektrische Ladung auf der Oberfläche der Kristalle, wenn der Kristall in einer definierten Richtung mechanisch verformt wurde.

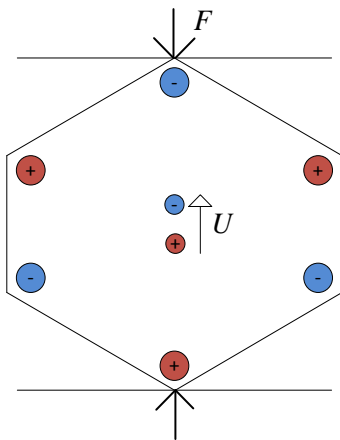
Bei der Betrachtung einer Elementarzelle eines Kristalls gemäß **Bild 14.11**, kann die

symmetrische Anordnung der Elementarladungen erkannt werden.



**Bild 14.11** Struktur der Ladungsverteilung einer Elementarzelle

Alle komplementären Ladungen sind gleichmäßig um den Mittelpunkt der Zelle angeordnet. Somit entstehen keine positiven oder negativen Ladungsschwerpunkte im Kristall. Ein anderes Bild ergibt sich, wenn eine Kraft  $F$  in einer definierten Richtung aufgebracht wird. Dabei verschieben sich die Elementarladungen, sodass die jeweiligen Ladungsschwerpunkte nicht mehr an derselben Position liegen. Mit zwei unterschiedlichen Ladungsschwerpunkten ergibt sich die in **Bild 14.12** gezeigte Differenzspannung  $U$ .

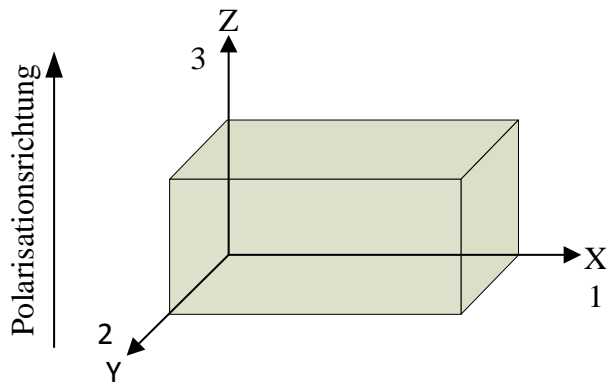


**Bild 14.12** Mechanisch verformte Elementarzelle

Diese Differenzspannung kann solange genutzt werden, bis sie durch nachfließende Ladungen wieder abgebaut wird. Dann muss durch eine weitere Verformung eine neue Ladungsverschiebung hervorgerufen werden. Hierdurch ergibt sich der Einsatz von Piezo-Elementen als Vibrationswandler, da in dieser Anwendung die Kristalle einer ständigen Verformung unterliegen. Der Effekt ist auch invers nutzbar. Der sogenannte inverse Piezo-Effekt kann ausgenutzt werden, indem an ein Piezo-elektrisches Material eine Spannung angelegt wird und sich der Kristall proportional mechanisch verformt. Um den Piezo-Effekt auszunutzen, muss noch zwischen den verschiedenen Richtungsabhängigkeiten der Piezo-Kristalle unterschieden werden. **Bild 14.13** veranschaulicht

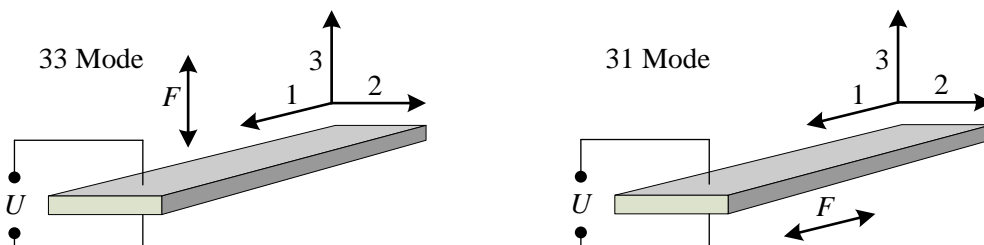


dabei die gewählten Definitionen.



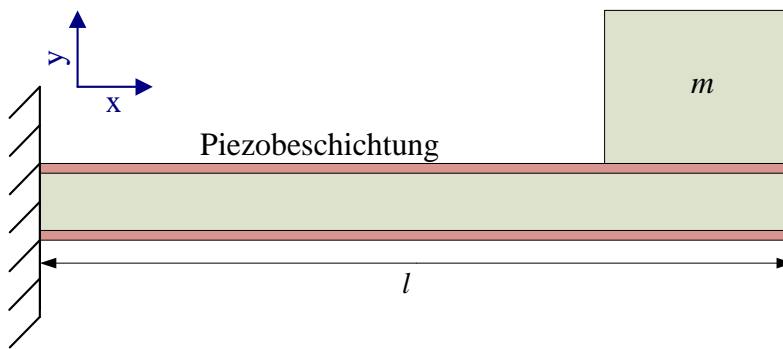
**Bild 14.13** Achsdefinition eines Piezo-elektronischen Körpers [46]

Mit dieser Definition bestimmen sich die zwei in **Bild 14.14** dargestellten Operationsmodi. Wird bei beiden Methoden eine Spannung in Richtung der Achse 3 definiert, so kann zur Entstehung dieser Spannung eine anliegende Kraft in Richtung der Achse 1 oder in Richtung der Achse 3 gewählt werden. Der Transversalschwinger, oder auch als 31-Schwingungsmodus bezeichnet, setzt wie oben angenommen die Spannung entlang der Achse 3 an. Die verformende Kraft liegt dann senkrecht dazu in Richtung der Achse 1 an. Der Longitudinalschwinger, auch als 33-Schwingungsmodus bezeichnet, beschreibt den Fall, dass Spannung und Kraft parallel entlang der Achse 3 anliegen.



**Bild 14.14** Piezo-Modi in den jeweiligen Achsenrichtungen [67]

Die verbreitete Methode in der Anwendung ist aufgrund einer um den Faktor 10 höheren Ausgangsspannung der Transversalschwinger, meist als sog. Biegebalken, wie in **Bild 14.15** zu sehen, ausgeführt [46].



**Bild 14.15** Transversalschwinger in Biegebalkenbauform [46]

Dabei werden die beiden aufgetragenen Piezo-Schichten bimorph ausgeführt. Die Masse verstärkt das Verbiegen des Balkens in  $y$ -Richtung. Die obere Piezo-Beschichtung wird somit gestreckt, die untere Beschichtung wird gestaucht. Der ganze Aufbau soll technisch als Feder-Masse System betrachtet werden, wobei die Gleichung (14.7) die maximale Leistung darstellt [67].

$$P_{\max} = \frac{m K^2 \omega^3}{4 D} \quad (14.7)$$

Mit dieser Gleichung wird ersichtlich, dass eine allgemeine Optimierung eines solchen Systems von mehreren Faktoren abhängt wobei vor allem die Dämpfung beeinflussbar ist. Die Resonanzfrequenz  $\omega$  ist im zu untersuchenden Einsatzspektrum durch den Aufbau des jeweiligen Brückenbauwerkes vorgegeben. Die Amplitude  $K$  und die schwingende Masse  $m$  des Biegebalkens werden an dem Einbauort durch den vorhandenen Raum begrenzt, sind in diesem jedoch variabel.

Eine weitere Möglichkeit die Leistung zu erhöhen ergibt sich aus dem verwendeten Piezo-Material. Dabei ist das verbreitetste Material eine Verbindung aus Blei-Zirkonat-Titanat [46]. Desweiteren ist durch den Einsatz polarisierter Kunststoffe, wie beispielsweise Polyvinylidenchlorid, die Herstellung von vielseitig einsetzbaren, aufklebbaren Folien möglich.

Bekannte Entwicklungen, die erfolgreich den Piezo-Effekt ausnutzen, sind in der Sensorik und Aktuatorik zu finden. Beispielsweise sind spezielle Tonabnehmer von musikalischen Instrumenten aus Piezo-elektrischen Keramiken. Druck- und Kraftsensoren sowie Beschleunigungssensoren, werden ebenfalls in dieser Weise aufgebaut.

In Brückenbauwerken muss ein Einbauort gefunden werden, der aufgrund der kleinen Ströme nah an der zu versorgenden Sensorik sein soll, und zum anderen konstante Schwingungen passender Frequenz bereit stellt. Wie schon bei den elektrodynamischen

Energiewandlern aufgezeigt, liegt die Resonanzfrequenz von Brückenbauwerken im niedrigen Frequenzbereich und macht auch bei Piezo-Generatoren größere Baugrößen notwendig.

#### **14.1.5 Energie aus HF-Strahlung**

Bei der Energiegewinnung aus HF-Strahlung ist die RFID-Technologie (Radio Frequency Identification) als am Markt etabliertes Verfahren zu nennen. Dabei wird das elektromagnetische Feld von einem Lesegerät erzeugt um einen Transponder zu versorgen, der wiederum Daten an das Lesegerät sendet. Dies Prinzip funktioniert jedoch effizient nur im Nahfeld und ist somit auf wenige Meter begrenzt.

Für den Einsatz in Brückenbauwerken ist die Energie aus vorhandenen Feldern zu nutzen die nicht extra erzeugt werden sollen. Dabei sind Radio-, TV-, Mobilfunknetze usw. zu nennen die nahezu allgegenwärtig sind.

Für die Nutzung der Energie aus diesen Quellen sind eine Anpassung an die verfügbaren Frequenzen und eine Verstärkung notwendig. Sodass nur ein kleiner Frequenzbereich oder entsprechend mehrere Antennen mit abgestimmten Resonanzkreise genutzt werden können.

Zur Nutzung dieser Energie ist jedoch zu sagen, dass die Bundesnetzagentur die Entziehung von Energie aus HF-Feldern verboten hat [46]. Daher wird die Energiegewinnung aus HF-Feldern nicht weiter betrachtet.

#### **14.1.6 Weitere Energy Harvester**

Zusätzlich können weitere Energievorkommen zur Gewinnung von elektrischer Energie genutzt werden. Die Gewinnung von Energie aus Schall, aus Infrarotstrahlung, aus kleinen Windkanälen, usw. sind aktuell nicht soweit erforscht, dass sie in größerer Serie eingesetzt werden oder sie besitzen aufgrund verschiedener anderweitiger Limitationen keine nennenswertes Einsatzpotential an Brückenbauwerken.

#### **14.1.7 Bewertung der Energy Harvester**

In der folgenden Tabelle sind eine Zusammenfassung der charakteristischen Parameter und eine Bewertung der in diesem Abschnitt dargestellten Energy Harvester dargestellt.

**Tabelle 14.5** Bewertung der Energy Harvester

	Energieniveau	Platzbedarf	Einsatzpotential am Brückenbauwerk
<b>PV</b>	<b>Hoch</b>	<b>Mittel</b>	<b>Ja</b>
<b>TEG</b>	<b>Hoch/Mittel</b>	<b>Gering</b>	<b>Ja</b>
Elektrodynamische Generatoren	-	-	<b>Nein</b>
<b>Piezo-Generatoren</b>	<b>Mittel/Gering</b>	<b>Hoch</b>	<b>Ja</b>
HF-Harvester	-	-	<b>Nein</b>

## 14.2 Energiespeicher

In diesem Kapitel wird wie auch schon im 1. Teil des Berichts auf Energiespeicher eingegangen. In diesem Abschnitt wird dabei der Fokus auf die Energiespeicher geringer Kapazität und Leistung für den Einsatz am Sensorknoten gelegt. Eine Wartung von Sensorknoten in Brückenbauwerken ist aufgrund der Bedingungen schwierig bis ausgeschlossen, daher ist eine hohe Lebensdauer der eingesetzten Speichersysteme erforderlich.

### 14.2.1 Aufgabenstellung

Die Notwendigkeit von Speichern im Energy Harvesting System hängt von den jeweiligen Monitoring-Szenarien und der Notwendigkeit der Messwerte ab. Ist eine regelmäßige Messwerterfassung zu definierten Zeitpunkte vorgesehen so ist ein Energiespeicher zur kontinuierlichen Energiebereitstellung unabdingbar. Hingegen besteht bei einem ereignisbasierten Monitoring die Möglichkeit, dass das Ereignis selbst (z. B. Vibrationen durch die Überfahrt eines LKW) zur Energieversorgung des Sensorknoten genutzt werden kann und somit keine Energiespeicher notwendig sind.

An diesen Beispielen wird deutlich, dass die Dimensionierung eines Energiespeichers in enger Abstimmung mit der spezifischen Anwendung, dem Monitoring-Szenario und dem Energy Harvester geschehen muss.

### 14.2.2 Akkumulatoren

Üblicherweise werden als Akkumulatoren auf Basis einer elektrochemischen Wirkungsweise folgende Typen eingesetzt: Gekapselte Bleiakkumulatoren, Nickel-Cadmium-, Nickel-Metall-Hydrid- und Lithium-Ionen- bzw. Lithium-Polymer-Akkumulatoren. Nickel-Cadmium- und Bleiakkumulatoren sind dabei erstens aufgrund der relativ kleinen Energiedichte und zweitens aufgrund des Memory-Effekts (NiCd)

nicht zu favorisieren [68]. Lithium-Polymer-Akkumulatoren besitzen bis auf eine höhere Energiedichte die gleichen elektrischen Eigenschaften wie Lithium-Ionen-Akkumulatoren [46], diese Eigenschaften sind bereits im 1. Teil des Berichts aufgeführt. Daher wird im Folgenden detailliert auf die Vor- und Nachteile von Akkumulatoren aus Nickel-Metall-Hydrid (NiMH) eingegangen.

Der Einsatz von NiMH-Akkumulatoren ist in vielen Bereichen der Elektronik aufgrund ihrer Robustheit weit verbreitet. Sie besitzen jedoch Nachteile in Bereichen der Zyklfestigkeit, Energiedichte und der Selbstentladung gegenüber Lithium-Ionen-Akkumulatoren, dafür sind sie günstiger.

Die Zyklfestigkeit von NiMH-Akkumulatoren liegt handelsüblich bei mehreren hundert bis wenigen tausend Zyklen. Einen entscheidenden Einfluss auf die Zyklfestigkeit besitzt die Tiefe der jeweiligen Entladung. Bei vollständiger Entladung erreichen auf die Lebensdauer optimierte NiMH-Akkumulatoren bis zu 1000 Zyklen, während sie bei nur 40-prozentiger Entladung über 8000 Zyklen erreichen [74]. Nach [75] ist bestenfalls eine Verzwanzigfachung der Zyklfestigkeit bei nur 20-prozentiger Entladung möglich sodass 20.000 Zyklen erreicht werden können. Diese lebensdaueroptimierende Lade- bzw. Entladestrategie ist bei allen Chemischen Batteriespeichern zu beobachten.

Um somit durch eine Erhöhung der Kapazität des Speichers eine geringere Entladung zu erreichen wirkt der Effekt entgegen, dass Zellen hoher Kapazität eine deutlich geringere Lebensdauer besitzen, sodass ein Kompromiss zwischen Lebensdauer und Kapazität geschlossen werden muss [75]. Als kalendarische Lebensdauer wird bei intensiver Nutzung von NiMH-Akkumulatoren von zwei Jahren und bei gelegentlicher Nutzung von fünf bis sieben Jahren ausgegangen [76].

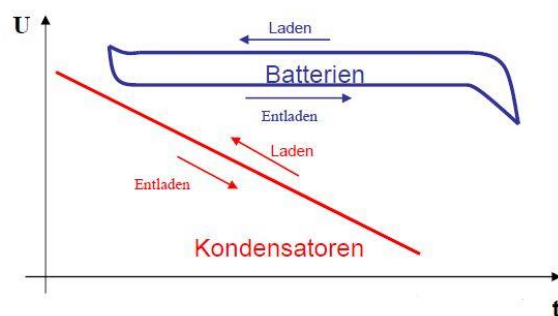
Generell benötigen alle Akkumulatoren Ladeschaltungen, die für den jeweiligen Akkumulatortyp ausgelegt sind. Diese sind zum Schutz der Akkumulatoren notwendig um die angegebenen Lebenszeiten zu ermöglichen, da sie empfindlich auf spezifische Eigenschaften wie beispielsweise die Temperatur oder die Ladeschlussspannung reagieren. NiMH-Akkumulatoren werden üblicherweise mittels eines konstanten Stromes geladen, sodass hier eine Konstantstromquelle notwendig ist. Im Gegensatz dazu, werden für Lithium-Ionen-Akkumulatoren spezielle Chips oder Microcontroller für die Ladungsüberwachung mit dem entsprechenden Energiebedarf und Verlusten eingesetzt.

Bei der Entladung von NiMH-Akkumulatoren ist grundsätzlich eine Tiefenentladung zu vermeiden, da sich Risse aufgrund von Volumenänderungen ausbilden. Diese irreparab-

le Schädigung führt zur Herabsetzung der Lebensdauer und ist besonders bei elektronisch abschaltbaren Bauelementen aufgrund von vorhandenen Restströmen kritisch. Auch die hohe Selbstentladung von NiMH-Akkumulatoren ist zu beachten. Sie liegt im Bereich der Zimmertemperatur bei 20 – 30 % im Monat, wobei ein starker Anstieg mit steigender Temperatur und dem Alter der Akkumulatoren zu verzeichnen ist. Die Schnelligkeit der Selbstentladung nimmt mit steigendem Ladezustand zu, sodass sich ein älterer vollgeladener Akkumukator innerhalb von zwei Tagen auf weniger als 50 Prozent seiner Kapazität entladen kann [74].

### 14.2.3 Kondensatoren

Als Kondensatoren werden im Folgenden Doppelschicht-Kondensatoren bezeichnet. Der große Vorteil von diesen Kondensatoren ist, dass sie keine Ladeschaltungen benötigen da sie nahezu mit jedem Profil ge- und entladen werden können. Hinzu kommt, dass prinzipiell auch kein Überladen möglich ist. Ein weiterer Vorteil gegenüber Akkumulatoren ist, dass sie annähernd unendlich viele Ladezyklen (typisch 1 Millionen) ermöglichen. Zusätzlich sind sie sehr robust gegen hohe Temperaturschwankung wie sie im Sensorknoten vorkommen können [68]. Auch eine vollkommene Entladung ist unkritisch da keine elektrochemischen Vorgänge im Inneren ablaufen. Dadurch ergibt sich ein vollkommen wartungsfreies System. Doppelschicht-Kondensatoren fordern in Abhängigkeit des Elektrolyts eine geringe Betriebsspannung, was im Bereich des Energy Harvestings jedoch keine Limitation darstellt. Nachteilig sind der hohe Preis und die hohen Leckströme [67]. Die Selbstentladungsrate liegt dadurch im Vergleich zu Akkumulatoren deutlich höher, sodass sich eine komplette Entladung innerhalb weniger Wochen ergeben kann. Zusätzlich ergibt sich, wie in **Bild 14.6** zu sehen, bei der Be- und Entladung eine große, systembedingte Spannungsänderung.



**Bild 14.16** Vergleich des Spannungsverlaufes bei Kondensatoren und Akkumulatoren [69]

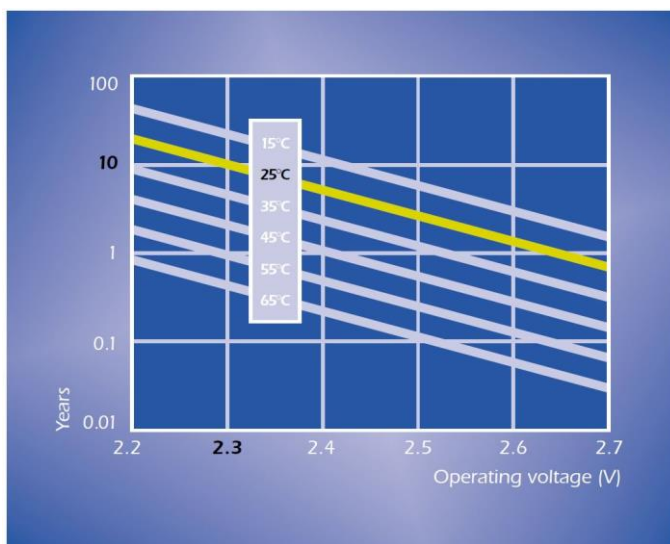
Diese Spannungsänderung ist für den Betrieb von Sensorik jedoch sehr problematisch.

Z. B. hängt die Genauigkeit der Messergebnisse bei DMS von der Stabilität und dem Betrag der Spannung ab, sodass nur ein eingeschränkter Bereich genutzt werden kann. Die Kapazität liegt im Bereich von wenigen mF bis hin zu mehreren F. Für die Auslegung ist der Energiebedarf der Sensorik und der weiteren Verbraucher am Sensorknoten verantwortlich.

Als kalendarische Lebensdauer wird von zehn Jahren ausgegangen.

#### 14.2.4 Limitation

Der Energiespeicher ist eines der komplexesten Systeme im Energy Harvesting System. Als größte Einschränkung für den Einsatz ist bei elektrochemischen Energiespeichern die geringe Zyklenfestigkeit zu nennen. Dadurch ergeben sich geringe Lebensdauern die unter optimalen Bedingungen nicht ansatzweise im Bereich der zu erwartenden Lebensdauer der Bauwerke (ca. 100 Jahre) liegt. Des Weiteren sorgen der Einsatz im Außenbereich und die damit vorhandenen Temperaturschwankungen für eine weitere Reduzierung der Lebensdauer und Kapazität. Bei Kondensatoren ist eine ausreichende Zyklenfestigkeit vorhanden. Auch was die Robustheit gegen Temperatureinflüsse betrifft besitzen sie deutliche Vorteile. Jedoch sind auch sie, wie **Bild 14.17** zeigt, Alterungsvorgängen bei steigender Zellspannung und Betriebstemperatur unterworfen.



**Bild 14.17** Lebenszeitprognose eines Doppelschicht-Kondensators [69]

Mit Hilfe von **Bild 14.17** wird deutlich, dass auch bei Kondensatoren nur unter optimalen Bedingungen von einer Lebensdauer ausgegangen werden kann, die der Lebensdauer von Brückenbauwerken entspricht. Vor allem die systembedingte Änderung der Spannung schränkt die Einsatzmöglichkeiten von Kondensatoren stark ein.

Die Wartung von Energiespeichern oder der Austausch ist bei Sensornetzwerken zur

Brückenbauwerksüberwachung aufgrund der Anordnung auf, unter oder in bestehenden Bauwerksstrukturen nicht praktikabel, da Sensorknoten unter Umständen nur sehr schwer bzw. gar nicht zu erreichen sind [67].

Aktuell ist somit keine Speichertechnologie vorhanden die eine wartungsfreie, dauerhafte Energieversorgung zur Bauwerksüberwachung garantieren kann.

## **15 Energieangebot an Brückenbauwerken**

In diesem Abschnitt ist die vorhandene Energie die mittels der Energy Harvester einer Brücke bzw. der Umgebung entzogen werden kann dargestellt. Dabei wird das Brückenbauwerk untersucht und die unterschiedlichen Umgebungsbedingungen für die Sensorknoten bewertet.

Die für die Strukturüberwachung benötigte Energie an den einzelnen Sensorknoten ist in Kapitel 13.1 dargestellt. Mit diesen Kennwerten sollen Energiequellen an und um das Brückenbauwerk untersucht und bewertet werden. Auf dieser Grundlage werden die Einsatzmöglichkeiten für die in Kapitel 14.1 dargestellten Energy Harvester getroffen um eine optimale Versorgung der Sensorknoten zu gewährleisten. Ist am jeweiligen Einsatzort keine Versorgungsmöglichkeit oder ein zu niedriges Leistungspotential vorhanden muss über konventionelle, kabelgebundene Versorgung oder größere Abstände der Erzeugung von der Sensorik nachgedacht werden. Diese Möglichkeiten kommen jedoch erst in Betracht, wenn keine der vorhandenen Versorgungsmöglichkeiten am notwendigen Einsatzort die erforderliche Versorgung garantiert.

### **15.1 Globalstrahlung**

Das Globalstrahlungsangebot ist in Teil 1 in Abschnitt 5.2.1 detailliert dargestellt.

Die Energieversorgung eines Sensorknotens mit dem Versorgungskonzept V1 (s. Abschnitt 14.1.7) (und bei entsprechender Dimensionierung auch V2) durch eine Solarzelle ist sobald Globalstrahlung vorhanden ist aufgrund der hohen Leistungsabgabe der Solarzelle volatil möglich. Das bedeutet jedoch, dass die Sensorknoten an der Oberfläche des Brückenbauwerks angebracht sein müssen und im Idealfall direkte Strahlung erhalten. Damit entfällt die Versorgung von allen Sensorknoten die innerhalb von Versorgungsschächten eingesetzt oder im Material wie beispielsweise Beton vergossen werden, wenn keine längeren Leitungswege gewünscht bzw. möglich sind. Des Weiteren ist eine individuelle Ausrichtung und Anpassung des Solarmoduls an jedem Einsatzort notwendig. Aufgrund der direkten Witterungseinflüsse auf das Energy Harvesting Sys-



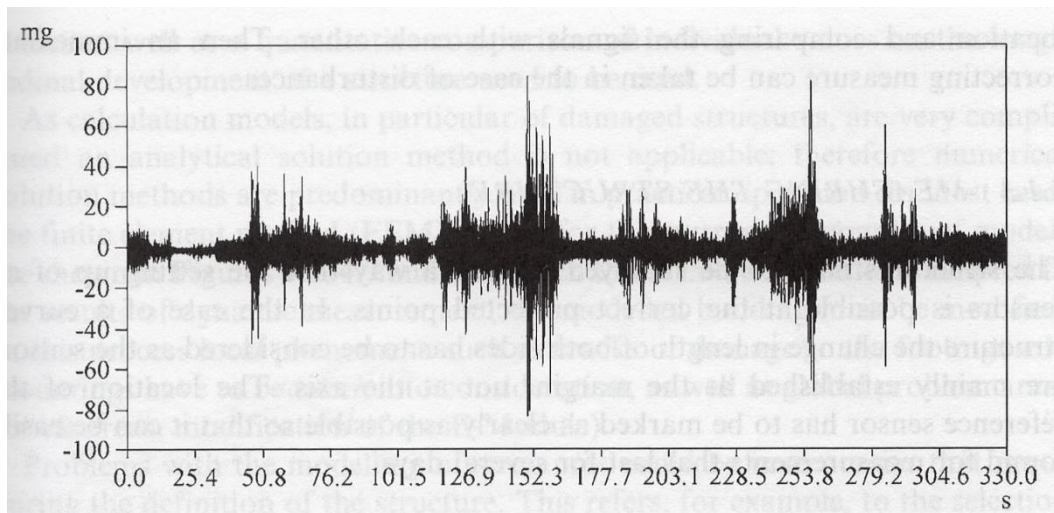
tem sind spezielle höhere Anforderungen an die Robustheit des Systems zu stellen damit eine dauerhafte Versorgung möglich ist. Zusätzlich ist ein Schutzkonzept gegen Vandalismus erforderlich.

## 15.2 Vibrationen

Die ständige Anregung von Schwingungen bei Brückenbauwerken wird zum einen durch den Wind als auch durch den darüber fließenden Verkehr hervorgerufen. Dabei ist schon bei der Konstruktion von Brückenbauwerken darauf zu achten, dass die Resonanzfrequenz der Brücke durch die Frequenzen der Anregungen nicht aufeinander liegen, da es sonst zu extremen Schwingungen bis hin zur Zerstörung von Brücken kommen kann. Beispielfhaft darf nach der StVO §27 Abs. 6 nicht im Gleichschritt auf Brücken marschiert werden da die Frequenz in kritischen Bereichen liegen kann. Die Anregungsfrequenzen von Straßenlasten liegen geschwindigkeitsabhängig im Bereich von 2 - 4 Hz [53].

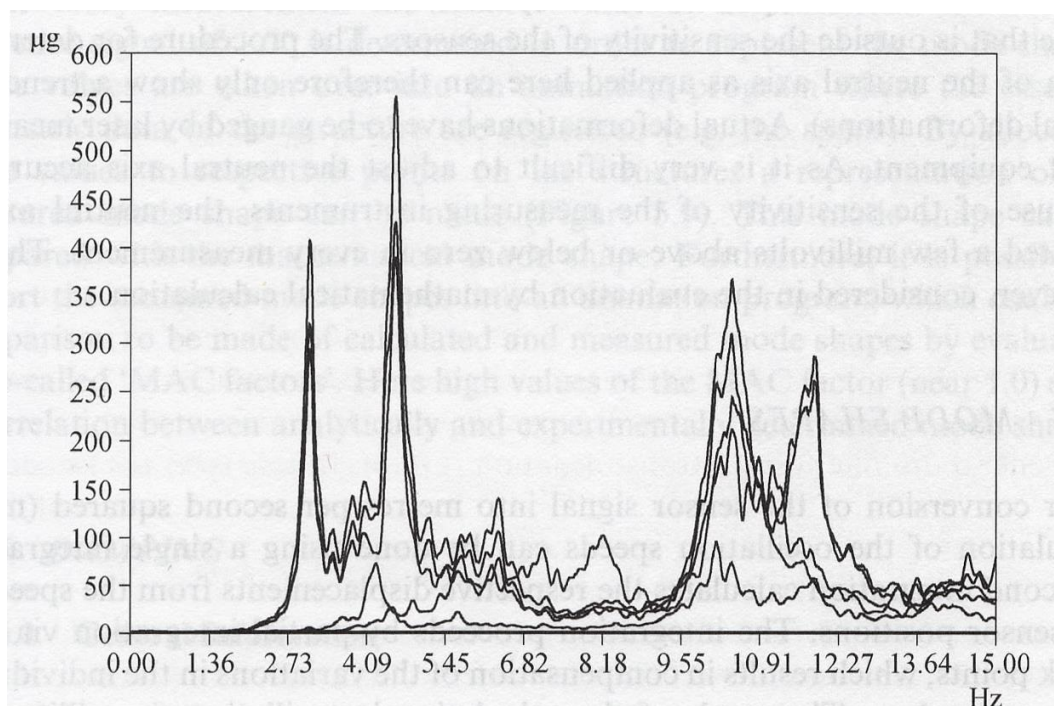
Schwingungen treten vor allem beim Hauptträger (Auflage für Fahrbahnplatte) und/oder dessen Fahrbahnplatte, bei einzelnen schlanken Konstruktionselementen sowie an Seilen als Seilschwingungen auf. Für die Auslegung der Brücke sind aufgrund der Größenordnung vor allem die dynamischen Belastungen von schweren Fahrzeugen entscheidend, die jedoch für die dauerhafte Energieversorgung aufgrund des sporadischen Vorkommens nicht geeignet sind [53].

Die Eigenfrequenzen von Brücken hängen von vielen Parametern wie Tragsystem, Querschnittsgestaltung, verwendete Baustoffe, konstruktive Durchbildung, Lagerungsbedingungen, usw. ab [53]. Für die Ermittlung der Eigenfrequenzen ist eine Modalanalyse notwendig. Dazu wird die Beschleunigung über einen längeren Zeitraum von mehreren Beschleunigungssensoren erfasst. Ein Ausschnitt einer solchen Messung ist in **Bild 15.1** dargestellt. Auf der Ordinate ist die Beschleunigung der Sensoren jeweils als vielfaches der Gravitationskonstante  $g$  aufgezeichnet.



**Bild 15.1** Typische vertikale Beschleunigungen eines Brückenbauwerkes [52]

Mittels einer Fourier-Transformation wird aus diesen Daten das Vibrationsspektrum der einzelnen Sensoren berechnet. Die Vibrationsspektren lassen sich dadurch in so genannten Frequenz-Beschleunigungsdiagrammen darstellen. Für ein Brückenbauwerk ist dies in **Bild 15.2** dargestellt:



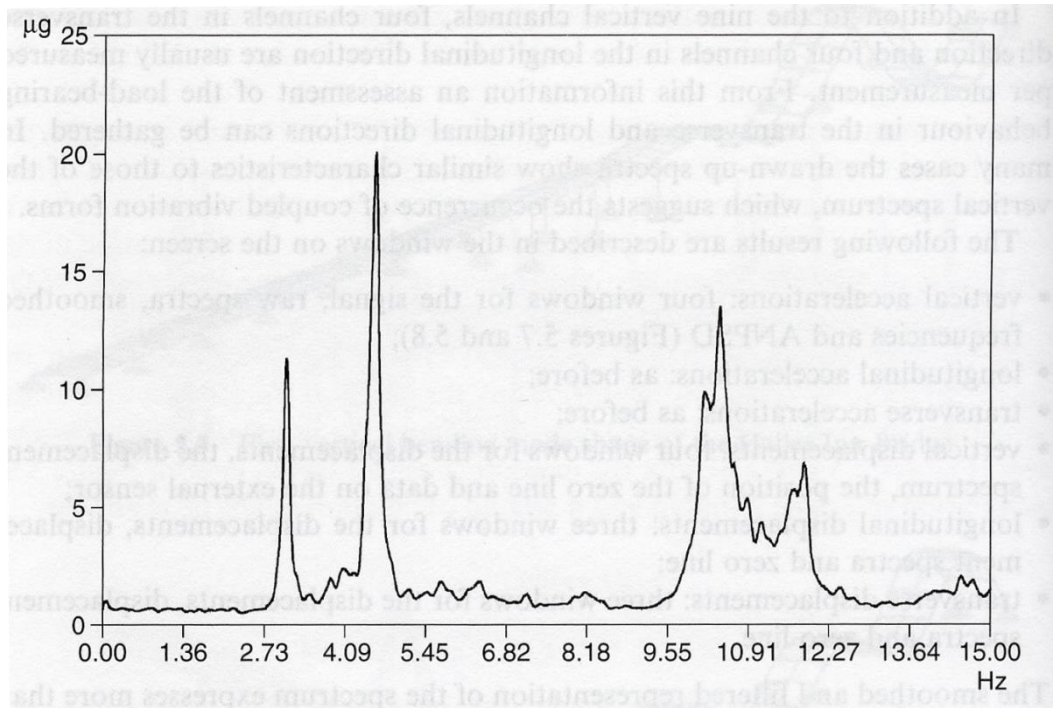
**Bild 15.2** Aufbereitetes Vibrationsspektrum (Averaged power spectral density - APSD) eines Brückenbauwerkes [52]

Aus diesen Daten wird nach Gleichung (15.1) und Gleichung (15.2) die gemittelte und normierte spektrale Leistungsdichte (Averaged normalized power spectral density – ANPSD) berechnet.

$$APSD(f_k) = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i(f_k) \right)^2 \quad (15.1)$$

$$ANPSD(f_k) = \frac{APSD(f_k)}{APSD_{\max}} \quad (15.2)$$

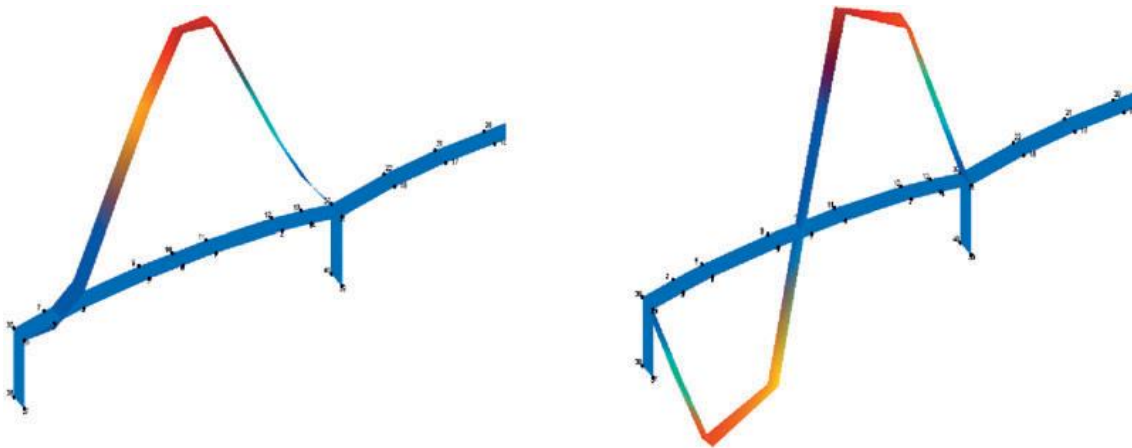
Diese spektrale Leistungsdichte ist in **Bild 15.3** dargestellt.



**Bild 15.3** ANPSD eines Brückenbauwerkes [52]

Mit Hilfe von **Bild 15.3** besteht die Möglichkeit die effizient nutzbaren Frequenzen für das Design von vibrationsbasierten Energy Harvestern abzulesen. Die Ausschläge bei bestimmten Frequenzen liegen in der Nähe der jeweiligen Brückeneigenfrequenzen [52]. Aus dem dargestellten Bild lässt sich erkennen, dass die Energy-Harvester auf eine Frequenz zwischen 0 Hz und 15 Hz optimiert werden sollten. Dieses Spektrum der Vibrationsmessung ist typisch für Brückenbauwerke, sodass generell niedrige Erregungsfrequenzen nutzbar zu machen sind.

Für die Nutzung von vibrationsbasierten Energy-Harvestern ist jedoch auch die Position des Sensorknotens auf der Brücke entscheidend. Dies soll mit Hilfe von **Bild 15.4** verdeutlicht werden



**Bild 15.4** Stark überhöhte Eigenformen einer Autobahnbrücke zur Bestimmung der Frequenzen und der optimalen Aufstellungsorte [54]

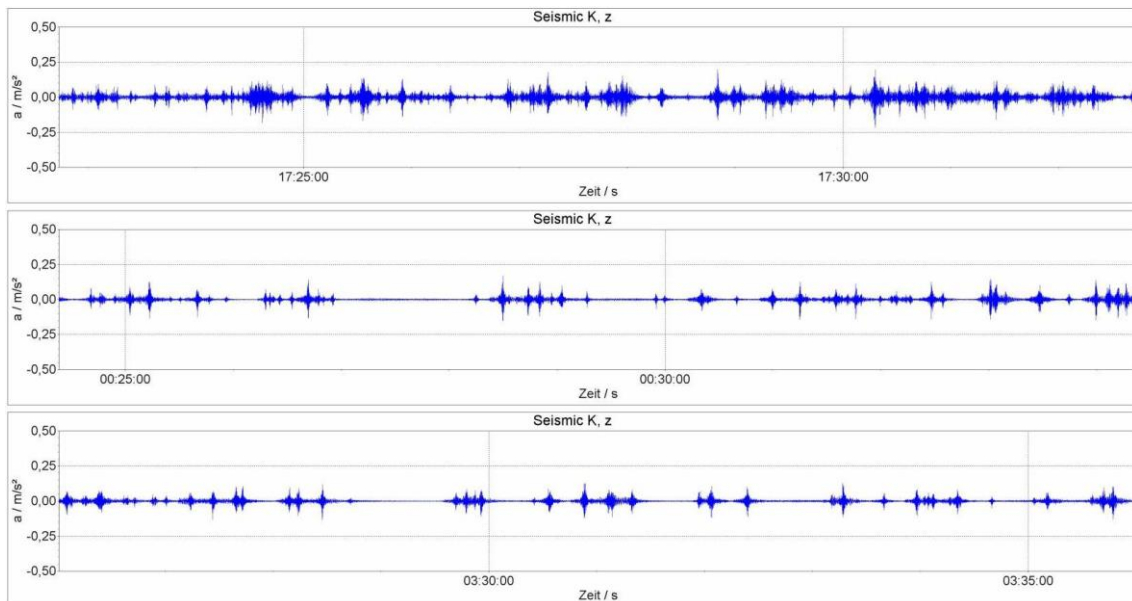
Mit Hilfe von **Bild 15.4** wird deutlich, dass die unterschiedlichen Eigenmoden, hier am Beispiel von zwei Moden dargestellt, an unterschiedlichen Positionen im Brückenbauwerk ihr Maximum besitzen.

Die Auslenkung bzw. Vibration an dem jeweiligen Standort muss das System des Piezo-Generators in Schwingungen versetzen. Dazu muss genügend Energie an dieser Position zur Verfügung stehen. Sowohl **Bild 15.2** als auch **Bild 15.4** machen die Positionsabhängigkeit der Anregung mittels Vibration deutlich. Das bedeutet, dass positionsabhängig am Brückenbauwerk unterschiedliche Moden entstehen und damit das System auf andere Resonanzfrequenzen abgestimmt werden muss. Des Weiteren ist zu sehen, dass beispielsweise an und um Brückenpfeiler nur sehr geringe Schwingungen auftreten, sodass dort keine Vibrationswandler eingesetzt werden können. Dadurch kommt es zu dem Fall, dass die Sensorik an Orten platziert wird an denen keine Anregung der Piezo-Generatoren erfolgt und somit diese Abstände mit Leitungen überbrückt werden müssten.

Für die Auslegung ist somit ein Optimierungsproblem zu lösen. Mit steigender Frequenz der Moden wird der Piezo-Generator häufiger angeregt, jedoch sinkt die Amplitude der Auslenkung. Für die Leistungsberechnung nach Formel (14.7) ist daher eine positionsabhängige vorherige Analyse und Simulation z. B. mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode für jede Brücke im Einzelfall (Einzelfallprüfung) notwendig.

Ein großer Vorteil der piezo-elektronischen Versorgung liegt, im Vergleich mit PV und vor allem TEG, in der saisonal konstanteren Anregung des Brückenbauwerks durch den Verkehr und Wind. Die Anregung und damit auch die Erzeugung besitzen jedoch ebenfalls eine zeitliche Abhängigkeit. Beispielhaft ist in **Bild 15.5** die Beschleunigung zu

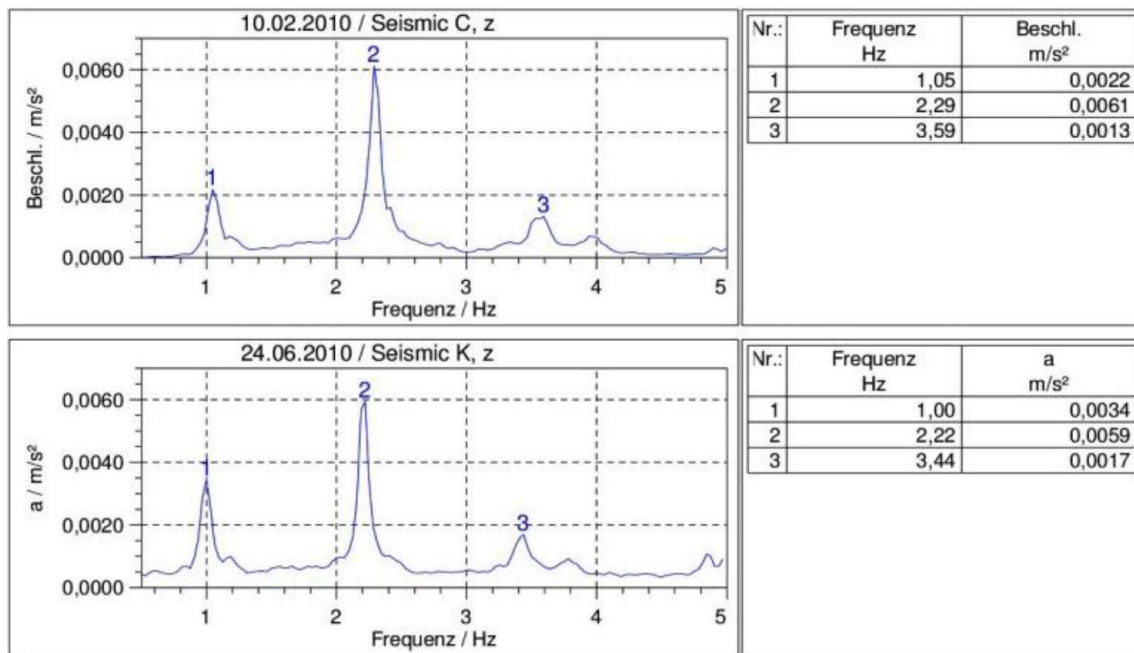
drei Messpunkten aufgetragen.



**Bild 15.5** Beschleunigungsmessungen zu drei Zeitpunkten

In **Bild 15.5** ist die unterschiedliche Anregung durch Verkehr zu drei Zeitpunkten aufgetragen. Dabei ist zu sehen, dass eine Anregung in der Nacht deutlich sporadischer vorkommt und somit die erzeugbare Energie ebenfalls geringer ist. Ebenfalls ist ein unterschied in der Versorgung zwischen Werktagen und Wochenenden, begründet z. B. durch das Fahrverbot von Lastkraftwagen, zu erwarten.

Neben diesen Schwingungen unterliegt das Vibrationsspektrum des Bauwerkssystems temperaturabhängigen Einflüssen. Die Ergebnisse in **Bild 15.6** zeigen, dass eine saisonale Verschiebung der Resonanzfrequenzen des Brückenbauwerks auftritt.



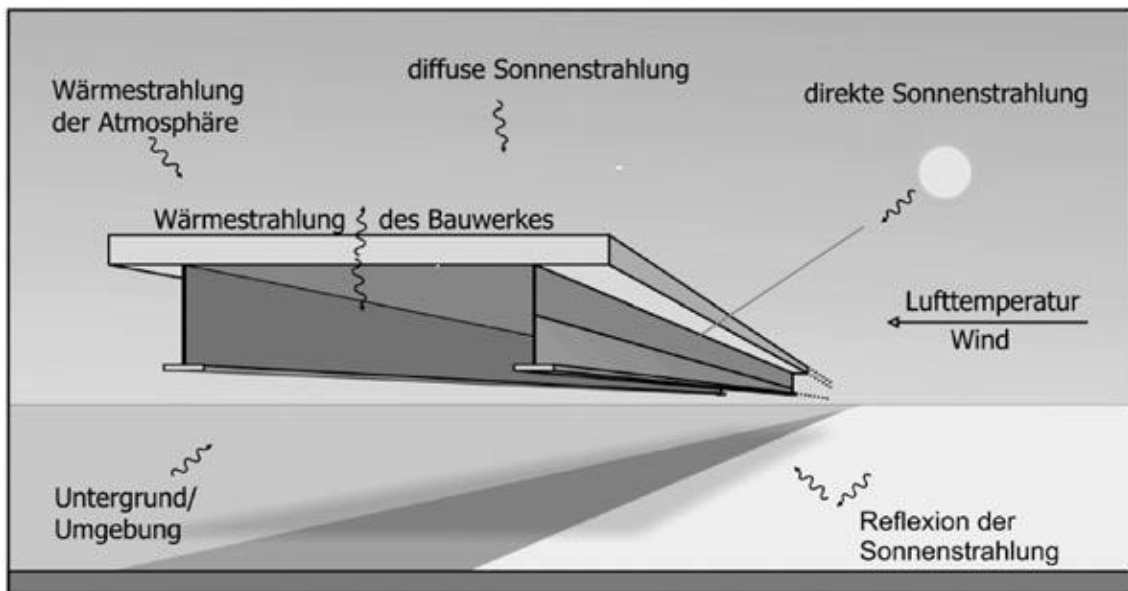
**Bild 15.6** Saisonaler Drift der Resonanzfrequenzen eines Brückenbauwerks

Das **Bild 15.6** zeigt den saisonalen Drift der Resonanzfrequenzen des überwachten Brückenbauwerks. Der Abstand wird dabei mit steigender Frequenz der sich ausbreitenden Schwingung immer größer. Im besten Fall erfolgt die Verschiebung der Resonanzfrequenz des Energy Harvesting Systems aufgrund der Temperaturänderung um die selbe Frequenz. Im schlechtesten Fall laufen die Resonanzfrequenzen der Brücke und des Harvesting Systems auseinander und es könnte, für eine optimale Energieausbeute, aufgrund der schmalbandigen Verstärkung eine Nachjustierung erforderlich werden. Wie groß die Verschiebung der Frequenzen aufgrund von Temperaturschwankungen auch in Abhängigkeit des Brückenbauwerks für die Energiebereitstellung sind, kann in diesem Forschungsprojekt nicht bewertet werden.

Der große Vorteil der Versorgung mit Piezo-Generatoren ist die saisonal konstante Anregung des Bauwerks und damit eine gleichmäßigere Energiebereitstellung. Der große Nachteil ist die notwendige vorherige Modellierung des Bauwerks zur Erfassung sich ausbildender Resonanzfrequenzen und die starke Ortsabhängigkeit aufgrund der sich ausbildenden Moden. Zusätzlich ist die Optimierung und Anpassung des Energy Harvesters auf eine Resonanzfrequenz am Bauwerk mit viel Aufwand verbunden, sodass keine „Plug and Play“ Möglichkeit besteht.

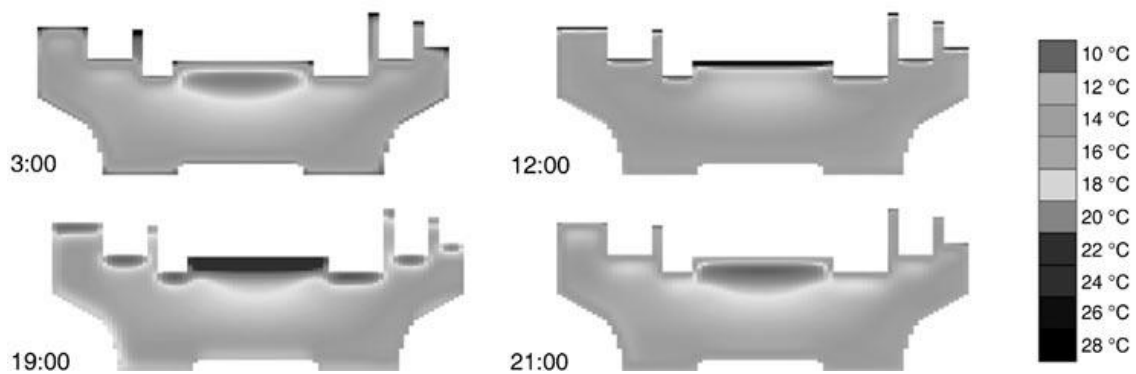
### 15.3 Temperaturdifferenzen an Brückenbauwerken

An Brückenbauwerken treten sowohl lineare als auch nichtlineare Temperaturgefälle auf, die bei der Konstruktion aufgrund der entstehenden Dehnungsspannungen berücksichtigt werden müssen [55]. Diese Temperaturunterschiede entstehen aufgrund von meteorologischen Randbedingungen, wie in **Bild 15.7** dargestellt.



**Bild 15.7** Meteorologische Randbedingungen an Brückenbauwerken [10]

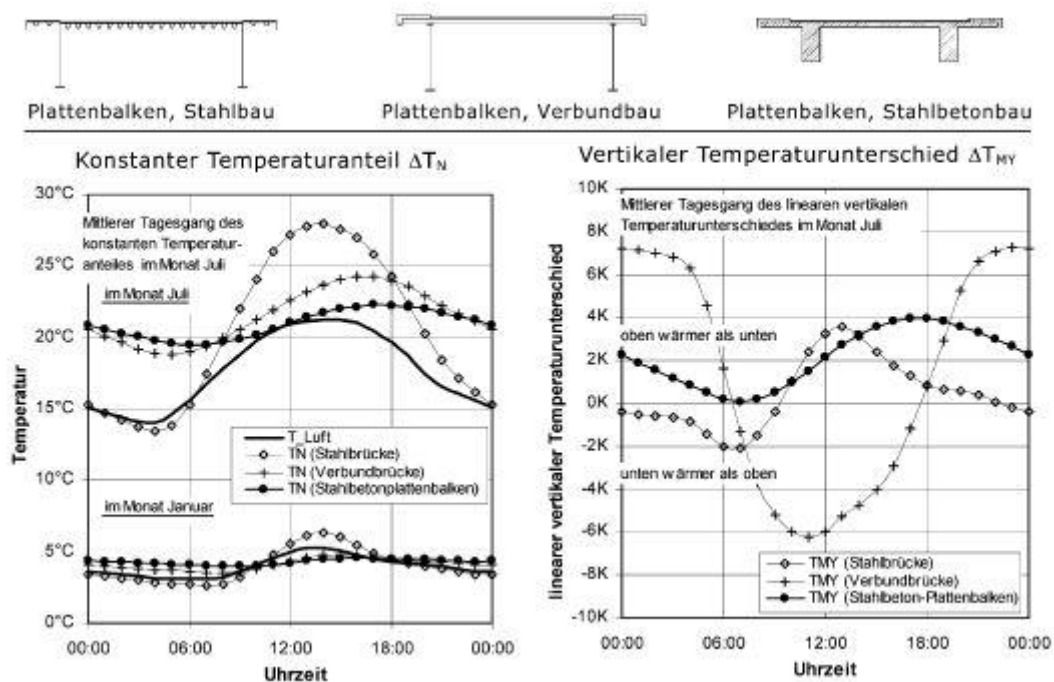
Wie **Bild 15.7** zeigt, wird die Temperatur durch diverse Klimaeinwirkungen, Ausrichtung der Brücke, Umgebungsbedingungen, usw. bestimmt. Die im Bauwerk auftretende Temperaturverteilung hängt dabei aufgrund der wirksamen physikalischen Effekte von verschiedensten Parametern, wie Materialeigenschaften, Geometrie, usw. ab und ist genau nur mit Hilfe von diffizilen Modellen zu bestimmen. Aufgrund der täglichen und saisonalen schwankenden Energiezuführung ist eine allgemeine Aussage über die Temperaturniveaus innerhalb einer Brücke schwer zu Beurteilen. Beispielhaft wird in **Bild 15.8** die zeitabhängige Temperaturentwicklung einer Spannbeton-Eisenbahnbrücke an einem Tag im Querschnitt dargestellt.



**Bild 15.8** Zeitabhängiges Temperaturprofil einer Spannbeton-Eisenbahnbrücke [53]

Dabei zeigt sich, dass im Laufe eines Tages durchaus Temperaturdifferenzen an der Brücke vorkommen die zum Betrieb von TEG ausreichend sind.

Für die Nutzung sind sowohl Wärmequelle als auch Wärmesenke entscheidend, dabei stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Die erste Möglichkeit ist die Brücke als Wärmequelle zu nutzen und mittels Konvektion die Wärme an die Umgebung abzugeben bzw. im Umgekehrten Fall die Nutzung der Brücke als Wärmesenke bei der Umgebungstemperatur als Wärmequelle. Die zweite Möglichkeit ist die Temperaturunterschiede innerhalb des Brückenbauwerks auszunutzen. Die Potentiale für unterschiedliche Konstruktionen sind in **Bild 15.9** exemplarisch dargestellt. Dabei sind die Brückentemperatur mit  $T_N$  und der vertikale Temperaturunterschied innerhalb der Brücke mit  $\Delta T_{MY}$  definiert.



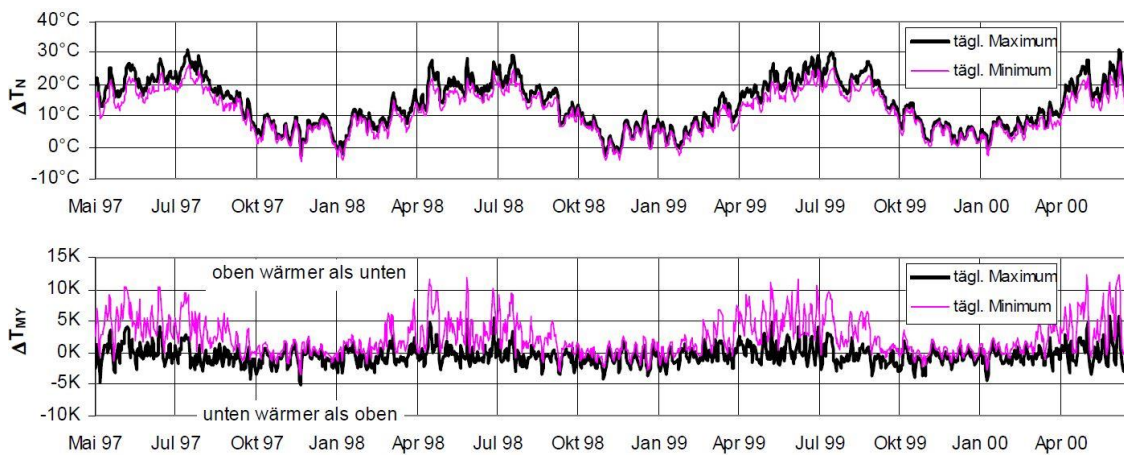
**Bild 15.9** Gemittelte Tagesgänge der Ersatztemperaturverteilungen  $T_N$  und  $\Delta T_{MY}$  eines



Plattenbalkenquerschnitts in Stahl-, Verbund- und Betonbauweise [53]

In **Bild 15.9** ist zu sehen, dass im Juli durchaus tageszeitabhängig Potentiale zur Nutzung vorhanden sind, jedoch im Januar die gemittelte Temperaturdifferenz zu gering ist um TEG betreiben zu können. Die vertikale Temperaturdifferenz zeigt abhängig von den eingesetzten Materialien bzw. der Bauweise starke Unterschiede in den Charakteristiken. Für eine dauerhafte Versorgung mit TEG sind die Temperaturdifferenzen jedoch zu gering, da bei allen Brücken Zeitpunkte vorhanden sind in denen die Temperaturdifferenzen nahe 0 K liegen.

Über den Zeitraum von drei Jahren sind für eine Stahlbetonbrücke die Brückentemperatur und die täglichen Minima sowie Maxima in **Bild 15.10** aufgetragen.



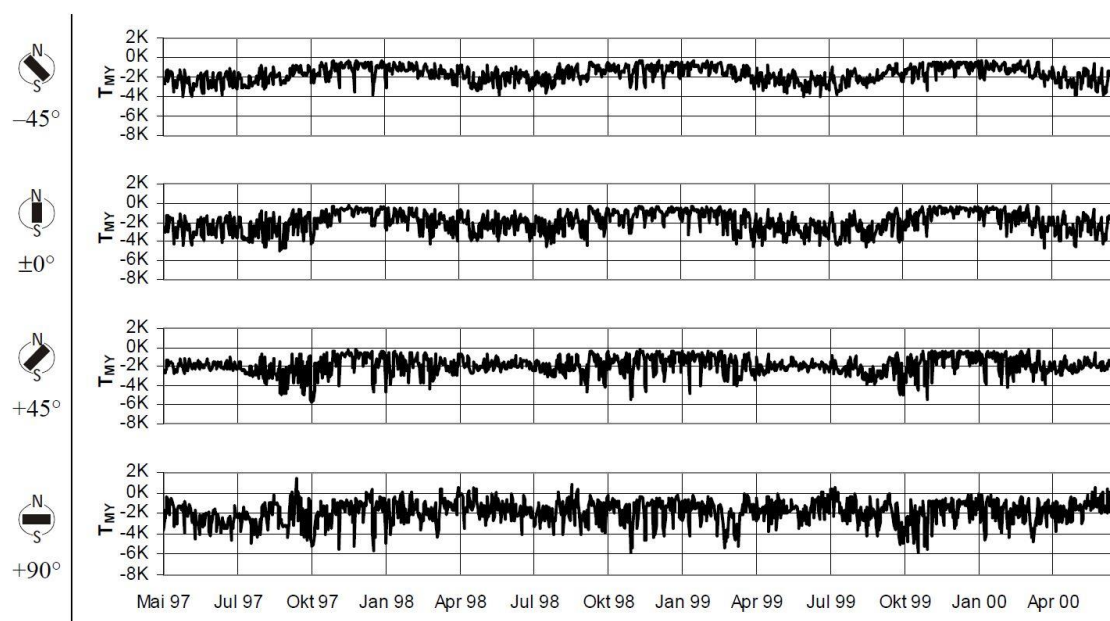
**Bild 15.10** Simulation der Extremwerte verschiedener Temperaturanteile einer Stahlbetonbrücke [53]

Die Brückentemperatur zeigt, wie auch in **Bild 15.9** zu sehen ist, dass in den Sommermonaten die größten täglichen Schwankungen vorhanden sind. Der Vergleich der Baumaterialien in **Bild 15.9** zeigt für die Stahlbetonbrücke das trägste Ausgleichsverhalten auf Temperatureinwirkungen von außen. Somit sind für die sommerlichen täglichen Schwankungen größere Temperatureinwirkungen notwendig, um die zur Versorgung thermoelektrischer Generatoren notwendigen Temperaturdifferenzen aufzubringen. Im Winterhalbjahr sind hingegen kaum Abweichungen zwischen der minimalen und maximalen Bauwerkstemperatur vorhanden. Sodass nur geringe Temperatureinflüsse auf das Bauwerk einwirken, die nicht das Potential für ein zuverlässige Nutzung bieten.

Für die minimalen und maximalen vertikalen Temperaturunterschiede zeigt sich generell, dass in den Sommermonaten die Bauwerkstemperatur oben wärmer ist als unten, während im Winterhalbjahr es unten wärmer ist als oben. Ebenfalls ist in **Bild 15.9** zu

sehen, dass die Differenz zwischen dem minimalen und maximalen vertikalem Temperaturunterschied in den Wintermonaten sehr gering ist. Dieses niedrige Niveau der Temperaturunterschiede bietet nicht die Möglichkeit zur zuverlässigen Energieversorgung thermoelektrischer Generatoren. Für eine Stahl- und eine Verbundbrücke sind die Kurven im Anhang dargestellt. Die Stahlbrücke reagiert viel schneller auf Umwelteinflüsse und besitzt dadurch ein unterschiedliches Potential zur Nutzung von TEG.

Wie bereits erwähnt besitzt auch die Ausrichtung des Bauwerks aufgrund des Sonnen-Azimet-Winkels einen Einfluss auf die auftretenden vertikalen Temperaturdifferenzen, was in **Bild 15.11** für eine Stahlbrücke über drei Jahre dargestellt wird.



**Bild 15.11** Jahresgänge des negativen vertikalen Temperaturunterschiedes bei unterschiedlichen Brückenausrichtungen [53]

Der Vergleich der Kurven in **Bild 15.11** zeigt welchen Einfluss die Ausrichtung auf die vertikale Temperaturdifferenz besitzt. Bei einem Bauwerksazimetwinkel von  $-45^\circ$  liegt dabei nie ein höherer negativer Temperaturunterschied als  $-4\text{ K}$  vor, wohingegen er bei einem Azimetwinkel von  $+45^\circ$  bis zu  $-6\text{ K}$  erreichen kann. Des Weiteren ist zu sehen, dass eine Ausrichtung mit  $+90^\circ$  höhere Ausschläge als eine Ausrichtung von  $\pm 0^\circ$  hervorruft.

Für die Auslegung von Brückenbauwerken werden charakteristische Werte hinzugezogen die im Mittel alle 50 Jahre einmal erreicht oder überschritten werden. Für Hohl- oder Vollquerschnitt-Brückenpfeiler von Spannbeton oder Stahlbeton wird dafür ein Wert von  $5\text{ K}$  zwischen den gegenüberliegenden Außenflächen angegeben [55]. Dieser

geringe charakteristische Wert macht deutlich, dass an Brückenpfeilern ebenfalls nicht die Potentiale zur Versorgung von TEG zur Verfügung stehen.

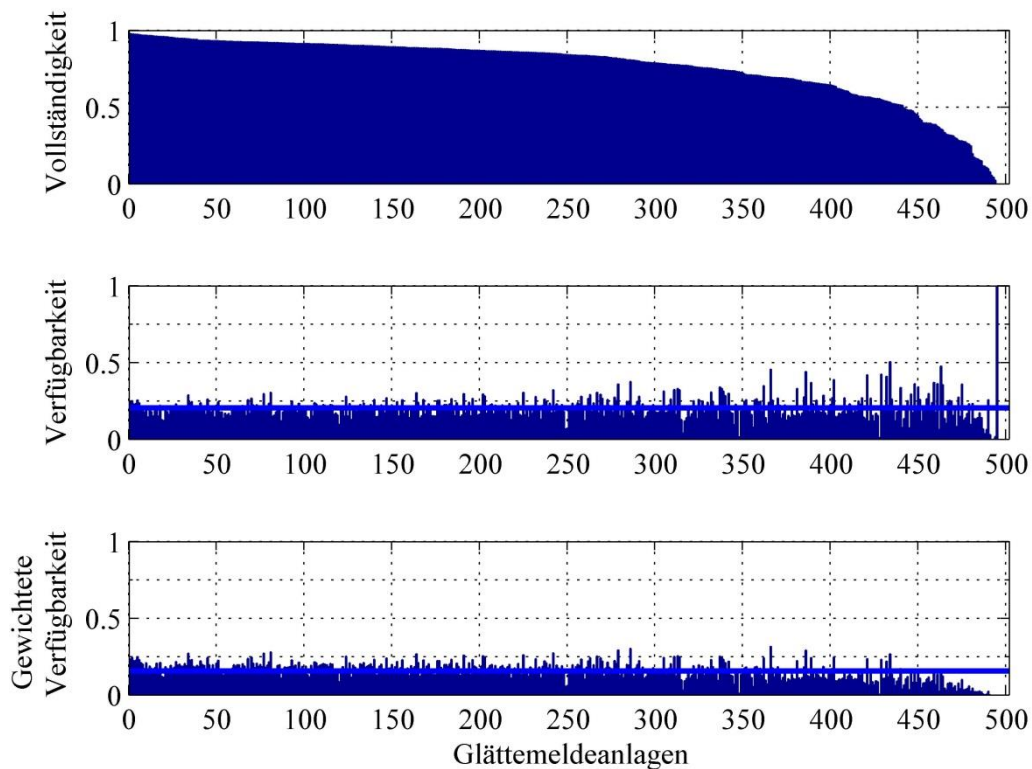
### 15.3.1 Auswertung realer Temperaturmesskurven

Für die Ermittlung des Einsatzpotentials von TEG werden vom Deutschen Wetterdienst gelieferten Messdaten von 592 Glättemeldeanlagen (GMA) aus den Bundesländern Bayern (246), Nordrhein-Westfalen (194), Schleswig-Holstein (96) und Thüringen (56) über den Zeitraum von zwei Jahren ausgewertet. Nach Abzug unvollständiger Datensätze bleiben noch 502 Datensätze erhalten die für eine Bewertung nutzbar sind.

Dabei ist die Belagstemperatur aufgezeichnet worden, die, wie aus **Bild 15.8** abgeleitet werden kann, den größten Temperaturgradienten über den Tagesgang aufweist.

TEG erzeugen in Abhängigkeit der vorhandenen Temperaturdifferenz elektrische Leistung. Bei der Nutzung dieser Leistung gibt es Anschwellen ab denen die dahinter liegenden Baugruppen die erzeugte Eingangsspannung erkennen und für eine Energieversorgung des Sensorknotens umsetzen können. Die Auswertung der Temperaturdaten zur Nutzung von TEG ist im ersten Schritt für die Temperaturdifferenzen 3 K, 5 K und 10 K untersucht worden.

Die Vollständigkeit der Temperaturdaten (Differenz aus Umgebungstemperatur und Belagstemperatur) ist im vorhandenen Messzeitraum von zwei Jahren über den einzelnen GMA unterschiedlich. In **Bild 15.12 a** ist sie über alle 502 GMA absteigend sortiert aufgetragen.



**Bild 15.12 a)** Vollständigkeit der Messdaten **b)** Verfügbarkeit der Energieversorgung **c)** gewichtete Verfügbarkeit der Energieversorgung über alle GMA

Überschreitet die Temperaturdifferenz die festgelegte Ansprechschwelle ist der potentielle Sensorknoten verfügbar. Die abgeleitete Verfügbarkeit der Energieversorgung aufgrund der Temperaturdifferenzen an den einzelnen GMA ergibt einen Wert zwischen 1 (100 prozentige Versorgung) und 0 (keine Versorgung). In **Bild 15.12 b** ist die Verfügbarkeit der Energieversorgung für alle 502 GMA bei einer Ansprechschwelle von 5 K aufgetragen. Der Mittelwert über alle GMA ergibt dabei eine Verfügbarkeit der Energieversorgung von 0,205. D. h., dass 20,5 % der Zeit eines Jahres die Energieversorgung durch TEG zur Verfügung steht. Für eine Temperaturdifferenz von 3 K stellt sich ein Wert von 0,349 und für 10 K 0,083 ein.

In dieser Betrachtung sind die Zeiten in denen keine Messwerte vorhanden sind nicht mit einbezogen. D. h. wenn wie bei Glättemeldeanlage 495 nur ein Wert vorhanden ist und dieser die Ansprechschwelle wie vorhanden überschreitet, ergibt die Auswertung eine 100 prozentige Verfügbarkeit der Energieversorgung eines Sensorknotens durch einen thermoelektrischen Generator. Um eine solche Fehlinterpretation der Ergebnisse zu vermeiden erfolgt eine Gewichtung der Verfügbarkeit der Energieversorgung mit Hilfe

der Vollständigkeit der Messdaten nach Formel (15.3).

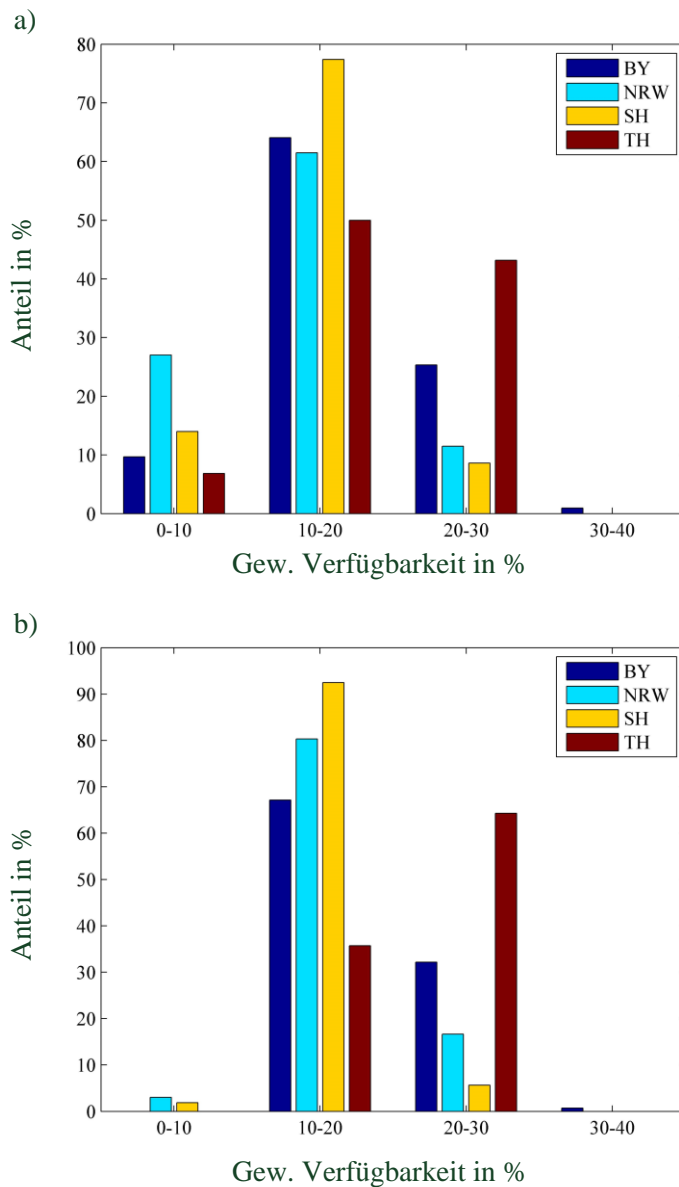
$$\text{gew. Verfügbarkeit}_{\text{ite GMA}} = \text{Verfügbarkeit}_{\text{ite GMA}} * \text{Vollständigkeit}_{\text{ite GMA}} \quad (15.3)$$

Diese gewichtete Verfügbarkeit der Energieversorgung ist in **Bild 15.12 c** dargestellt. Dadurch stellt sich ein Mittelwert der gewichteten Verfügbarkeit über alle GMA ein, der bei einer Ansprechschwelle von 5 K bei 0,156 liegt.

Für eine bundeslandabhängige Auswertung wird die gewichtete Verfügbarkeit der Energieversorgung in Klassen eingeteilt. Dabei ergeben sich für die Temperaturmessungen in den vier Bundesländern folgende Werte.

Ansprechschwelle 5 K	Mittelwert der gew. Verfügbarkeit	Mittelwert der Vollständigkeit	Anzahl	0-10 %	10-20 %	20-30 %	30-40 %
Gesamt	0,156	0,752	502	77	324	99	2
Bayern	0,172	0,781	217	21	129	55	2
Nordrhein-Westfalen	0,134	0,701	148	40	91	17	0
Schleswig-Holstein	0,145	0,759	93	13	72	8	0
Thüringen	0,174	0,792	44	3	22	19	0

Eine prozentuale Darstellung der gewichteten Verfügbarkeit der Energieversorgung aller GMA ist in **Bild 15.13 a** vorhanden.

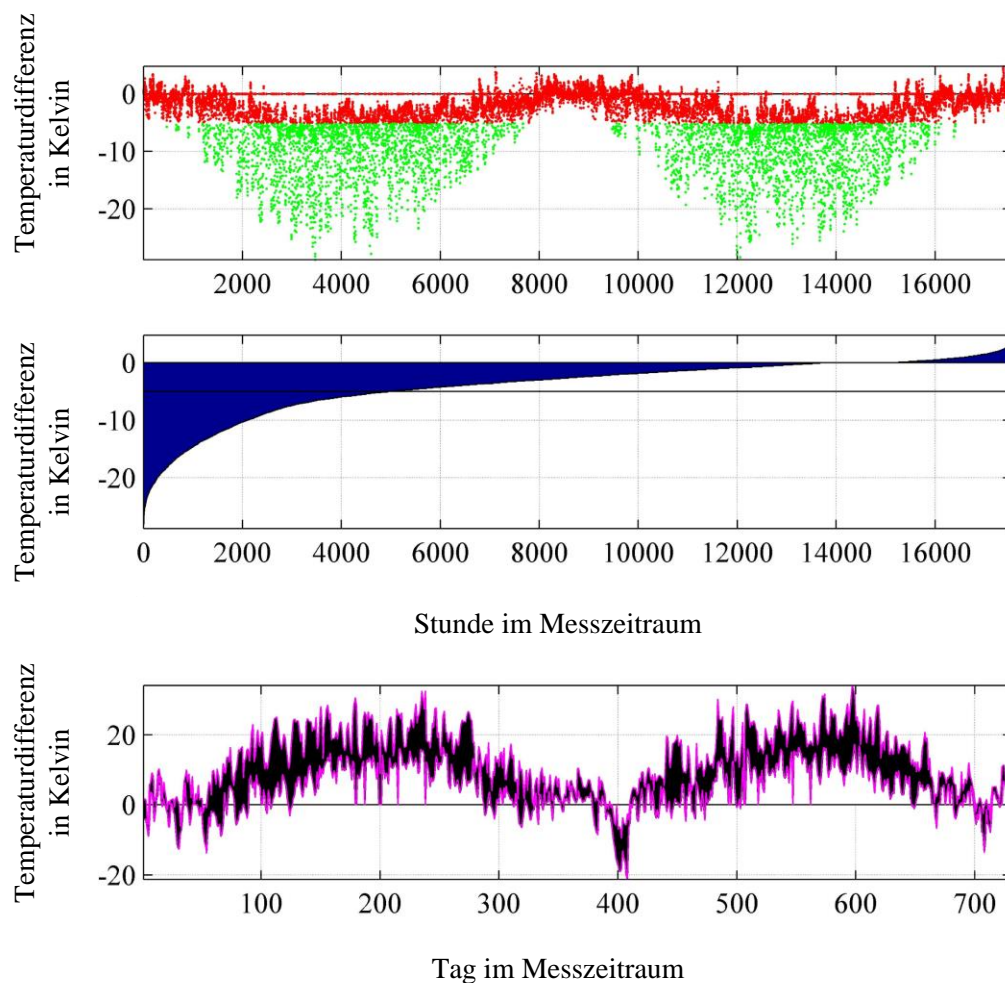


**Bild 15.13** Prozentual gewichtete Verfügbarkeit in BY, NRW, SH und TH bei **a)** allen Messdaten **b)** bei Messdaten > 80 % Vollständigkeit

In **Bild 15.13 a** ist zu sehen, dass die Bundesländer Bayern und Thüringen insgesamt eine höhere Anzahl an Standorten mit geringfügig höherer gewichteter Verfügbarkeit besitzen als die Bundesländer Schleswig-Holstein und Nordrhein-Westfalen. Der hohe Ausschlag der gewichteten Verfügbarkeit zwischen 0 - 0,1 in Nordrhein-Westfalen ist durch die geringere Vollständigkeit der Messdaten zu begründen. **Bild 15.13 b** zeigt die gewichtete Verfügbarkeit aller GMA die eine Vollständigkeit der Messdaten von mehr als 80 % besitzen. Dieses sind, wie auch mit Hilfe von **Bild 15.12 a** schätzbar ist, 290 GMA. Der Vergleich zwischen **Bild 15.13 a** und **b** zeigt daher eine deutliche Reduktion an Anlagen mit einer gewichteten Verfügbarkeit zwischen 0 - 0,1. Generell

bleibt jedoch der Trend erkennbar, dass bundeslandunabhängig nahezu alle Standorte eine Verfügbarkeit zwischen 10 bis 30 % des Jahres besitzen. Zusätzlich ist eine Tendenz in den Bundesländern Bayern und Thüringen zu einer höheren Anzahl an Standorten mit einer Verfügbarkeit der Energieversorgung zwischen 20 bis 30 % des Jahres vorhanden als in den Bundesländern Nordrhein-Westfalen und Schleswig-Holstein.

**Bild 15.14 a** zeigt den aufgelösten Verlauf der Temperaturdifferenzen einer GMA die eine gewichtete Verfügbarkeit der Energieversorgung von 0,3 besitzt. Dabei sind alle Zeitpunkte in denen keine Versorgung eines Sensorknötens möglich ist rot markiert und diejenigen in denen eine Versorgung erfolgen könnte grün markiert. Es zeigt sich, dass über das ganze Jahr immer wieder Zeitpunkte auftreten in denen keine Versorgung möglich ist. Die Messwertaufnahme beginnt dabei im Januar des ersten Jahres und endet im Dezember des zweiten Jahres. Dabei ist zu sehen, dass im Sommerhalbjahr höhere Temperaturdifferenzen zwischen Belags- und Umgebungstemperatur vorliegen. Ebenfalls ist zu sehen, dass in den Wintermonaten gar keine Energieversorgung mit TEG möglich ist, da die Temperaturdifferenzen zu keinem Zeitpunkt die Ansprechschwelle überschreitet. Für eine kontinuierliche Versorgung des Sensorknötens wird somit ein Speichermedium in einer Dimension benötigt, um diese starken saisonalen Schwankungen ausgleichen zu können.



**Bild 15.14** a) GMA Temperaturdifferenz, b) Temperaturdifferenz sortiert c) tägliche Mini und Maxima der Temperaturdifferenz

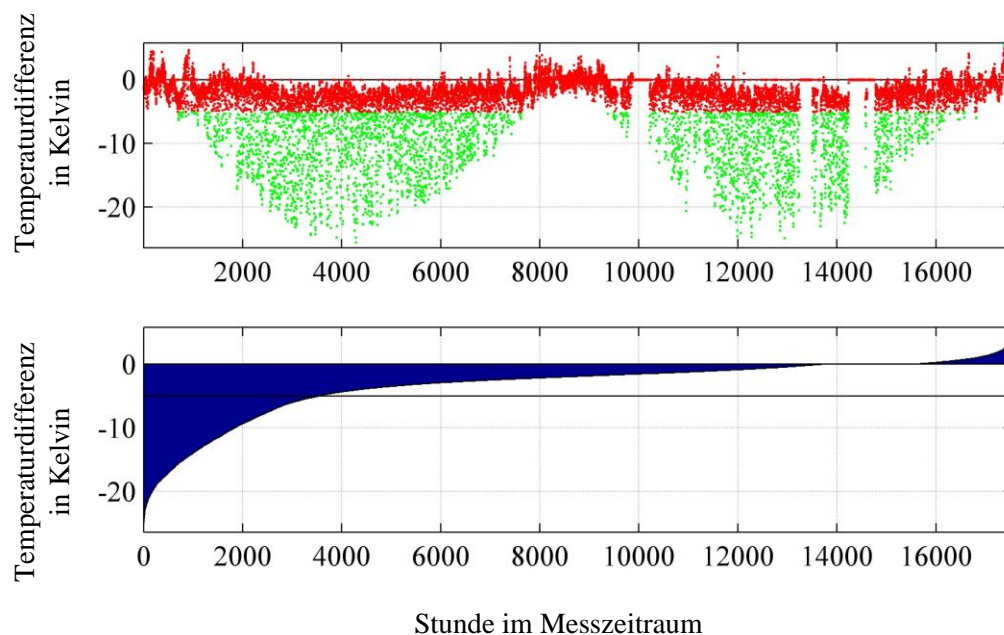
**Bild 15.14 b** zeigt aufsteigend sortiert die Temperaturdifferenz zu den stündlichen Messzeitpunkten innerhalb des zweijährigen Messzeitraums. Damit wird deutlich aufgezeigt, dass bei der gewählten Ansprechschelle von 5 K, die Zeitpunkte die nicht für eine Versorgung zur Verfügung stehen deutlich überwiegen (Verfügbarkeit 0,3). Ebenfalls wird deutlich, dass nur wenige Zeitpunkte vorhanden sind die sehr deutlich über der Ansprechschwelle liegen und damit beispielsweise zum Laden des Speichers genutzt werden könnten.

Für die Bewertung der Daten ist der Vergleich der Brückenbauwerkstemperaturen mit denen der GMA erforderlich. Die bisherigen Überlegungen haben gezeigt, dass die vertikalen Temperaturdifferenzen in Brückenbauwerken nicht für eine Versorgung mit TEG ausreichen. Die ausgewerteten Daten der GMA untersuchen die Potentiale für eine Versorgung direkt angestrahlter Bauwerksflächen (Belag) in Bezug auf die Lufttemperatur. Dabei zeigen sich starke saisonale Schwankungen und somit eine starke Ein-



schränkung des Einsatzpotentials. Die letzte Art der Überlegung ist die Bauwerkstemperatur nicht angestrahlter Flächen gegen die Lufttemperatur zu betrachten um über die Trägheit der thermischen Energiespeicher der Brückenbauwerke Einsatzzeiten und Potentiale aufzuzeigen. Dafür sind in **Bild 15.14 c** die täglichen Mini- und Maxima der Temperaturdifferenz aufgetragen. Diese Temperaturschwankungen wirken direkt auf den Bauwerkskörper und sorgen in Abhängigkeit der thermischen Energiespeicher des Bauwerks für einen Temperaturunterschied. Sowohl Bild 15.8 als auch **Bild 15.9** zeigen, dass die Brückenbauwerkstemperatur über den Tag nur geringen Schwankungen unterliegt. Bei großen Temperaturschwankungen der Luft im Lauf eines Tages sind daher ebenfalls Zeitpunkte vorhanden die eine Versorgung mittels TEG ermöglichen. Diese Schwankungen sind, wie **Bild 15.14 c** zeigt, ebenfalls saisonal sehr unterschiedlich und somit sind auch die Versorgungspotentiale nur in Sommermonaten vorhanden.

Im Folgenden sind für zwei weitere Standorte von GMA mit einer gewichteten Verfügbarkeit von 0,2 bzw. 0,12 die Messwerte dargestellt.

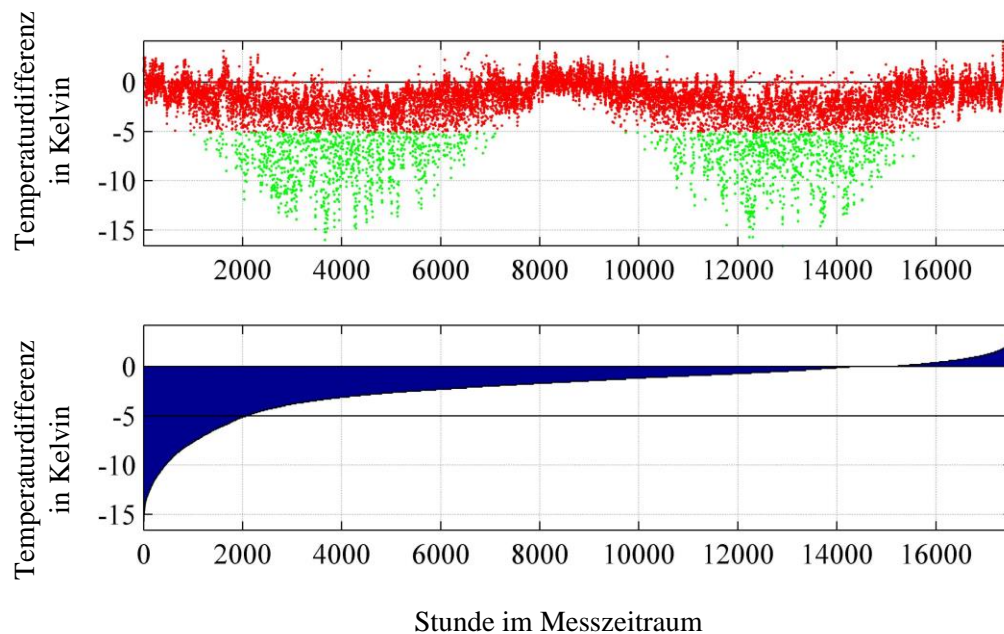


**Bild 15.15** Temperaturprofil bei einer gewichteten Verfügbarkeit von 0,2

In **Bild 15.15 a** ist zu sehen, dass sich die Temperaturdifferenz nach dem gleichen Verhalten einstellt wie bei den vorherigen Betrachtungen. Übers zweite Jahr sind dabei mehrere Ausfälle der Temperaturmessung verteilt. Ebenfalls ist zu sehen, dass auch an diesem Standort über die Wintermonate keine Versorgung durch TEG stattfinden kann.

**Bild 15.15 b** zeigt wie selten in den zwei Jahren Temperaturdifferenzen größer 5 Kelvin

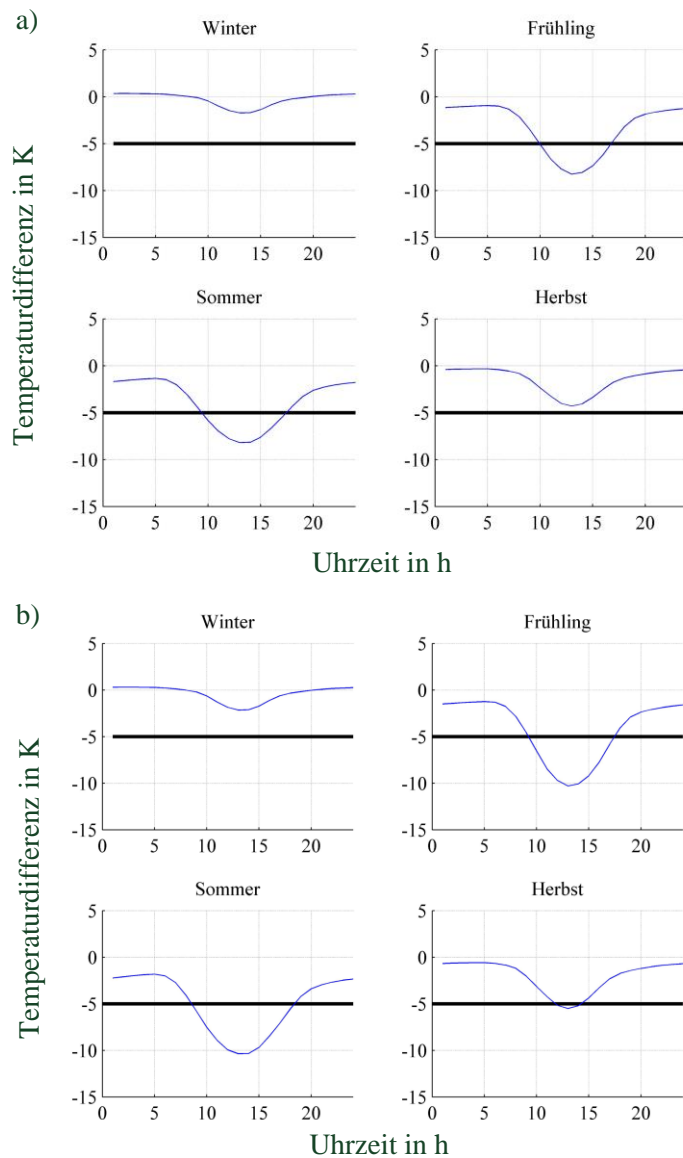
vorhanden sind. In der folgenden Abbildung ist die Temperaturdifferenz an einem Standort mit einer Verfügbarkeit von 0,12 darstellt.



**Bild 15.16** Temperaturprofil bei einer gewichteten Verfügbarkeit von 0,12

**Bild 15.16 a** zeigt, wie ausgedünnt auch in den Sommermonaten die potentiellen Versorgungszeitpunkte durch TEG sind. Die in **Bild 14.8** dargestellte Leistungskurve für ein TEG-Kit zeigt wie gering die Leistungserzeugung bei diesen niedrigen Temperaturdifferenzen ist. Hinzu kommt, dass die gewählte Ansprechschwelle von 5 K sehr knapp bemessen ist. Bei optimaler Leistungsanpassung fallen entsprechend nur noch 2,5 K über dem Thermogenerator ab.

Die nachfolgenden Darstellungen sollen die täglichen Schwankungen der Temperaturdifferenz untersuchen. Dafür zeigt **Bild 15.17** die gemittelten Tagestemperaturgänge der Temperaturdifferenz in vier Quartalen um den Tageszeitpunkt der möglichen Energieversorgung durch TEG in den Quartalen zu untersuchen.



**Bild 15.17** Gemittelter Tagesverlauf der Temperaturdifferenz in vier Quartalen **a)** allen Messdaten **b)** bei Messdaten > 80 % Vollständigkeit

Im Vergleich zwischen **Bild 15.17 a** und **b** wird eine geringfügig höhere Temperaturdifferenz in allen Quartalen deutlich. Das Potential für eine Einspeisung steigt dabei jedoch nicht nennenswert. Die gemittelten Tagesverläufe in **Bild 15.17 a** und **b** zeigen unabhängig vom Quartal das Maximum der Temperaturdifferenz zur Mittagszeit und somit zu den gleichen Zeitpunkten in denen ebenfalls eine Energieversorgung durch PV-Anlage möglich ist. Somit bietet ein Hybridsystem bei direkt angestrahlten Flächen keine Vorteile zur Versorgung mit nur einem System.

Bei nicht direkt angestrahlten Flächen sind, wie aus **Bild 15.9** zu entnehmen ist, andere Zeitpunkte einer Versorgung über den Tag vorhanden. Daher kann in diesen Fällen ein

hybrides Versorgungskonzept aus PV und TEG eine gleichmäßigere täglich Versorgung ermöglichen. Die saisonalen Einschränkungen schränken den potentiellen Versorgungszeitraum jedoch stark ein.

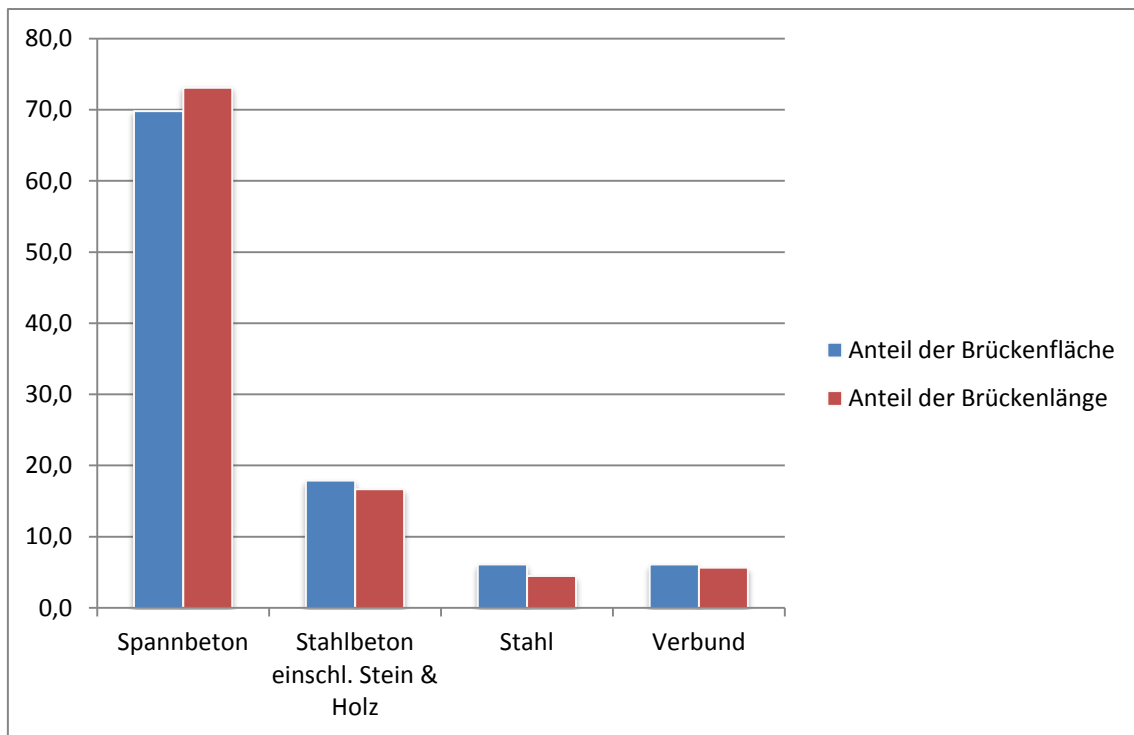
Generell ist die größte Limitation die sehr starke saisonale Schwankung der Temperaturdifferenz. Somit bleibt festzuhalten, dass ein mit TEG versorgter Sensorknoten sowohl einen Energiespeicher für den saisonalen also den Langzeitbereich benötigt, als auch einen kurzfristigen täglichen Abruf von gespeicherter Energie erfordert. Zusätzlich ist die Temperaturdifferenz an Bauwerken sehr nah an der Ansprechschwelle der TEG, sodass generell nur sehr wenig Energie zur Verfügung steht. Daher wird eine kontinuierlichere Energiequelle zur Versorgung von Sensorknoten empfohlen.

## **16 Monitoring-Szenarien**

Das Ziel dieses Kapitel ist die Entwicklung eines Monitoring-Szenarios. Dazu werden im ersten Schritt die Brückenstruktur und kennzeichnende Parameter zur Kategorisierung dargestellt. Im zweiten Schritt werden charakteristische Schädigungseinwirkungen auf unterschiedliche Brückenbauwerksarten dargestellt und relevante Messgrößen aufgezeigt. Aus diesen Werten werden repräsentative Brückenbauwerkes-Monitoring-Szenarien abgeleitet die auf die Baugröße und den Überwachungsumfang kategorisiert sind.

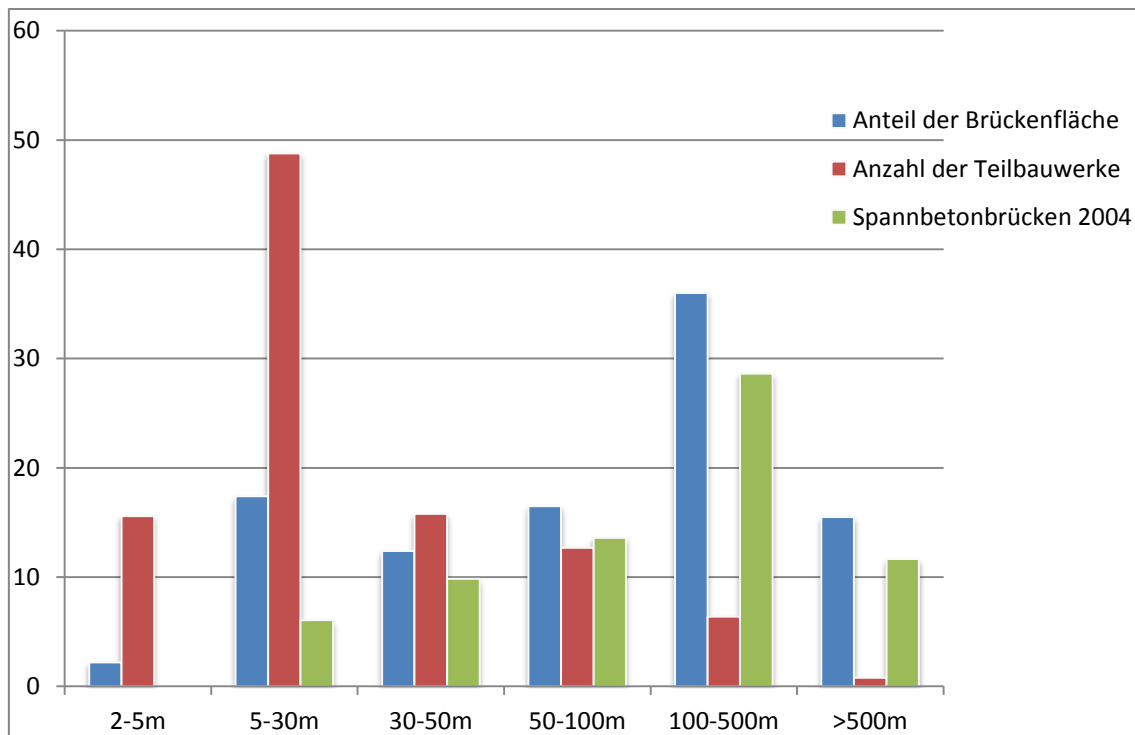
### **16.1 Brückenbestand**

Der Brückenbestand im Bundesfernstraßennetz besitzt derzeit etwa 30.039 Bauwerke (50.695 Teilbauwerke) bei einer Brückenfläche von 29,95 Mio. m<sup>2</sup> und einer Gesamtlänge von 2.084 km [72]. Auf die einzelnen Brückentypen bzw. Baumaterialien ergibt sich dabei eine Aufschlüsselung nach **Bild 16.1**.



**Bild 16.1** Anzahl der Teilbauwerke und Anteil der Brückenfläche für die Bauwerkstypen [72]

**Bild 16.1** zeigt, dass der größte Anteil der Brückenfläche und der Brückenlänge auf Spannbetonbrücken entfällt. Stahl und Verbundbrücken besitzen dagegen nur einen sehr geringen Anteil. In **Bild 16.2** wird die Längenstruktur von Brückenbauwerken dargestellt.

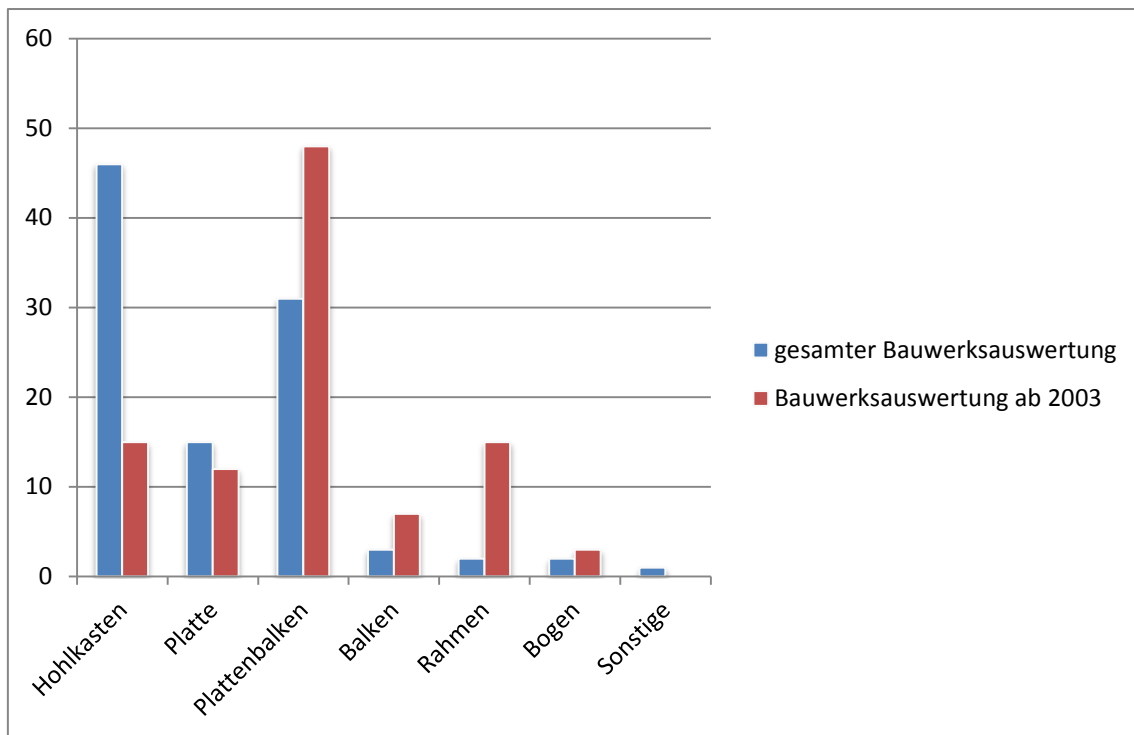


**Bild 16.2** Längenstruktur nach Anzahl der Teilbauwerke und Anteil der Brückenfläche

Dabei ist zu sehen, dass flächenbezogen der größte Teil aller Brücken ab 50 m als Spannbetonbrücken ausgeführt sind. Die größte Anzahl an Teilbauwerken ist jedoch in einer Größenordnung von 5 – 30 m als Kreuzungsbauwerke über Wege, Straßen, Eisenbahnstrecken, Bäche und kleine Flüsse ausgeführt [73].

## 16.2 Bauwerksarten und Schadensbilder

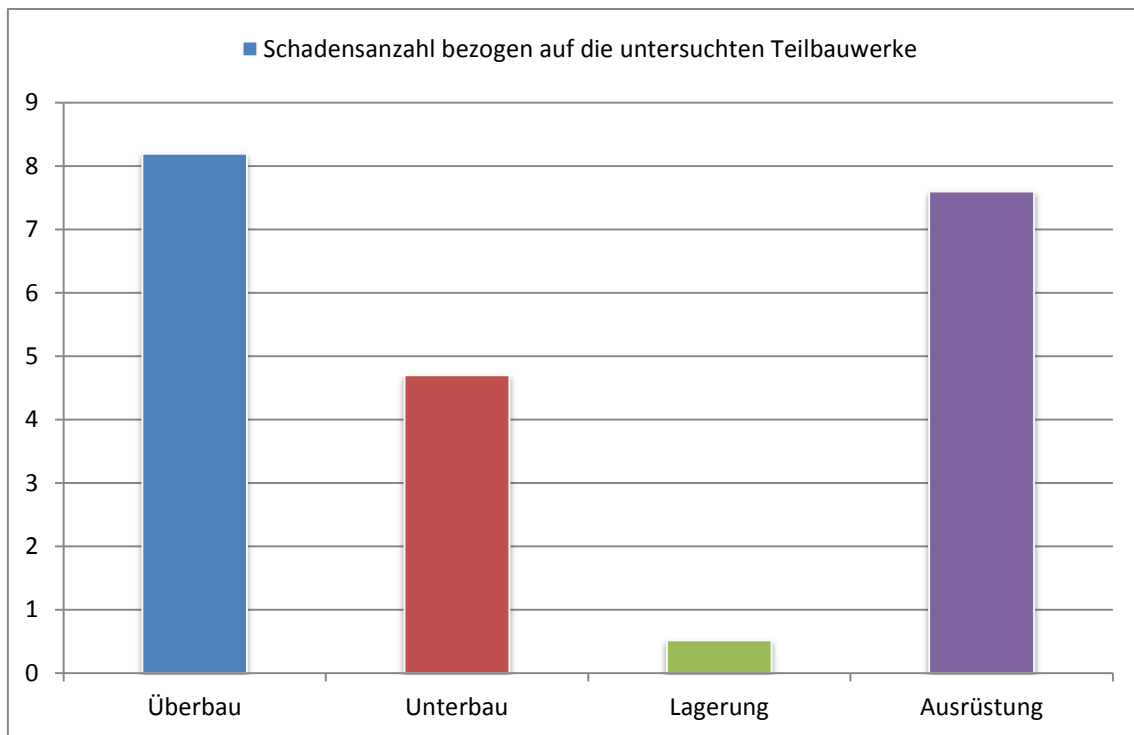
Für eine detaillierte Auswertung von auftretenden Schäden sind Spann- und Stahlbetonbrücken aus einer Schadensdatenbank untersucht worden. Diese Untersuchung deckt ca. 4 % der Massivbaubrücken des deutschen Bundesfernstraßennetzes ab [82]. Dabei ist eine Kategorisierung sowohl nach der Bauwerksart als auch eine Fehlerzuordnung auf die Bauteile einer Brücke vorgenommen worden. Als Bauwerksart sind Platten-, Plattenbalken-, Hohlkasten-, Balken-, Rahmen-, Bogenbrücken oder sonstige Brückenbauarten kategorisiert. In **Bild 16.3** ist die Verteilung der Bauwerksart nach der Gesamtfläche für die untersuchten Brücken bzw. für alle Brücken mit einem Baujahr ab 2003 dargestellt.



**Bild 16.3** Verteilung der Bauwerksart nach Gesamtfläche

In **Bild 16.3** wird gezeigt, dass über die gesamte ausgewertete Brückenbauwerksstruktur die Hohlkastenbrücke den größten Anteil besitzt. Nach 2003 sind jedoch mehr Bauwerke in Plattenbalkenbauweise errichtet worden.

Für die Auswertung der Schadensbilder sind die Bauwerke in vier Bauteilgruppen aufgeteilt worden. Diese vier Gruppen sind Überbau, Unterbau (Widerlager, Stützen, Pfeiler, Gründung), Lagerung und Ausrüstung (Belag, Abdichtung, Geländer, Beschilderung, Fahrbahnübergang, Markierung). Für die untersuchten Brückenbauwerke hat sich dabei eine Schadensanzahl pro Teilbauwerk nach **Bild 16.4** ergeben.



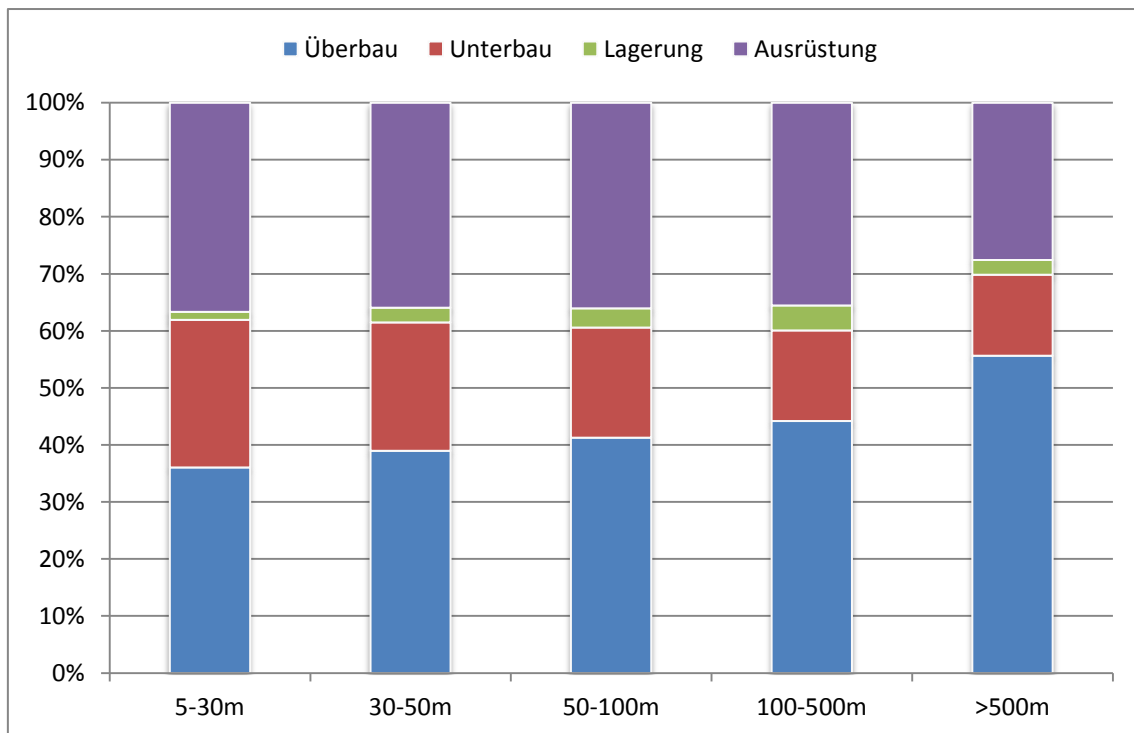
**Bild 16.4** Schadensverteilung der vier Bauteilgruppen [82]

In **Bild 16.4** wird deutlich, dass am Überbau und an der Ausrüstung die meisten Schäden mit ca. acht Schäden pro Bauwerk auftreten. Bei der Lagerung hat sich an jedem zweiten Teilbauwerk ein Schaden eingestellt.

Die häufigsten Schäden am Überbau sind eine freiliegende Bewehrung, Risse im Beton sowie Abplatzungen und Betonausbrüche. Dabei sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bauwerksarten festzustellen [82]. Auch am Unterbau sind diese Schadensbilder am häufigsten anzutreffen.

Bei der Lagerung sind Korrosion, Beschädigung des Elastomers oder eine fehlerhaft Lage die häufigsten Schadensbilder. In der Bauteilgruppe Ausrüstung sind Beschädigungen am Belag, der Abdichtung, dem Geländer oder Schutzeinrichtungen am häufigsten vorhanden.



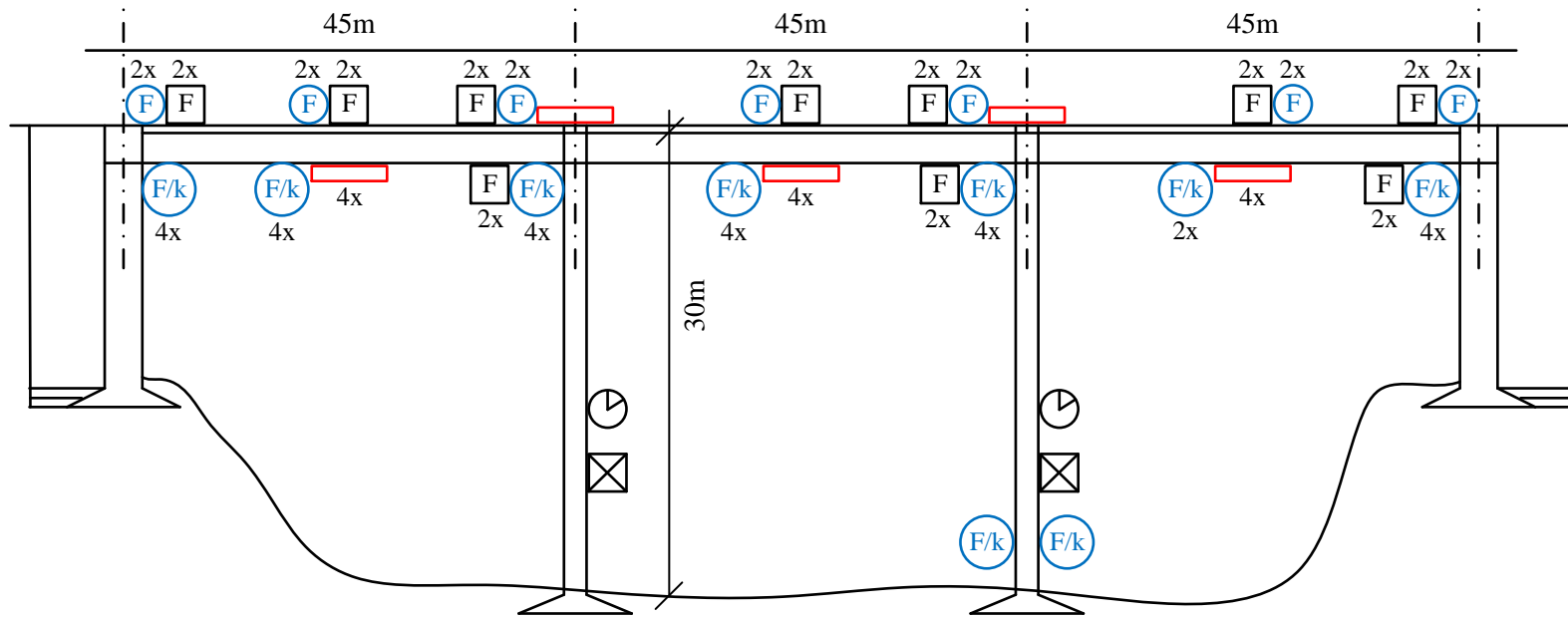


**Bild 16.5** Schadensverteilung der vier Bauteilgruppen für unterschiedliche Bauwerkslängen

Das **Bild 16.5** zeigt einen prozentualen Anstieg der Schäden am Überbau mit ansteigender Bauwerkslänge. Die prozentualen Schäden am Unterbau nehmen dagegen immer weiter ab. Kumuliert bleibt der prozentuale Anteil bei Brücken bis 500 m jedoch nahezu konstant. Da wie beschrieben die am häufigsten anzutreffenden Schadensbilder am Über- und Unterbau identisch sind und die gleichen Schädigungen bei allen Bauwerksarten auftreten, verschiebt sich der mögliche Einsatzort der Sensorik mit steigender Bauwerksgröße vom Unter- zum Überbau. Aufgrund dieses Verhaltens ist nur eine Musterinstrumentierung für alle Bauwerksgrößen untersucht worden.

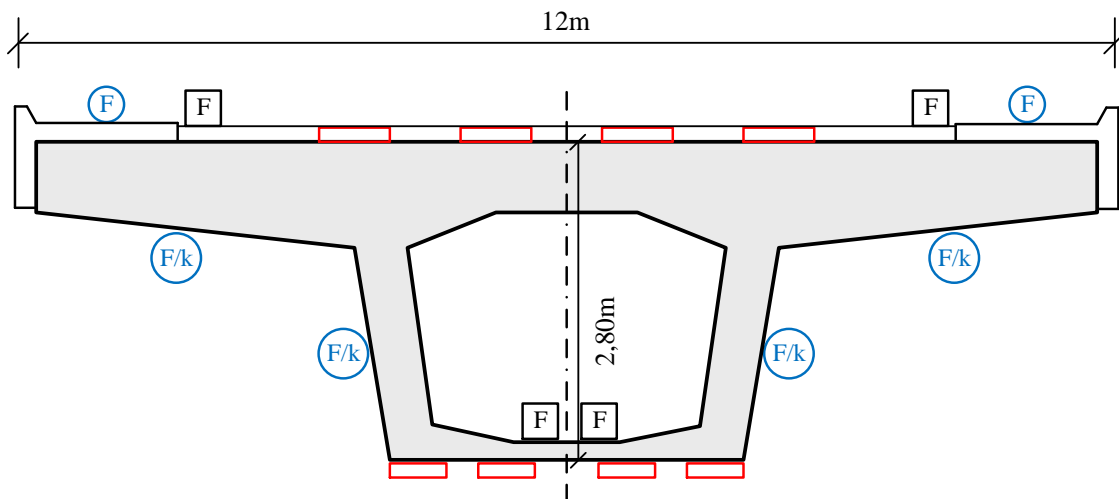
### 16.3 Musterlösungsansätze für Monitoring-Szenarien

Im folgenden Kapitel werden Musterlösungsansätze für verschiedene Monitoring-Szenarien erarbeitet. Dazu wird die in **Bild 16.6** und **Bild 16.7** gezeigte Musterinstrumentierung von Sensorik als standardisierte Grundlage angenommen, da für einen konkreten Modellansatz keine spezifischen Schadensbilder bekannt sind. Aufbauend auf dieser Musterinstrumentierung werden Restriktionen zur Energieversorgung mit den unterschiedlichen Energy Harvestern aufgezeigt.



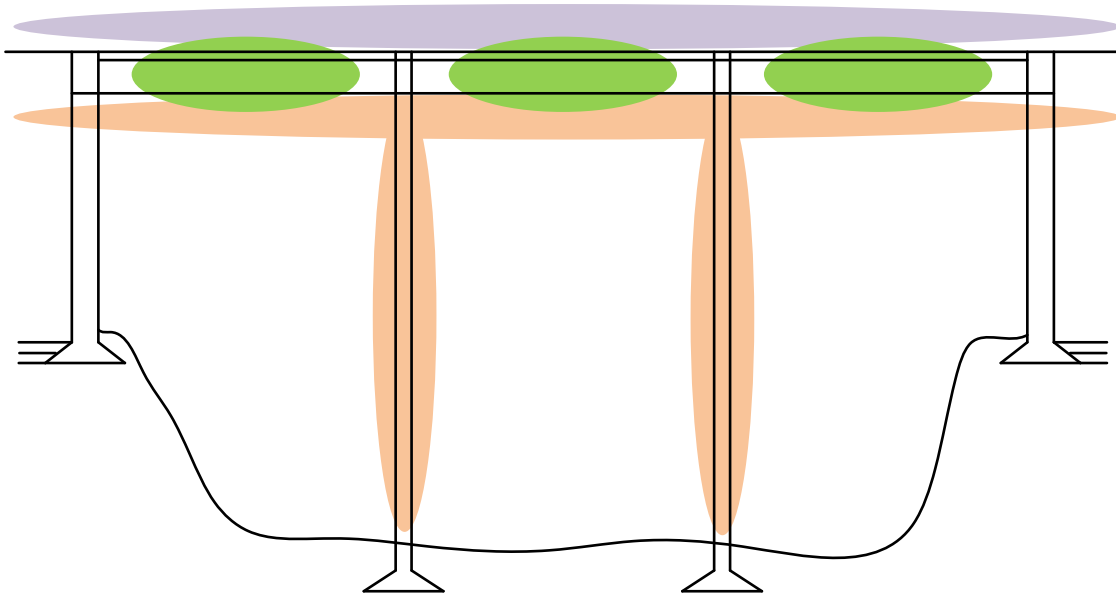
- |     |  |                         |     |  |                        |
|-----|--|-------------------------|-----|--|------------------------|
| 20x |  | DMS/Temperatur          | 18x |  | Feuchtigkeits-Detektor |
| 32x |  | Feuchtigkeits/Korrosion | 2x  |  | Neigung                |
| 14x |  | Feuchtigkeit            | 2x  |  | Verschiebung (Setzung) |

**Bild 16.6** Musterinstrumentierung für Monitoring-Szenario (Seitenansicht)



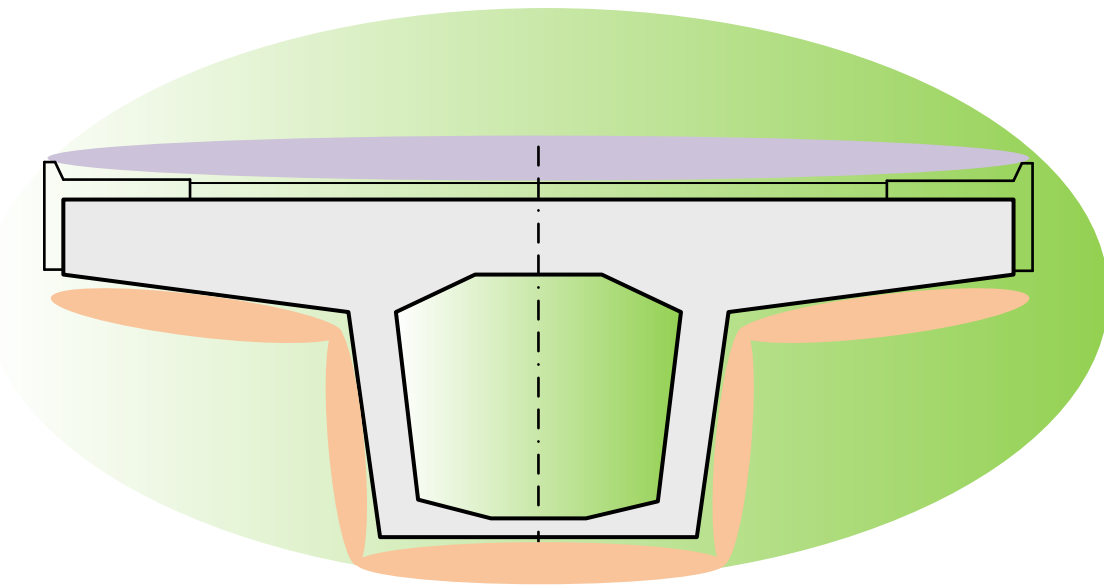
**Bild 16.7** Musterinstrumentierung für Monitoring-Szenario (Vollschnitt)

**Bild 16.6** und **Bild 16.7** zeigen die Musterinstrumentierung für eine Hohlkastenbrücke. Die angenommene Anzahl der einzusetzenden Sensorik ist dabei in **Bild 16.6** angegeben. Für die Einsatzorte der verschiedenen Energy Harvester entstehen dabei aufgrund ihrer in Kapitel 15 dargestellten Energieangebote Einschränkungen die in **Bild 16.8** und **Bild 16.9** aufgezeigt werden.



- Einsatzpotential Piezo-Generatoren
- Einsatzpotential PV (TEG mit Einschränkungen)
- PV und TEG mit Einschränkungen

**Bild 16.8** Einsatzorte und Restriktionen für Energy Harvester zur Energieversorgung der Sensorimplementierung



● In Abhängigkeit des Standorts: Einsatzpotential für Piezo-Generatoren

**Bild 16.9** Einsatzorte und Restriktionen für Energy Harvester zur Energieversorgung der Sensorimplementierung (Vollschnitt)

Das Energieangebot ist wie in **Bild 16.8** und **Bild 16.9** zu sehen, für die Energy Harvester abhängig vom Einsatzort an der Brücke. Dabei ergeben sich, wie auch schon Abschnitt 15.3.1 zu entnehmen ist, aufgrund der direkten Sonneneinstrahlung ähnliche Einsatzorte und Potentiale für TEG und PV-Anlagen. Damit und durch die gleichen Tagesgänge der Energieangebote steht die Energieversorgung des Energy Harvesting Systems mit Hilfe dieser Technologien in direkter Konkurrenz zueinander.

Für die Untersuchung der Szenarien mit der Musterinstrumentierung sind verschiedene Bauteilgruppen mit dem jeweiligen Energiebedarf zu bestimmen und zu parametrisieren. Als Microcontroller ist, aufgrund der durch den Projektträger gewünschten Einbeziehung der Energieverbräuche der modellbasierten Zustandsschätzung gemäß [107], auch in diesem Forschungsprojekt der TMS320F2806x von Texas Instruments ausgewählt worden. Dieser besitzt drei Low-Power-Modi (IDLE, Standby und HALT). Der Leistungsbedarf und die Aufweckzeiten sind im Anhang dargestellt (Abschnitt 20.2). Als Funkchip ist der Transmitter EM351 (ZigBee) von Silicon Labs implementiert, dessen charakteristische Parameter ebenfalls im Anhang dargestellt sind. Der Energiebedarf der Sensorik, der in Abschnitt 13.1 aufgezeigt ist, ist zusammengefasst ebenfalls im Anhang dargestellt (Abschnitt 20.3). Für die Abschätzung des Energiebedarfs der für die Speicherung der Messdaten erforderlich ist, wird eine Speichergeschwindigkeit von

12 kBit/s angenommen bei einem Speicherbedarf von 32 Bit pro Messwert. Bei der Übertragung zum Funkchip wird eine Datengeschwindigkeit von 10 kBit/s angenommen und bei der Funkübertragung 250 kBit/s. Bei allen Übertragungen wird ein Overhead von 25 % angenommen. Am Beispiel einer Temperaturmessung mit dem MEMS Sensor TMP 102 sind im Folgenden die unterschiedlichen Möglichkeiten zur Parametrisierung mit den sich daraus ergebenden Einflüssen für den Energiebedarf aufgezeigt. Die geänderten Parameter sind dabei Fett markiert, ebenso wie für den Vergleich wichtige Ergebnisse.

**Tabelle 16.1** Energiebedarf der Temperaturmessung bei verschiedenen Messintervallen und Parametern

Messung		Temp. 1	Temp. 2	Temp. 3	Temp. 4	Temp. 5	Temp. 6
Sensor		TMP 102	TMP 102	TMP 102	TMP 102	TMP 102	TMP 102
MCU	Frequenz in Mhz	10	10	10	<b>90</b>	10	10
	Low-Power Mode	<b>IDLE</b>	<b>Standby</b>	<b>HALT</b>	HALT	HALT	HALT
Auswertung	Zustands-schätzung	2	2	2	2	<b>5</b>	2
Funk	Übertragungs-leistung	Min	Min	Min	Min	Min	<b>+8 dBm</b>
Energiebedarf <b>1 Messung</b>	Datenaufnahme +MCU Aktiv in Ws	5,81E-03	5,82E-03	8,18E-03	<b>2,96E-02</b>	8,18E-03	8,18E-03
	Auswertung in Ws	2,15E-06	2,15E-06	2,15E-06	<b>8,65E-07</b>	<b>2,36E-05</b>	2,15E-06
	Speicherung in Ws	5,72E-04	5,72E-04	5,72E-04	2,08E-03	5,72E-04	5,72E-04
	Funk Aktiv in Ws	8,02E-05	8,02E-05	8,02E-05	8,02E-05	8,02E-05	8,02E-05
	Funk Übertragung in Ws	1,03E-05	1,03E-05	1,03E-05	1,03E-05	1,03E-05	<b>2,04E-05</b>
	<b>Summe in Ws</b>	<b>6,48E-03</b>	<b>6,48E-03</b>	<b>8,84E-03</b>	<b>3,18E-02</b>	<b>8,86E-03</b>	<b>8,85E-03</b>
Energiebedarf pro Tag beim <b>Minimum</b> des	Datenaufnahme + MCU Aktiv in Ws	1,16E-02	1,16E-02	1,64E-02	5,92E-02	1,64E-02	1,64E-02

Messintervalls: <b>2 Messungen am Tag</b>	MCU Sleep in Ws	<b>6,28E +03</b>	<b>2,57E +03</b>	<b>2,73E +01</b>	2,73E +01	2,73E +01	2,73E +01
	Auswertung in Ws	4,29E -06	4,29E -06	4,29E -06	1,73E -06	4,72E -05	4,29E -06
	Speicherung in Ws	1,14E -03	1,14E -03	1,14E -03	4,15E -03	1,14E -03	1,14E -03
	Funk Aktiv in Ws	1,60E -04	1,60E -04	1,60E -04	1,60E -04	1,60E -04	1,60E -04
	Funk Übertragung in Ws	2,06E -05	4,30E -04	4,30E -04	4,30E -04	4,30E -04	8,50E -04
	Funk Sleep in Ws	8,64E -02	8,64E -02	8,64E -02	8,64E -02	8,64E -02	8,64E -02
	<b>Summe in Ws</b>	<b>6,28E +03</b>	<b>2,57E +03</b>	<b>2,75E +01</b>	<b>2,75E +01</b>	<b>2,75E +01</b>	<b>2,75E +01</b>
Energiebedarf pro Tag beim <b>Maximum</b> des Messintervalls: <b>100 Messungen pro Stunde</b>	Datenaufnahme Aktiv in Ws	<b>1,40E +01</b>	1,40E +01	<b>1,96E +01</b>	7,11E +01	1,96E +01	1,96E +01
	MCU Sleep in Ws	6,27E +03	2,57E +03	2,73E +01	2,73E +01	2,73E +01	2,73E +01
	Auswertung in Ws	5,15E -03	5,15E -03	5,15E -03	2,08E -03	<b>5,66E -02</b>	5,15E -03
	Speicherung in Ws	1,37E +00	1,37E +00	1,37E +00	4,98E +00	1,37E +00	1,37E +00
	Funk Aktiv in Ws	1,93E -01	1,93E -01	1,93E -01	1,93E -01	1,93E -01	1,93E -01
	Funk Übertragung in Ws	4,95E -03	4,95E -03	4,95E -03	4,95E -03	4,95E -03	<b>9,79E -03</b>
	Funk Sleep in Ws	8,64E -02	8,64E -02	8,64E -02	8,64E -02	8,64E -02	8,64E -02
	<b>Summe in Ws</b>	<b>6,29E +03</b>	<b>2,59E +03</b>	<b>4,86E +01</b>	<b>1,04E +02</b>	<b>4,87E +01</b>	<b>4,86E +01</b>

Die in **Tabelle 16.1** dargestellten Wert geben eine Einschätzung über den benötigten Energiebedarf für eine Temperaturmessung mit einem MEMS Sensor für eine Messung mit Auswertung und Funkübertragung bzw. den täglichen Energiebedarf bei gewähltem Mini- und Maximum des Messintervalls. In den ersten drei modellierten Temperaturmessungen (Temp. 1 - 3) wird der Microcontroller (MCU) in den Ruhezeiten in einen der drei Low-Power-Modi (IDLE, Standby und HALT) versetzt. Der Energiebedarf für eine Messung unterscheidet sich in diesen Fällen nur sehr unwesentlich. Lediglich die

Datenaufnahme weicht in geringen Grenzen voneinander ab. Dies liegt an den unterschiedlichen Aufweckzeiten aus den Low-Power-Modi. Je mehr Systeme abgeschaltet werden desto länger dauert das Hochfahren. Diese Zeiten sind in der Modellierung mit dem Leistungsbedarf der aktiven MCU hinterlegt worden, sodass sich bezogen auf eine Messung, ein höherer Energiebedarf für eine Messung einstellt.

Die Vorteile der Low-Power-Modi werden erst bei der Betrachtung des täglichen Energiebedarfs sichtbar. Hier ergeben sich für die Zeiten in denen der MCU in einen der drei Low-Power-Modi versetzt wird sehr starke Unterschiede. Der Energiebedarf von IDLE zu Standby ist dabei um den Faktor ca. 2,5 verringert, während zum HALT-Modus ein Unterschied von zwei Dekaden vorhanden ist. Die Zeiten in denen der MCU abgeschaltet ist überwiegen deutlich zu den Zeiten in denen der MCU aktiv ist, unabhängig vom gewählten Messintervall. Daher ist der Energiebedarf eines Tages in den Low-Power-Modi für dieses Beispiel der Temperaturmessung nahezu unabhängig vom Messintervall. Beispielhaft sind dafür die Energieverbräuche im HALT-Modus bei 2 Messungen am Tag mit 27,3 Ws mit denen von 100 Messungen pro Stunde bei ebenfalls 27,3 Ws zu nennen.

Generell ist die Leistung des betrachteten Microcontrollers auch im HALT-Modus sehr hoch. Für einen Vergleich ist die Energie des Funkchips im Sleepmodus zu nennen, die um den Faktor 300 geringer ist. Auch der Vergleich des Stroms des gewählten Microcontrollers im HALT-Modus von 95  $\mu\text{A}$  zu dem in Abschnitt 13.2.1 genannten MCU der im Shutt-Off Modus lediglich einen Strom von 20 nA bezieht, macht die großen Einsparpotentiale deutlich.

Dieser hohe Energiebedarf im HALT-Modus bestimmt daher beim Minimum des Messintervalls die tägliche Summe des Energiebedarfs. Die für die Messung, Speicherung, Auswertung und Übertragung benötigte Energie fällt bei dieser Konfiguration nicht ins Gewicht. Die Summe liegt jedoch, wie der Energiebedarf für eine Messung zeigt, im Bereich von wenigen mWs für jede Messung.

Beim gewählten Maximum des Messintervalls zeigt sich für den Energiebedarf bei der Datenaufnahme eine deutliche Erhöhung. Der Bedarf liegt abhängig von der Aufweckzeit des gewählten Low-Power-Modes im zweistelligen Ws-Bereich. Die Speicherung besitzt ein Energiebedarf von wenigen Ws und die Funkübertragung von mehreren hundert mWs. Somit bleibt festzuhalten, dass der Energiebedarf hauptsächlich von der Datenaufnahme bestimmt wird. Bei der Berechnung ist unterstellt, dass der MCU während

der Messzeit vollständig mit der gesamten Peripherie aktiv ist. Dabei sind ebenfalls noch Einsparungen im aktiven Modus möglich wie z. B. eine Reduktion von 20 mA bei Abschaltung des CLA Coprozessors, 12 mA bei der USB Schnittstelle usw.

Im Folgenden wird nacheinander die Frequenz des Microcontrollers, das Systemmodell bei der Auswertung sowie die Übertragungreichweite variiert und mit der Temperaturmessung Temp. 3 verglichen um die Energieeinsparungen oder Erhöhungen aufzuzeigen.

Die Erhöhung der Frequenz auf 90 MHz (Temp. 4) hat eine Steigerung der Leistung des Microcontrollers zur Folge. Dabei stellt sich eine Energie von 21 nJ/Takt bei 10 Mhz und 8,67 nJ/Takt bei 90 MHz ein. Somit benötigen alle taktabhängigen Abläufe weniger und alle zeitabhängigen Abläufe mehr Energie. In der Modellierung sind die Datenaufnahme, die Speicherung und die Datenübertragung an den Schnittstellen zeitabhängig, lediglich die Auswertung ist taktabhängig.

Praktisch ist jedoch mit einem höheren Takt eine höhere Datenrate der Übertragung zwischen dem MCU und dem Funkchip möglich. Auch die Datenrate bei der Speicherung der Daten kann in gewissen Grenzen erhöht werden und somit den Energiebedarf senken. Die Messzeit der Sensoren ist hingegen in diesem Fall nicht zu variieren. Und somit ist, aufgrund der unterstellten aktiven Peripherie des Microcontrollers, der Energiebedarf entsprechend groß und bestimmt in Abhängigkeit des Messintervalls den täglichen Energiebedarf. Für die Auswertung zeigt sich hingegen eine Reduktion um einen Faktor von etwa 2,5. Bei der Funkübertragung spielt die Frequenz des Microcontrollers keine Rolle. Bei einem integrierten Transmitter wäre dies jedoch der Fall.

In der Messung Temp. 5 ist ein anderes Modell für die Auswertung angenommen worden. Dabei erhöht sich der notwendige Energiebedarf um eine Dekade. Im Vergleich zur notwendigen Energie für Speicherung, Funkübertragung und vor allem Aufnahme der Daten spielt es jedoch, unter den hier angenommenen Ansätzen, eine untergeordnete Rolle und es kann somit die empfohlene Auswertung nach [107] erfolgen.

Die in Temp. 6 vorgenommene Erhöhung der Übertragungsleistung des Funkchips stellt eine große Entfernung des Sensorknotens zum Accesspoint dar. Dadurch ergibt sich in diesem Fall eine Verdoppelung der Leistung und damit der Energie des Funkchips. Die Leistung kann jedoch nicht gesenkt werden, falls eine große Funkübertragungsleistung zum überbrücken großer Distanzen notwendig ist. Die Größenordnung der zur Funk-



übertragung notwendigen Energie liegt jedoch mehrere Dekaden unterhalb der Energie der Messwertaufnahme. Daher spielt die Übertragungsleistung in dieser Abschätzung ebenfalls eine untergeordnete Rolle.

Für eine Abschätzung des Energiebedarfs der sensor- oder knotenautarken Versorgung wird auf Basis dieser Erkenntnisse mit folgender Parametrisierung gerechnet:

- Frequenz: 10 MHz
- Energiesparmodus: HALT
- Zustandsschätzung: empfohlene technische Lösung nach [107]
- Übertragungsleistung: +8 dBm

Bevor der Energiebedarf der weiteren Sensoren dargestellt wird, werden die Aufweckzeiten aus den Low-Power-Modi untersucht und dadurch entstehende Limitationen aufgezeigt. Nach Angaben des Datenblatts benötigt der MCU für den Start des Oszillators vom HALT in den Aktivmodus typischerweise eine Zeit von 10 ms. Hinzu kommen weitere Sperrzeiten und zyklenabhängige Schritte, sodass sich im Endeffekt eine Aufweckzeit von 11,1 ms bei einer Taktfrequenz des Microcontrollers von 10 MHz einstellt (11,0 ms @ 90 MHz Taktfrequenz). Obendrauf kommen die Zeiten für die Messung, Auswertung, Speicherung und ggf. Übertragung. Damit kann die maximale Messfrequenz für diesen Modus bestimmt werden. Wird die Aufweckzeit allein betrachtet ergibt sich, bei einer Taktrate des Microcontrollers von 10 MHz, eine maximale Messfrequenz im Halt-Modus von 89,9 Hz (90,8 Hz @ 90 MHz Taktrate), im Standby-Modus von 8,66 kHz (64,52 kHz @ 90 MHz) und im IDLE-Modus von 9,43 kHz (78,95 kHz @ 90 MHz). Dabei zeigt sich, dass vor allem im HALT-Modus nur eine sehr geringe Steigerung um 0,1 ms durch eine Erhöhung der Taktfrequenz des Microcontrollers möglich ist. Beim Standby und IDLE-Modus erfolgt im Vergleich zum HALT-Modus ein Sprung um nahezu zwei Dekaden bei einer Taktfrequenz von 10 MHz. Bei Steigerung der Taktfrequenz auf 90 MHz ist annähernd eine weitere Dekade möglich. Diese Überlegungen zeigen, dass nicht für alle nach [82] empfohlenen Messintervalle, die teilweise bei  $> 100$  Hz liegen, der HALT-Modus und damit die energiesparendste Option möglich ist.

In der folgenden Tabelle ist der Energiebedarf für die weiteren Sensoren der Musterinstrumentierung dargestellt.



		DMS	DMS	Feuchtigkeit	Korrosion	Neigung	Neigung	Verschiebung	Feuchtigkeits-Detektor
		Vollbrücke 350	Pico-Strain	MRE	Anoden-leiter	Neigungssensor	MEMS	Wegaufnehmer	SHT21
MCU	Low-Power Mode	HALT	<b>Standby</b>	HALT	HALT	HALT	HALT	HALT	HALT
Auswertung	Zustandsschätzung	5	5	5	2	5	5	5	2
<b>Messintervall</b>	<b>Messungen pro Stunde</b>	<b>100 (max)</b>	<b>360000 (min)</b>	<b>1/24 (max)</b>	<b>1/24 (max)</b>	<b>3600 (min)</b>	<b>3600 (min)</b>	<b>100</b>	<b>60</b>
Energiebedarf pro Tag	Datenaufnahme + MCU Aktiv in Ws	7,65E+00	1,69E+04	6,54E-01	6,54E-01	3,82E+02	3,79E+02	7,77E+00	8,09E+00
	MCU Sleep in Ws	7,63E+01	2,28E+02	1,89E+03	1,89E+03	4,48E+02	5,20E+01	9,19E+01	2,71E+01
	Auswertung in Ws	5,66E-02	2,04E+02	2,36E-05	2,15E-06	2,04E+00	2,04E+00	5,66E-02	3,09E-03
	Speicherung in Ws	1,37E+00	4,94E+03	5,15E-03	1,20E-02	4,94E+01	4,94E+01	1,37E+00	8,24E-01
	Funk Aktiv in Ws	1,93E-01	6,93E+02	7,04E-04	1,64E-03	6,93E+00	1,16E-01	1,93E-01	1,16E-01
	Funk Übertragung in Ws	4,90E-02	1,76E+02	1,84E-04	4,28E-04	1,76E+00	2,94E-02	4,90E-02	2,94E-02
	Funk Sleep in Ws	8,64E-02	4,95E-02	8,64E-02	8,64E-02	8,60E-02	8,64E-02	8,64E-02	8,64E-02
	<b>Summe in Ws</b>	<b>8,57E+01</b>	<b>2,32E+04</b>	<b>1,89E+03</b>	<b>1,89E+03</b>	<b>8,91E+02</b>	<b>3,63E+01</b>	<b>1,01E+02</b>	<b>3,63E+01</b>

Die Ergebnisse aus **Tabelle 16.1** und **Tabelle 16.2** zeigen den entstehenden Energiebedarf für die Sensoren auf. Auf die einzelne Messung bezogen ist der angenommene Energiebedarf der MRE und des Anodenleiters deutlich über den anderen Messungen.

Generell sorgen die Annahmen des aktiven Microcontrollers bei der Datenaufnahme bei hohen Werten des Messintervalls für einen sehr hohen Energiebedarf. Hinzu kommt der hohe Energiebedarf des Microcontrollers während des Low-Power-Modus. Diese konservativen Schätzungen sorgen daher bei allen Messungen für einen sehr hohen Energiebedarf.

Dabei bestimmt das Messintervall entscheidend den Energiebedarf des Sensorknotens am Tag. Die Messung der Dehnung durch den PicoStrain-Sensor ist mit 100 Messungen pro Sekunde berechnet worden. Damit kann der MCU wie beschrieben nicht mehr in den HALT-Modus wechseln und hat dadurch einen sehr hohen Energiebedarf.

Bei aktivem Microcontroller sind im Vergleich zu dem in Abschnitt 13.2.1 genannten Microcontroller ebenfalls sehr große Leistungsunterschiede vorhanden. Bei aktivem Betrieb sind dort Leistungseinsparungen von mehreren Dekaden vorhanden. Hinzu kommt, dass die Peripherie wie der AD-Wandler und der I<sup>2</sup>C-Bus auch in den Energiesparmodi zur Verfügung stehen, sodass auch während der Kommunikation mit dem Funkchip oder den Sensoren der Microcontroller nicht vollständig aufgeweckt werden muss und dadurch deutlich weniger Energie verbraucht.

Beispielhaft für den Energieverbrauch wird erneut auf die Leistung des Microcontrollers im HALT-Modus eingegangen. Dabei wird der Energiebedarf betrachtet den der MCU besitzt während er sich einen gesamten Tag (ohne jegliche Operationen durchzuführen) im HALT-Modus befindet. Dieser beträgt **27,1 Ws**. Zur Versorgung mit der in Abschnitt 14.1.1 dargestellten Solarzelle ECS 310 müsste bei konstanter Nennleistung eine tägliche Einspeisedauer von 180 Stunden vorhanden sein, um diesen Energiebedarf zu decken. Dabei sind Datenaufnahme, Auswertung, Speicherung, Übertragung und alle weiteren Leistungen die einen aktiven MCU voraussetzen vernachlässigt. Im Standby-Betrieb ergibt sich bereits ein täglicher Energiebedarf von **2572 Ws** für den MCU.

Dieser Energiebedarf ist, mit den in Abschnitt 14.1 dargestellten Energy Harvestern, in der aufgezeigten Dimensionierung nicht mehr zu decken. Damit ergibt sich am Beispiel der Solarzelle nicht wie aufgezeigt eine Dimensionierung von wenigen cm<sup>2</sup>, sondern in Abhängigkeit der Messgrößen und des Messintervalls eine Größenordnung von we-

nigen  $\text{dm}^2$  für die autarke Versorgung einzelner Sensoren.

Generell sind die Ergebnisse aus **Tabelle 16.1** und **Tabelle 16.2** mit erheblichen Einschränkungen für die Abschätzung des Energiebedarfs der sensorautarken Versorgung zu Betrachten. Die Berechnung mit dem Microcontroller TMS320F2806x, der nicht auf den autarken Einsatzbereich optimiert ist, sorgt für eine drastische Überhöhung.

Die in diesem Abschnitt aufgezeigten Überlegungen zeigen jedoch, dass mit einer anderen Wahl der Komponenten eine Reduktion der benötigten Energie des Microcontrollers im Bereich mehrerer Dekaden möglich ist. Dies gilt sowohl was den Energiebedarf im Energiesparmodus als auch im aktiven Modus betrifft.

Die Beurteilung der Messergebnisse für die Anwendung der Musterinstrumentierung im knotenautarken Konzept soll im Folgenden erfolgen. Die Leistung ist, wie schon beschrieben, durch eine geeignetere Wahl des Microcontrollers deutlich zu reduzieren. Im Folgenden soll jedoch erneut der Fokus auf die Höhe des Messintervalls gelegt werden. Bei hohen Werten des Messintervalls entsteht dabei, auch beim Einsatz von MEMS-Sensoren, ein großer täglicher Energiebedarf. Bei der nahezu kontinuierlichen Messung der Dehnung, wie es z. B. bei der Messung infolge von Verkehr erforderlich ist, sind die MEMS-Sensoren nahezu im Dauerbetrieb und es entstehen Energieverbräuche im Bereich zwei- bis dreistelliger Ws am Tag. Das bedeutet, dass auch bei Messungen mit der energieeffizientesten Messtechnik, für die autarke elektrische Energieversorgung Solarzellen im Bereich weniger  $\text{dm}^2$  notwendig sind. Diese hohen Werte für das Messintervall sind in der Standardinstrumentalisierung bei der Messung der Dehnung in Folge von Verkehr und der Neigung der Fall.

Bei kleineren Werten des Messintervalls, das beinhaltet alle Messungen die im stündlichen Bereich stattfinden, ist die Leistung der Sensorik aufgrund der geringen Messhäufigkeit weniger entscheidend. Für die in der Modellierung getroffene Annahme (s. Abschnitt 20.3), dass (falls unbekannt) 5 % der Leistung der Sensorik im Aktivmodus der Leistung im Sleepmodus entsprechen, sind ebenfalls noch deutliche Reduzierungen bis nahezu 0 W möglich. Dabei ist zum Beispiel die Messung der Korrosion mittels Anodenleiter zu nennen.

Somit ist für die Auslegung das Messintervall ein sehr entscheidendes Kriterium. In einem knotenautarken Konzept fallen demzufolge alle Messungen mit einem kleinen Wert des Messintervalls gegenüber denen mit einem hohen Wert des Messintervalls kaum ins Gewicht. Daher ist bei der in Abschnitt 13.1.6 dargestellten Klassifizierung

der Sensorik in die Versorgungskonzepte V1, V2 und V3 eine starke Gewichtung des Messintervalls erfolgt.

## **17 Zusammenfassung**

Dem Zustandsmonitoring von Brückenbauwerken kommt im Zusammenhang mit der fortlaufenden Alterung der Bestandsbauwerke, der steigenden Belastung durch die zunehmende Anzahl von Schwertransporten und dem steigenden Verkehrsaufkommen eine größer werdende Bedeutung zu. Für die Überwachung mittels geeigneter Sensorik, die Aufbereitung und die Übertragung der Messdaten sind Systemkomponenten erforderlich, deren elektrische Energieversorgung in diesem Forschungsprojekt betrachtet und beurteilt wird.

Der vorliegende Bericht behandelt die Energiebereitstellung, die Speicherung und den Abruf von Energie im mittleren Leistungsbereich zur Versorgung eines Rechner- und Kommunikationssystems am so genannten „Accesspoint“, dem drahtlosen Datenübergabepunkt am Brückenbauwerk. Dabei werden die Möglichkeiten zur autarken Energiegewinnung sowie Leistungsparameter der entsprechenden Energieerzeugungsanlagen im Hinblick auf Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit, Nachhaltigkeit, Platzbedarf und Wirtschaftlichkeit untersucht, dargestellt und bewertet.

Außerdem wird die autarke elektrische Energieversorgung der zur Überwachung des Brückenbauwerks eingesetzten Sensorik in einem sensorautarken (autarke Versorgung eines einzelnen Sensors) und in einem knotenautarken (autarke Versorgung mehrere gleicher oder verschiedener Sensoren) Versorgungskonzept untersucht. Das verfügbare Energieangebot am Brückenbauwerk im Nahbereich der Sensorik ist jedoch sehr gering und zusätzlich zeitlich und örtlich von verschiedenen klimatischen und strukturellen Parametern abhängig, sodass die Notwendigkeit des Einsatzes energieoptimierter Sensorik entsteht als auch Lösungen für die Überbrückung von Versorgungsengpässen mittels Energiespeichern betrachtet werden müssen.

Für die Bewertung von autarken Energieversorgungssystemen werden die Systemkomponenten in zwei unterschiedliche Leistungsklassen eingeteilt. Diese Unterteilung erfolgt aufgrund der unterschiedlichen Leistungsanforderung für die autarke Energieversorgung der Verbraucher am Accesspoint und der autarken Energieversorgung sensorautarker bzw. knotenautarker Sensoren am Wireless Sensor Node (WSN).

- Elektrische Energieversorgung am Accesspoint (Leistungsklasse 1)

Die erste Leistungsklasse beinhaltet alle Systemkomponenten, die für die Energieversorgung der Verbraucher (Router, Industrie Computer, WSN Gateway, ggf. Faseroptische Systeme usw.) am Accesspoint, dem drahtlosen Datenübergabepunkt am Bauwerk, notwendig sind. Dabei werden sowohl Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) oder Kleinwindenergieanlagen (KWEA) als auch Hybridlösungen, also eine kombinierte Energieversorgung durch PV-Anlagen und KWEA, betrachtet und bewertet. Die Energiebereitstellung aus PV oder Wind, die schwer vorhersagbar und nicht steuerbar ist, unterliegt nicht nur täglichen sondern auch saisonalen Schwankungen. Daher sind für eine kontinuierliche Energieversorgung Energiespeichersysteme erforderlich.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass für die autarke Versorgung der Verbraucher am Accesspoint ein hybrides Systemkonzept nahezu an allen Standorten Vorteile gegenüber der Versorgung mit einer Energiequelle (PV-Anlage oder KWEA) besitzt und daher zu präferieren ist.

Eine 100-prozentige autarke Energieversorgung durch die o. g., nicht steuerbaren Energiequellen geht immer mit einer Überdimensionierung der Betriebsmittel einher. Die beiden Extremfälle bilden dabei ein stark überdimensionierter Energiespeicher, mit dem keine Einspeisung ungenutzt bleibt, und eine stark überdimensionierte Energieerzeugungsanlage, mit der sehr viel Energie ungenutzt bleibt ab. Ein wirtschaftlich-technisches Optimum entsteht durch die Diversifizierung der Einspeisung in einem Hybridsystem. Dabei ergibt sich in Summe aus den jeweiligen Schwankungen der Einspeisungen ein gleichmäßigeres Einspeiseprofil, und es ist auch bei einer Störung eine weitere Energiequelle vorhanden, wodurch die Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung erhöht werden kann. Ebenfalls sinkt die empfohlene Größe des Energiespeichers, der zur Überbrückung von Zeiten ohne ausreichende Einspeisung notwendig ist, durch die Wahl mehrerer Energiequellen und zieht so eine Verringerung der Investitionskosten nach sich.

Photovoltaik-Systeme besitzen eine hohe Zuverlässigkeit und bilden ein nahezu wartungsfreies System mit einer Lebensdauer von ca. 20 Jahren. KWEA sind technisch bislang nicht so weit ausgereift und im täglichen Betrieb erprobt, sodass sich eine geringere Verfügbarkeit einstellt. Bei entsprechender Wartung ergibt sich eine vom Hersteller prognostizierte Lebensdauererwartung von 10 – 15 Jahren. Die Investitionskosten für ein Hybridsystem liegen im Bereich von 5.000 bis 10.000 Euro.

- Energieversorgung im Sensor- bzw. knotenautarken Versorgungskonzept (Leistungsklasse 2)

Die zweite Leistungsklasse beinhaltet alle Komponenten, die in einem knoten- bzw. sensorautarken Systemkonzept zur Bereitstellung und Speicherung von Energie eingesetzt werden. Die Energieversorgung wird dabei mittels „Energy Harvesting“, der Energiegewinnung aus der unmittelbaren Umgebung, wie beispielsweise aus Sonnenlicht, Vibrationen oder Temperaturdifferenzen, also durch kleine Photovoltaik-Module, Piezo-, elektrodynamische oder thermoelektrische Generatoren vorgenommen.

Technologieübergreifend ist die elektrische Leistungsbereitstellung durch diese Harvester sehr gering, sie befindet sich im Bereich von einigen  $\mu\text{W}$ . Daher sind für die Entwicklung eines autarken Versorgungskonzepts alle Hard- und Softwarebereiche bezüglich ihres Energieverbrauchs zu optimieren.

Die zur Bauwerksüberwachung eingesetzte Sensorik ist prinzipiell unabhängig vom Versorgungskonzept, jedoch müssen zur autarken Versorgung sehr energieeffiziente Messsysteme eingesetzt werden, da nur begrenzt Energie zur Verfügung steht. Daher wird der Energiebedarf der Sensorik detailliert dargestellt.

Durch die sehr geringen Leistungen der Harvester und ihre eingeschränkte Verfügbarkeit aufgrund der natürlichen oder erzwungenen Fluktuation der Umgebungsenergie besteht die Notwendigkeit eines Energiemanagementsystems, das beispielsweise die Ladung vorhandener Energiespeicher überwacht und optimiert.

Für die Auswahl geeigneter Energy Harvester erfolgt eine Untersuchung des Energieangebots an Brückenbauwerken im Nahbereich der Sensorik. Bei der Energieversorgung durch thermoelektrische Generatoren aus Temperaturdifferenzen stehen verschiedenen Möglichkeiten zur Verfügung. Dabei reichen die Temperaturdifferenzen innerhalb eines Brückenbauwerks nicht für eine Energiebereitstellung aus. Die sich ergebende Temperaturdifferenz zwischen direkt angestrahlten Flächen und der Umgebungsluft besitzt sehr große saisonale Schwankungen, sodass eine Energieversorgung nahezu ausschließlich im Sommerhalbjahr möglich ist. Die Zeitpunkte, die eine Versorgung ermöglichen, liegen im Durchschnitt bei ca. 20 % des Jahres. Daher wird eine stetigere Energieversorgung empfohlen.

Die Energie aus Vibration durch Wind oder Verkehrsaufkommen kann mit Hilfe von piezo-elektrischen Generatoren genutzt werden. Aufgrund der sich ausbildenden Schwingungsmoden im niedrigen Frequenzbereich sind Systeme im Bereich von einigen  $\text{dm}^3$  zur Gewinnung notwendig. Die Höhe der Schwingungsamplituden und die sich



ausbildenden Resonanzfrequenzen sind ortsabhängig im Brückenbauwerk und verändern sich aufgrund von Temperaturschwankung. Aus diesem Grund müssen zur Bestimmung der einzelnen Schwingungsmoden im Vorfeld der Installation eine Modellierung des Brückenbauwerks und anschließend eine Feinjustierung am Bauwerk stattfinden. Zusätzlich ist durch das Abdriften der Resonanzfrequenz im schlechtesten Fall aufgrund der schmalbandigen Verstärkung eine regelmäßige Nachjustierung erforderlich, wodurch der Wartungsaufwand steigt. Daher muss einzelfallabhängig über das Potential entschieden werden. Ein großer Vorteil der Versorgung aus Vibration sind jedoch die geringeren saisonalen Schwankungen aufgrund des gleichmäßigeren Verkehrsaufkommens.

Die geeignetste Möglichkeit ist die elektrische Energieversorgung durch kleine PV-Module, deren Energieangebot, wie beschrieben, ebenfalls täglichen sowie saisonalen Schwankungen unterliegt. Der Energiebedarf der Sensorik besitzt eine starke Abhängigkeit vom Messintervall. Auch mit den energiesparendsten Sensoren aus MEMS-Technologie (Micro-Elektro-Mechanical Systems) ergibt sich ein Energiebedarf im Bereich zwei- bis dreistelliger Wattsekunden (Ws) am Tag bei hohen Werten des Messintervalls. Daraus folgt, dass für diese Messungen PV-Module zur Energieversorgung im Bereich weniger  $\text{dm}^2$  notwendig sind.

Bei geringen Werten des Messintervalls spielt die Leistungsaufnahme der Sensorik hingegen eine geringere Rolle für den Energiebedarf. Die Zeitpunkte, zu denen der Microcontroller und die Peripherie ausgeschaltet sind, überwiegen deutlich gegenüber den Messzeiten, und somit bestimmt die Leistung dieser in den Low-Power-Modi den Energiebedarf des Energy Harvesting Systems. Aus diesem Grund ist bei der Auswahl der Komponenten auf die Energiespareigenschaften des Microcontrollers und der Peripherie zu achten. Dies kann Einsparungen zwischen den Low-Power-Modi der Microcontroller von einigen tausend Ws am Tag ermöglichen.

Im vorliegenden Abschlussbericht wird der Energiebedarf für eine Standardinstrumentalisierung aus Temperatur-, Dehnungs-, Feuchtigkeits-, Korrosions-, Neigungs- und Verschiebungsmessung ermittelt, mit dessen Hilfe auf die Dimensionierung der zur Versorgung einsetzbaren Energiequellen in einem sensorautarken Konzept geschlossen wird.

## 18 Literaturverzeichnis Accesspoint

- [1] **Kaltschmitt, M., Streicher, W., Wiese, A.:** Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte, Springer Verlag, Berlin, 2006.
- [2] **Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung:** Integrales Monitoring- und Bewertungssystem für Offshore-Windenergieanlagen, 2010.
- [3] **Landau, M., Deubler, H.:** 10 Jahre Hybridsystem „Starkenburger Hütte“ Betriebserfahrungen mit einem innovativen Systemkonzept, 23. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 5. bis 7. März 2008.
- [4] **Bundesverband für WindEnergie e.V:** BWE Marktübersicht spezial – Kleinwindanlagen, Berlin, 2011.
- [5] **Kaltschmitt, M., Streicher, W.:** Regenerative Energien in Österreich, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009.
- [6] **Eicker, U.:** Solare Technologien für Gebäude, Vieweg + Teubner Verlag Wiesbaden, 2012.
- [7] **Retzing, S.:** Module für trübe Tage, Neue Energie, 04/2011, S. 58-60, 2011.
- [8] **Zentgraf, E.:** Vergleich der Energie-Erträge von kristallinen und Dünnschicht-Modulen, bezogen auf die jeweils gleiche Flächeneinheit von 1 m<sup>2</sup>, Waldaschaff: TEC-Institut für technische Innovationen GmbH & Co. KG, 2010.
- [9] **Deutscher Wetterdienst:** [www.dwd.de](http://www.dwd.de), letzter Zugriff: 28.01.2014.
- [10] **Notten, G.:** Hybrid wind-Photovoltaik energy systems. Stand-alone and hybrid wind energy systemy, Woodhead publishing Limeted, S. 216 – 252, Cambridge, UK, 2010.
- [11] **Solaranlagen-Portal:** Kennzahlen einer Solarbatterie, [www.solaranlagen-portal.com](http://www.solaranlagen-portal.com), letzter Zugriff: 22.04.2013.
- [12] **Standke, P.:** Potentiale für dezentrale Speicherung elektrischer Energie in der Niederspannungsebene, Bachelorarbeit 017, IEH FG EE Leibniz Universität Hannover, 2012.
- [13] **Energie-Forschungszentrum Niedersachsen;** e-home Energieprojekt 2020, Jahresbericht Goslar, November 2012
- [14] **Huschke, R.:** Dezentrale Energiespeicher - Schlüsselkomponeten für die Stromversorgung der Zukunft, Süddeutscher Verlag onpact GmbH, München, 2011.
- [15] **Wagner, A.:** Photovoltaik Engineering - Handbuch für Planung, Entwicklung und Anwendung, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [16] **SMA Solar Technology AG:** Einsatz von Inselnetz-Wechselrichtern SUNNY ISLAND in Mobilfunkbasisstationen, [www.sma.de](http://www.sma.de), letzter Zugriff: 07.03.2013.

- [17] **Liang, H., Su, J., Liu, S.:** Reliability Evaluation of Distribution System Containing MicroGrid, International Conference on Electricity Distribution, China, 2010.
- [18] **ePower-Solar:** www.epower-solar.com, letzter Zugriff: 22.04.2013.
- [19] **Smart Energysystems International AG:** www.smart-powershop.com, letzter Zugriff: 22.04.2013.
- [20] **Jungbauer, A.:** Diplomarbeit - Windenergienutzung in einem regenerativen Energiesystem, www.elite.tugraz.at, letzter Zugriff 13.10.2011.
- [21] **Hau, E.:** Windkraftanlagen: Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 4. Auflage, 2008.
- [22] **VDEW:** Eigenerzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz mit VDN-Ergänzungen, VDEW Energieverlag GmbH, Frankfurt am Main, 2005.
- [23] **Schlabbach, J.:** Netzgekoppelte Photovoltaikanlagen, VDE Verlag GmbH, Berlin, 2011.
- [24] **Antony, F., Dürschner, C., Remmers, K-H.:** Photovoltaik für Profis, Solarpraxis AG, Berlin, 2. Auflage, 2009.
- [25] **Hadamovsky, H.-F., Jonas, D.:** Solarstrom Solarthermie, Vogel Buchverlag, Würzburg, 2007.
- [26] **Watter, H.:** Nachhaltige Energiesysteme: Grundlagen, Systemtechnik und Anwendungsbeispiele aus der Praxis, Vieweg+Teubner Verlag, 1. Auflage, Wiesbaden, 2009.
- [27] **Bührke, T., Wengenmayr, R.:** Erneuerbare Energie – Alternative Energiekonzepte für die Zukunft, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2. Auflage, 2011.
- [28] **Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie:** Nutzerinformation Photovoltaik, www.dgs-solar.org, letzter Zugriff: 14.05.2013.
- [29] **Späte, F.; Ladener, H.:** Solaranlagen – Handbuch der thermischen Solarenergienutzung, Ökobuch Verlag, Staufen bei Freiburg, 2007.
- [30] **Albers, J.; Dommel, R.; Montaldo-Ventsam, H.; Übelacker, E.; Wagner, J.:** Der Zentralheizungs- und Lüftungsbauer – Technologie, Verlag Handwerk und Technik GmbH, Hamburg, 3. Auflage, 2002.
- [31] **Hartmann, U; Dinziol, M:** Fotovoltaik – Textmaterialien zur Weiterbildung, Materialien MH2a, DGS Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, Berlin, 2007.

- [32] **Bode + Christ Elektrotechnik GmbH:** Einfluss der Ausrichtung eines PV-Moduls auf seinen Energieertrag, [www.bodechrist.de](http://www.bodechrist.de), letzter Zugriff: 22.05.2013.
- [33] **Bundesverband Solarwirtschaft:** BSW Preisindex, [www.solarwirtschaft.de](http://www.solarwirtschaft.de), letzter Zugriff: 27.05.2013.
- [34] **Krause, M.:** Praxis Komplettsysteme, Photon, Ausgabe April/2012.
- [35] **Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V.:** [www.ffe.de](http://www.ffe.de), letzter Zugriff: 27.05.2013.
- [36] **Bundesverband WindEnergie e. V.:** A – Z Fakten zur Windenergie, [www.windenergie.de](http://www.windenergie.de), letzter Zugriff: 27.05.2013.
- [37] **DIN EN 50272-2:** *Sicherheitsanforderungen an Batterien und Batterieanlagen Teil 2: Stationäre Batterien*, Dezember 2001
- [38] **DIN EN 50272-2:** *Sicherheitsanforderungen an Batterien und Batterieanlagen Teil 2: Stationäre Batterien*, Dezember 2001
- [39] **Wesselak, V.; Schabbach, T.; Link, T.; Fischer, J.:** *Regenerative Energietechnik*, 2. Auflage, Springer Vieweg Verlag; Berlin, 2013
- [40] **Köthe, H. K.:** *Praxis Solar- und windelektrischer Energieversorgung*, Düsseldorf, VDI-Verlag, 1982
- [41] **Bildquelle:** <http://alternateenergycompany.com/wind-power-generators-systems/>, letzter Zugriff: 06.04.2014
- [42] **Gödecke Energie- und Antriebstechnik GmbH:**  
[http://www.aerocraft.de/downloads/Aerocraft\\_System.pdf](http://www.aerocraft.de/downloads/Aerocraft_System.pdf), letzter Zugriff: 06.04.2014
- [43] **Twele, J.; Gasch, R.:** *Windkraftanlagen: Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb*, Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010

## 19 Literaturverzeichnis Knotenautarke Versorgung

- [44] Stöcker, Horst: *Taschenbuch der Physik*, 6. Auflage, Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch. Frankfurt am Main, 2010
- [45] Müller, Monika; Freunek, Michael; Ungan, Tolgay; Reindel, Leonhard M.: *Wandler für energieautarke Systeme, Stand der Technik kommerzieller Energiewandler*, tm - Technisches Messen, 12/2009, S. 532-539
- [46] Dembowski, Klaus: *Energy Harvesting für die Mikroelektronik*, VDE Verlag GmbH, Berlin 2011
- [47] Micropelt GmbH, [www.micropelt.com](http://www.micropelt.com), Zugriff: 08.07.2013
- [48] Spreemann, Dirk; Folkmer, Bernd; Manoli, Yiannos: *Elektromagnetische Vibrationswandler – Techniken im Überblick und Vergleich*, tm - Technisches Messen, 12/2009, S. 540-545
- [49] Magnetsales, [www.magnetsales.co.uk](http://www.magnetsales.co.uk), Zugriff: 12.03.2013.
- [50] Magnet Sales & Manufacturing Inc., <http://magnetsales.com>, letzter Zugriff: 12.03.2013.
- [51] Arnold, D. P.: *Review of Microscale Magnetic Power Generation*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 43, No. 11, S. 3940 – 3951, November 2007.
- [52] Wenzel, H.; Pichler, D.: *Ambient Vibration Monitoring*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2005
- [53] Mehlhorn, Gerhard: *Handbuch Brücken*, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2010
- [54] BMBF-Projekt *Piezo-EN*; Öffentlicher Abschlussbericht, Nürnberg, 2011
- [55] Holst, Karl Heinz; Holst, Ralph: *Brücken aus Stahlbeton und Spannbeton*, 5. Auflage, Ernst & Sohn Verlag GmbH, 2003
- [56] Lichte, Ulf: *Klimatische Temperaturentwicklung und Kombinationsregeln bei Brückenbauwerken*,
- [57] Krüger, M.; Große, C.: *Einsatz von Sensorik an Brückenbauwerken - Schlussbericht FE 88.0001/2009*, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2010.
- [58] S + R Sensortec GmbH; Datenblatt Multiring-Elektrode
- [59] Protector AS, Datenblatt Camur II MRE node
- [60] S + R Sensortec GmbH; Datenblatt Anodenleiter
- [61] S + R Sensortec GmbH; Datenblatt Spreizringanode
- [62] S + R Sensortec GmbH; Installation Manual Anodenleiter

- [63] Schießl, P.; Raupach, M.: *Zerstörungsfreie permanente Überwachung der Korrosionsgefahr für die Bewehrung von Stahlbetonbauwerken – Sensorsysteme für den direkten und nachträglichen Einbau*, DGZfP – Fachtagung Bauwerksdiagnose – Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen, München, Januar 1999.
- [64] Retze, Ulrich: *Beispielhaft Untersuchung zum Einsatz von Monitoringmethoden an einer Brücke*, Dissertation - Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 2011
- [65] Beeby, S.; White, N.: *Energy harvesting for autonomous systems*, Artech House, Norwood, Massachusetts, 2010.
- [66] Energy Micro AS; Brochure EMF32
- [67] Shashank, P.; Inman, D. J.: *Energy Harvesting Technologies*, Springer US, New York, 2009
- [68] Raghunathan, V; Kansal, A; Hsu, J; Friedman, J; Srivastava, M: *Design Consideration for Solar Energy Harvesting Wireless Embedded Systems*, Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, 2005
- [69] EPCDoS/EPCOS: UltraCap™ Double Layer Capacitors, A New Energy Storage Device for Peak Power Applications, Product Profile, 2002
- [70] Gessler, R; Kraus, T: *Wireless-Netzwerke für den Nahbereich*, 1. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009
- [71] Schnellenbach-Held, M; Karczewski, B; Kühn, O: *Machbarkeitsstudie für ein System zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke*, Entwurf zum Schlussbericht zum BAST Projekt FE 15.0509/2011/GRB, Institut für Massivbau, Universität Duisburg-Essen, 2013
- [72] Brückenstatistik 2012, interne Auswertung der Bundesanstalt für Straßenwesen, März 2012
- [73] Naumann, J: *Brücken und Schwerverkehr – eine Bestandsaufnahme*, Tagungsband 19. Dresdener Brückenbausymposium, Institut für Massivbau, Dresden, 2009
- [74] Gellerich, W.: *Akkumulatoren – Grundlagen und Praxis*, Shaker Media GmbH, Aachen, 2011
- [75] Jossen, A; Weydanz, W.: *Akkumulatoren richtig einsetzen*, Ubooks Verlag, Neusäß, 2006

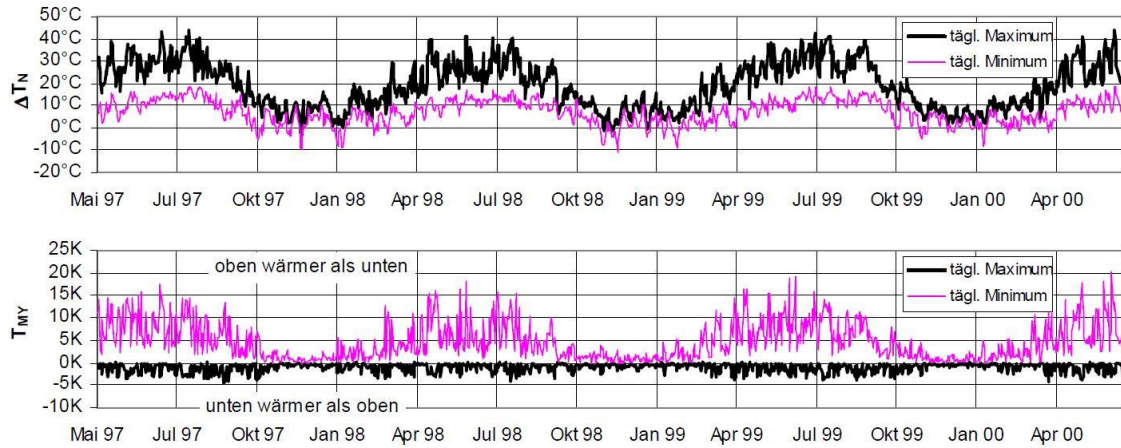
- [76] Müller, T; Friedrich, B.: *Development of a recycling process for nickel-metal hydride batteries*, Journal of Power Sources, 158, Seite 1498 – 1509, 2006
- [77] Hering, E.; Schönfeld, G.: *Sensoren in Wissenschaft und Technik*, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012
- [78] Schießl, P.; Souchon, T.; Breit, W.: *Berechnungsmodell zur Bestimmung von Feuchtigkeitsgehalten aus Widerstandsmeßwerten der Multi-Ring-Elektrode ermittelt in der Betonrandzone mittels Einbausensoren*, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 1998
- [79] Schießl, P.; Mayer, T.: *Lebensdauermanagementsystem, Schlußbericht zur ersten Phase des DAfStb/BMBF-Verbundvorhabens „Nachhaltig Bauen mit Beton“*, Beuth Verlag Berlin, 2007
- [80] Mehlhorn, K.: *Colorimetrische Mikrosensoren zur in-situ-Überwachung chemischer Parameter in Stahlbetonbauwerken*, Cuvillier Verlag Göttingen, Göttingen, 2010
- [81] EnOcean, Application Note 207, ECS 300/310 Solar Panel - Design Considerations
- [82] Schnellenbach-Held, Peeters, M, Miedzinski, G: *Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotentiale von Brückenbauwerken aus Beton*, 2. Entwurf zum Schlussbericht zum BASt Projekt FE 15.0510/2011/DRB, Institut für Massivbau, Universität Duisburg-Essen, 2013
- [83] Holst. A; Budelmann, H; Wichmann, H.-J.: *Improved Sensor Concepts for Durability Monitoring of Reinforced Concrete Structures*, Structural Health Monitoring 2011, DEStech Publications, Pennsylvania, U.S.A., 2011
- [84] Mateu L.; Codrea C.; Lucas, N.; Pollak, M; Spies, P.: *Energy Harvesting for Wireless Communication Systems Using Thermogenerators*, Proceeding of the XXI Conference on Design of Circuits and Integrated Systems (DCIS), Barcelona, Spain, 2006.
- [85] EnOcean GmbH, [www.enocean.com](http://www.enocean.com)
- [86] JUMO GmbH & Co. KG, [www.jumo.de](http://www.jumo.de)
- [87] Texas Instruments Incorporated, [www.ti.com](http://www.ti.com)
- [88] Microchip Technology Inc., [www.microship.com](http://www.microship.com)
- [89] Sensirion AG, [www.sensirion.com](http://www.sensirion.com)
- [90] Schmidt, W.-D.; *Senschaltungstechnik*, 3. Auflage, Vogel Industrie und Nedit GmbH & Co, Würzburg, 2007

- [91] Metra Mess- und Frequenztechnik, [www.mmf.de](http://www.mmf.de)
- [92] Analog Devices, Inc, [www.analog.com](http://www.analog.com)
- [93] Kionix Inc.; [www.kionix.com](http://www.kionix.com)
- [94] a.b.jödden GmbH; [www.abjoedden.de](http://www.abjoedden.de)
- [95] GLÖTZL Gesellschaft für Baumeßtechnik mbH, [www.gloetzl.de](http://www.gloetzl.de)
- [96] Preusser-messtechnik GmbH; <https://dms-technik.de>
- [97] Acam Messelektronik GmbH; [www.aacam.de](http://www.aacam.de)
- [98] FiberSensing, Sistemas Avançados de Monitorização, S.A.;  
[www.w3.fibersensing.com](http://www.w3.fibersensing.com)
- [99] Balluff GmbH; [www.balluff.com](http://www.balluff.com)
- [100] Murata Elektronik GmbH; [www.murata.eu](http://www.murata.eu)
- [101] Kaltschmitt, M., Streicher, W., Wiese, A.: *Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte*, 5. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2013
- [102] Umweltbundesamt: *Ratgeber: Batterien und Akkus*, Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau, 2012
- [103] Korthauer, R.: *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Springer-Verlag, Berlin, 2013
- [104] Ebert, C.; Friedmann; H., Lerzer; M.: *Teilvorhaben Bridge Monitoring PiezoEN Bridge*, Projektabschlusspräsentation, Würzburg, 2011
- [105] Kühn, P.: *Kleine Windenergieanlagen – Betriebserfahrungen & Ertragsabschätzung*, Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), Kassel, 2009.
- [106] Marlow Industries, inc.: Datenblatt EHA-PA1AN1-R02-L1, [www.marlow.com](http://www.marlow.com)
- [107] Sawo, F.; Klumpp, V.; Beutler, F.: *Intelligente Bauwerke - Anforderungen an die Aufbereitung von Messgrößen und ihrer Darstellungsform* FE 15.0548/2011/GRB, Dritter Zwischenbericht, Karlsruhe, 07.01.2014

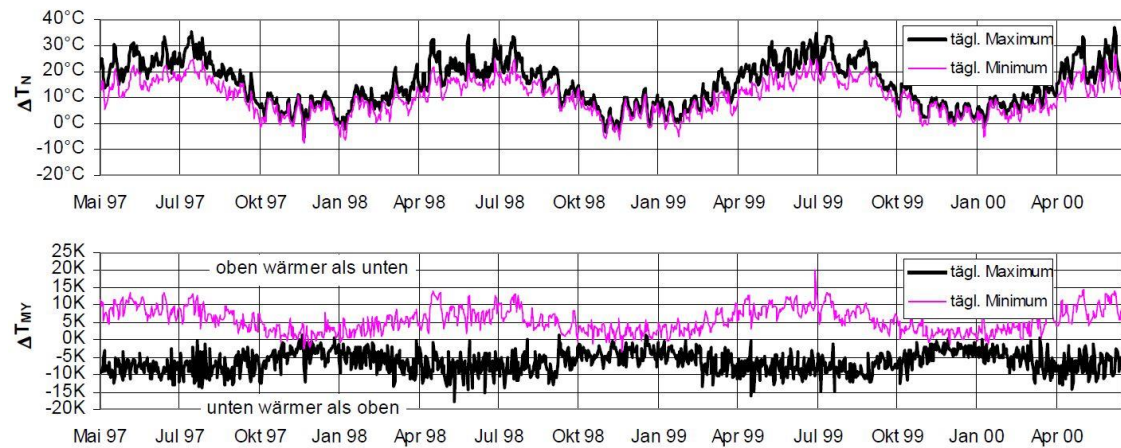


## 20 Anhang

### 20.1 Temperaturmesskurven



**Bild 20.1** Simulation der Extremwerte verschiedener Temperaturanteile einer Stahlbrücke [53]



**Bild 20.2** Simulation der Extremwerte verschiedener Temperaturanteile einer Verbundbrücke [53]

### 20.2 Parameter des Microcontrollers

	Leistung		Wake-up Zeit			
	10 MHz in mW	90 MHz in mW	Zyklen	Zeit in s	Gesamtzeit in s @ 10 MHz	Gesamtzeit in s @ 90 MHz
Operational	210	780	0	0	0	0
IDLE	72	72	1050	0,000001	0,000106	0,0000126
Standby	29	29	1125	0,000003	0,0001155	0,0000155
HALT	0,31	0,31	1125	0,011002	0,0111145	0,0110145

### 20.3 Parameter der Sensoren

Sensor		Leistung Aktiv in mW	Leistung Sleep in mW	Spannung in V	Messzeit in s	Daten in Bit
Temperatur	TMP 102	0,03	0,003	3	0,027	<b>32</b>
DMS	Vollbrücke 350	11,4	<b>0,57</b>	3	<b>0,003</b>	<b>32</b>
DMS	PicoStrain	0,39	0,006	3	0,009	<b>32</b>
Feuchtigkeit	MRE	432	<b>21,6</b>	3	<b>1</b>	<b>288</b>
Korrosion	Anodenleiter	432	<b>21,6</b>	3	<b>1</b>	<b>672</b>
Neigung	Neigungssensor	99	<b>4,95</b>	3	<b>0,003</b>	<b>32</b>
Neigung	MEMS	15	0,3	3	0,008	<b>32</b>
Verschiebung	Wegaufnehmer	15	<b>0,75</b>	3	<b>0,003</b>	<b>32</b>
<b>Feuchtigkeits- Detektor</b>	SHT21	0,6	0,00045	3	0,015	<b>32</b>

Die Parameter beruhen auf den in Abschnitt 13.1 dargestellten Daten. Sind keine Leistungen im Sleepmodus (Fett markiert in der Spalte Leistung Sleep) bekannt sind 5 % der Leistung im Aktivmodus angenommen. Ist die Messzeit nicht bekannt (Fett markiert in der Spalte Messzeit) sind verschiedene Annahmen getroffen worden. Die 0,003 s sind eine konservative Annahme aus der Zeit die der A/D-Wandler des MCU für eine vollständige Wandlung nach hochfahren aus dem HALT-Modus benötigt. Als Datenmenge sind pro Messwert 32 Bit angenommen. Als Parameter für den Feuchtigkeits-Detektor sind die Werte von Luftfeuchtigkeitssensor SHT21 aus **Tabelle 13.3** angenommen worden.

## 20.4 Parameter des Funkchips

EM351			
Aktiv	Leistung in mW		19,5
Sleep	Leistung in mW		0,001
	Wakeup+Shutdown Zeit in ms		0,115
Übertragung	Leistung in mW	Min Power	64,5
		0 dBm	82,5
		+ 4 dBm	90
		+ 8 dBm	127,5