

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Zur Umsetzung des Pariser Klimaschutzabkommens ist die Nutzung regenerativer Energien, insbesondere die Windenergie, von zentraler Bedeutung. Unter den erneuerbaren Energien leistet diese den größten Beitrag: über 20 % der gesamten Netzlast entfiel im Jahr 2020 auf Onshore Windenergieanlagen.<sup>1</sup> 2019 wurden auf diese Weise über 100 Terawattstunden Energie generiert.<sup>2</sup> Die Windenergiebranche befindet sich derzeit aufgrund sinkender Förderungen im Umbruch. Dieser wurde durch die Umstellung des Vergabeverfahrens für Windenergieanlagen in Deutschland im Jahr 2017 von einem Ausschreibungsverfahren mit Festvergütung auf ein Auktionsverfahren abgelöst.<sup>3</sup> Deutschland folgt damit den EU-Richtlinien, um eine wettbewerbsbegünstigende, kosteneffiziente Förderung erneuerbarer Energien zu ermöglichen.<sup>4</sup> Die zur Entlastung der EEG-Umlage ausdrücklich erwünschte Wettbewerbsintensivierung ist dementsprechend erfolgt und wirkt sich insbesondere auf die Anlagenhersteller aus. Diese müssen auf die sinkenden Preise für Windenergieprojekte reagieren und erleben infolgedessen einen hohen Kostendruck.<sup>5</sup>

---

<sup>1</sup> Vgl. Bundesnetzagentur (2021), Stromerzeugung und Stromhandel 2020

<sup>2</sup> Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020), Erneuerbare Energien

<sup>3</sup> Vgl. Fischer (2019), IW-Kurzbericht 71/2019, S. 1

<sup>4</sup> Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2017), EEG-Umlage 2017: Fakten und Hintergründe, S. 2

<sup>5</sup> Vgl. Meier (2019), Die Ausgabenstruktur eines Windparks während der Projektentwicklung, S. 161

Einen vergleichbaren Preiskampf hat die Solarbranche in Deutschland bereits hinter sich. Dort erzeugten der Wegfall breiter Subventionen sowie die Konkurrenz, besonders aus China, einen hohen Konsolidierungsdruck<sup>6</sup>. Viele Unternehmen mussten Insolvenz anmelden, der Branchenprimus Solarworld gar zweimal innerhalb kurzer Zeit.<sup>7</sup> Mittlerweile hat sich die Branche erholt und konnte in einer Studie des Fraunhofer ISE im Jahr 2018 sogar die geringsten Stromgestehungskosten aller Energietechnologien erreichen, gefolgt von Onshore Windenergieanlagen und Braunkohlekraftwerken.<sup>8</sup> Die Stromgestehungskosten, im Englischen auch „levelized cost of energy (LCOE)“ sind ein Maß für kosteneffiziente Energieumwandlung. Je geringer diese ausfallen, desto günstiger kann elektrische Energie durch Kraftwerke bereitgestellt werden.<sup>9</sup>

Wenn sich die Windenergiebranche ähnlich zur Solarbranche entwickelt, so ist zunächst eine Konsolidierungsbewegung in der Branche zu erwarten, aus der nur diejenigen Unternehmen erfolgreich hervorgehen werden, die sich als ausreichend robust, innovativ und anpassungsfähig erweisen, um ihre Herstellkosten und damit den LCOE konsequent zu senken und günstigere Produkte anzubieten. Diese Entwicklungen führen zu einer steigenden Leistungsfähigkeit der erfolgreichen Unternehmen dieses Transformationsprozesses.

---

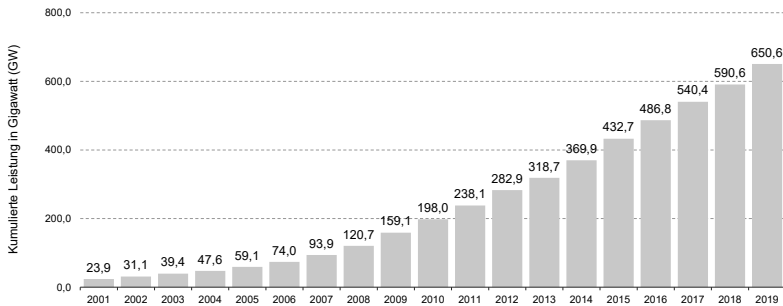
<sup>6</sup> Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020), Bruttobeschäftigung durch erneuerbare Energien 2000 bis 2018; Vgl. Reimer (2019), Die Hoffnung ist biegsam; Vgl. Reimer (2019), Die Hoffnung ist biegsam

<sup>7</sup> Vgl. Handelsblatt (2018), Solarworld ist schon wieder pleite

<sup>8</sup> Vgl. Kost et al. (2018), Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien März 2018

<sup>9</sup> Vgl. Tande et al. (2018), Offshore wind energy technology, S. 6f.

Die kumulierte installierte Windenergieleistung weltweit betrug im Jahr 2019 ca. 650.000 MW und ist in den letzten Jahren stetig wachsend (siehe Abbildung 1-1).<sup>2</sup>



**Abbildung 1-1: Kumulierte Windleistung in Gigawatt<sup>10</sup>**

Dabei werden jedes Jahr ca. 20.000 bis 30.000 neue Windenergieanlagen installiert, wovon über 30 % allein auf den chinesischen Markt entfallen, welcher nahezu ausschließlich von chinesischen Herstellern bedient wird. Für alle nicht-chinesischen Hersteller verbleiben daher weltweit etwa 13.000 bis 20.000 Windenergieanlagen pro Jahr, die verkauft, produziert und installiert werden können. Die Zahl, der pro Jahr produzierten Windenergieanlagen für einen Hersteller, beträgt – je nach Größe des Unternehmens – zwischen ca. 50 Stück und max. 2.000 Stück, was nach industriellen Maßstäben Klein- oder Kleinstserien entspricht.<sup>11</sup> Zugleich ist das Feld des Maschinen- und Anlagenbaus im Allgemeinen und die Windenergiebranche im Speziellen geprägt von kürzer werdenden Produktlebenszyklen, den steigenden Forderungen nach individuellen Produkten sowie dem steigenden Kostendruck durch die Globalisierung. Ein Grund für diese Entwicklung ist der zunehmende

<sup>10</sup> Vgl. GWEC (2020), GWEC - Global Wind Report 2019, S. 44

<sup>11</sup> Vgl. GWEC (2020), GWEC - Global Wind Report 2019

Wettbewerb der Märkte und das daraus resultierende Bestreben der Unternehmen, sich durch Produktdifferenzierung vom Wettbewerb abzuheben was als unmittelbare Konsequenz der VUCA-Welt anzusehen ist.<sup>12</sup> Insbesondere in der Windenergiebranche ergibt sich die Notwendigkeit der individualisierten Anlagen aufgrund externer Anforderungen. Diese externen Anforderungen ergeben sich aus den politischen und klimatischen Rahmenbedingungen einerseits und den Markt- bzw. Kundenanforderungen andererseits.

Die politischen und klimatischen Rahmenbedingungen umfassen etwa normative Netzanforderungen, Sicherheits- und Kennzeichnungsanforderungen, Standsicherheit, mittlere Windgeschwindigkeit, Luftdruck etc. Vor allem politische Entscheidungen, z.B. die jüngste Novelle des EEG-Gesetzes in Deutschland, haben starke Auswirkungen auf die Windenergiebranche und erfordern von den Unternehmen Anpassungsfähigkeit. Der mittlere Zuschlagswert für die im Auktionsverfahren ausgeschrieben Fördersätze sank im Jahr 2017 um fast 2 ct/kWh auf nur noch 3,82 ct/kWh.<sup>13</sup> Als Folge resultiert der bereits oben genannte hohe Kostendruck, der Anlagenbauer zwingt, ihre Herstellkosten zu senken, um weiter wirtschaftliche Windenergieanlagen anbieten zu können.

Weiterhin sind die kunden- und marktabhängigen Wünsche und Anforderungen (z.B. max. Transportabmessungen, Netzanschlussbedingungen, Netzfrequenz und -spannung, Schallanforderungen etc.) in der Windenergiebranche verglichen mit anderen Branchen sehr bedeutsam und divers.<sup>14</sup> Nahezu jedes Windenergieanlagen Projekt verlangt eine individuell zusammengestellte Windenergieanlage zur optimalen wirtschaftlichen Adressierung dieser Anforderungen, sodass die Hersteller

---

<sup>12</sup> Vgl. Schuh et al. (2017), Produktkomplexität managen, S. 21

<sup>13</sup> Vgl. Fischer (2019), IW-Kurzbericht 71/2019

<sup>14</sup> Vgl. Molch (2019), Projektmanagement-Office, S. 232

von Windenergieanlagen in den vergangenen Jahren eine hohe Variantenvielfalt erzeugt haben.<sup>15</sup>

Besonders die Automobilindustrie setzt angesichts der Herausforderung wachsender Komplexität bereits sehr erfolgreich Produktbaukästen ein, um gleichzeitig eine große kundenseitige Vielfalt und einen hohen Grad interner Standardisierung zu erreichen. Dazu werden die Produkte aus standardisierten Modulen flexibel zusammengesetzt. So können die Economies-of-Scale und die Economies-of-Scope gleichermaßen adressiert werden.<sup>16</sup>

### **1.1.1 Motivation aus Sicht der Praxis**

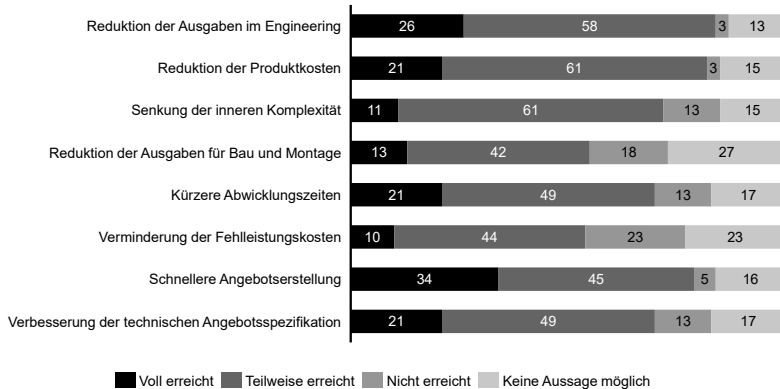
Auf Basis der zuvor beschriebenen Herausforderungen, welche sich durch die steigenden externen Anforderungen ergeben, können die folgenden Ziele als relevant für Unternehmen der Windenergiebranche erachtet werden. Unternehmen müssen in der Lage sein, flexibel und kosteneffizient auf die sich ändernden Anforderungen reagieren zu können. Eine Möglichkeit hierzu bieten Produktbaukästen, welche es Unternehmen erlauben, Flexibilitäts- und Kostensenkungspotenziale zu realisieren.<sup>17</sup> Abbildung 1-2 zeigt die Antworten von Unternehmen auf die Frage, welche Ziele bei der Einführung von Produktbaukästen verfolgt wurden und inwiefern diese Ziele erreicht werden konnten.

---

<sup>15</sup> Vgl. Reuter et al. (2016), Windkraftanlagen, S. 25

<sup>16</sup> Vgl. Schuh (2015), Leitfaden zur Baukastengestaltung

<sup>17</sup> Vgl. Schuh (2015), Leitfaden zur Baukastengestaltung



**Abbildung 1-2: Ziele bei der Einführung von Produktbaukästen<sup>18</sup>**

Skaleneffekte, wie sie sich bei Serienherstellern beispielsweise in der Automobilbranche erzielen lassen, können dabei im Maschinen- und Anlagenbau aufgrund kleinerer Serien häufig nicht im selben Maße erreicht werden.<sup>19</sup> Jedoch ergeben sich hier in Bezug auf die Gestaltung von Produktbaukästen andere Potenziale.

Beim Anlagenbau, zu dem auch die Windenergiebranche zählt<sup>20</sup>, treffen typischerweise wenige, hoch spezialisierte Anbieter auf einen beschränkten Nachfragemarkt mit wenigen Abnehmern.<sup>21</sup> Dies führt dazu, dass die Anbietenden sich sehr stark an einzelnen Kunden ausrichten. Es stehen häufig Kundenwünsche und Kundenindividualität im Fokus, die sich durch vermeintliche unterschiedliche Rahmenbedingungen und Funktionalitäten ergeben. Durch den kleineren Absatzmarkt und kleine-

<sup>18</sup> Vgl. maexpartners und VDMA Arbeitsgemeinschaft Großanlagenbau (2014), Modularisierung und Standardisierungsansätze im Anlagenbau

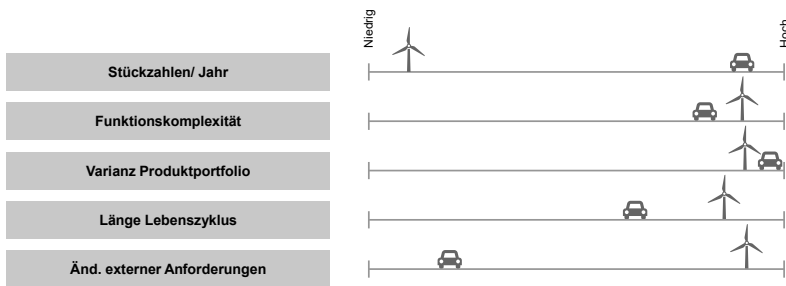
<sup>19</sup> Vgl. Vieweg (2001), Der mittelständische Maschinenbau am Standort Deutschland, S. 62

<sup>20</sup> Bundestag 21.12.2020 – Gesetz für den Ausbau erneuerbarer 21.12.2020, S. 9

<sup>21</sup> Vgl. Voigt (2010), Risikomanagement im industriellen Anlagenbau

ren Kreis an Abnehmenden ergibt sich eine deutlich niedrigere Stückzahl als in anderen Branchen. Daraus resultiert eine Kleinserie, Kleinstserien oder sogar eine Einzelfertigung. Für die Windenergiebranche bedeutet das, dass ein Großteil der Anlage kundenindividuell ausgelegt, entwickelt und konstruiert wird.

Abbildung 1-3 illustriert diese Zusammenhänge im Vergleich der Automobil- und der Windenergiebranche. Es ist ersichtlich, dass sich die Industrien hinsichtlich Funktionskomplexität, Varianz im Produktportfolio und Lebensdauer der Produkte ähneln. Große Diskrepanzen gibt es bei den Stückzahlen und der Änderung der externen Anforderungen.



**Abbildung 1-3: Komplexitätsvergleich der Automobilbranche und der Windenergiebranche<sup>22</sup>**

Im Weiteren soll nun ein Vorgehensmodell vorgestellt werden, welches Produktbaukästen, in Analogie zu der Automobilindustrie, zur Beherrschung der internen Komplexität bei gleichzeitigem breiten Produktportfolio nutzt. Aufgrund der Unterschiede zwischen den beiden Branchen ist neben der Erzielung von Skaleneffekten insbesondere die Verbesserung von Abläufen entlang der Wertschöpfungskette von Interesse. Hierzu können ein verbesserter Vertrieb mittels Konfiguration, eine op-

<sup>22</sup> Eigene Darstellung, WZL

timierte Logistik aufgrund der geringeren Teilevielfalt oder auch geringere Aufwände in der Qualitätskontrolle insbesondere im Bereich der Zertifizierung gezählt werden.

Das innerhalb des Forschungsprojekts „Modulbaukasten für Windenergieanlagen“, kurz „WEA-Baukasten“, mit dem Förderkennzeichen 0324164B entwickelte Vorgehen, hat dabei genau an diesen Punkten angesetzt und soll die Unternehmen bei der Umsetzung eines Produktbaukastens unterstützen.

### **1.1.2 Motivation aus Sicht der Forschung**

Ein Baukastensystem<sup>23</sup> ermöglicht Produktvarianten unterschiedlicher Gestalt und Funktion durch Kombination aus einer möglichst geringen Anzahl von Bausteinen unterschiedlicher Gestalt und Funktion zusammenzusetzen. Das Ziel ist der Aufbau eines technischen Systems aus einzelnen Modulen, Baugruppen und Komponenten. Komponenten sind in sich abgeschlossene und über Schnittstellen untereinander kompatible Elemente, die nicht weiter zerlegt werden können. Baugruppen bestehen aus mehreren Komponenten und/oder (Unter-)Baugruppen. Funktional und geometrisch unabhängige Subsysteme, welche durch standardisierte Schnittstellen flexibel miteinander kombiniert werden können, werden als Module bezeichnet.<sup>24</sup> Je nach Kombination dieser können technische Systeme unterschiedlicher Eigenschaften aufgebaut werden. Damit lassen sich spezifische Funktionsumfänge realisieren, welche die Konfiguration aus unterschiedlichen Modulen, Baugruppen und Komponenten darstellen. Durch die Kategorisierung in Module,

---

<sup>23</sup> Vgl. Breunig (2017), Produktarchitekturgestaltung mechatronischer Baukastensysteme

<sup>24</sup> Vgl. Schuh et al. (2017), Produktkomplexität managen, S. 94



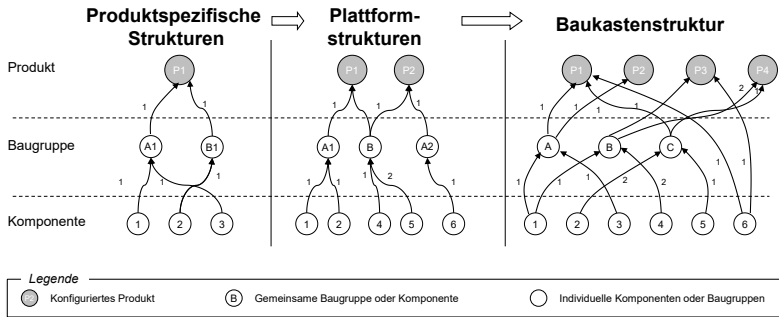
Baugruppen und Komponenten entsprechend ihrer Funktion (funktionssorientierte Gliederung), lassen sich Grund-, Hilfs-, Sonder-, Anpass- und auftragsspezifische Funktionen unterscheiden. Baukastensysteme, die auftragsspezifische Funktionen zulassen, werden als „offen“ bezeichnet. Andernfalls wird von „geschlossenen“ Baukastensystemen gesprochen.<sup>25</sup> Geschlossene Systeme haben folglich eine begrenzte und genau definierte Anzahl möglicher Kombinationen. Die sich ergebende Variantenanzahl bildet die sogenannte externe Vielfalt. Die Entwicklung von Windenergieanlagen erfordert ein hohes Maß an Anpassungsfähigkeit (siehe Kapitel 1.1.1), daher ist hier ein offenes System vorzuziehen.

Es gibt unterschiedliche Gestaltungsansätze zur Erreichung von Gleichheiten zwischen Produktvarianten. In der Windenergiebranche werden heutzutage hauptsächlich Plattformansätze verwendet, welche die Nutzung eines gemeinsamen Kerns von Gleichteilen über alle Produktvarianten hinweg forcieren. Dem gegenüber erlauben Baukastenansätze die flexible Kombination von Elementen, ohne auf einen gemeinsamen Kern zu bestehen (siehe Abbildung 1-4).<sup>26</sup>

---

<sup>25</sup> Vgl. Barg (2017), Kontextbezogene Auslegung von Produktbaukästen, S. 42f.

<sup>26</sup> Vgl. Arnoscht (2011), Beherrschung von Komplexität bei der Gestaltung von Baukastensystemen, S. 22ff.



**Abbildung 1-4: Unterscheidung von Plattform- und Baukastenstrukturen<sup>27</sup>**

Die Herausforderung besteht in der Übertragung von bestehenden Produktplattformen und Produktvarianten in einen Baukastenansatz, welcher auf die Besonderheiten und Rahmenbedingungen der Windenergiebranche eingeht.

Eine Übertragung der bestehenden Konzepte zur Baukastenentwicklung auf die Windenergiebranche mit ihren spezifischen Rahmenbedingungen war somit die Kernaufgabe des Forschungsprojekts. Hierzu galt es zuerst, das Wertschöpfungspotenzial eines Produktbaukastens für diese Anwendung zu konkretisieren. Die Frage, ob sich nennenswerte Skaleneffekte erzielen lassen oder nicht, spielte hierbei eine entscheidende Rolle. Weiteren wesentlichen Vorteilen einer Komplexitätsreduktion mittels eines modularen Produktbaukastens und den damit verbundenen geringeren Komplexitätskosten sowie Entwicklungszeiten standen potenzielle Nachteile, wie ein teilweises Over Engineering von Komponenten, entgegen. Zur Entwicklung eines modularen Baukastens für Windenergieanlagen musste daher im ersten Schritt eine Ana-

<sup>27</sup> Vgl. Arnoscht (2011), Beherrschung von Komplexität bei der Gestaltung von Baukastensystemen

lyse und Bewertung der Ist-Situation erfolgen. Die tiefgreifenden Änderungen, die eine Einführung eines modularen Baukastens für das gesamte Produktportfolio erfordern, sowie das damit verbundene hohe Entwicklungsrisiko, bedürfen einer umfassenden Konzeptbewertung, bevor die Umsetzung erfolgt.

Das im Zuge des Forschungsprojekts „WEA-Baukasten“ entwickelte Vorgehen adressiert dabei auch diese Fragestellungen und unterstützt dadurch eine sinnvolle Auswahl eines Baukastenkonzepts für Unternehmen in der Windenergiebranche.

### **1.1.3 Besonderheiten der Windenergiebranche**

Unternehmen in der Windenergiebranche sind speziellen Herausforderungen ausgesetzt. Während Baukastenkonzepte in anderen Branchen, etwa dem Automobilbau, weit verbreitet sind, lassen sich die Prinzipien dieser nicht ohne eine Adaption des Entwicklungsvorgehens an die spezifischen Gegebenheiten auf die Windenergiebranche übertragen. Windenergieanlagen werden in aller Regel in Kleinstserien gefertigt. Windparks mit mehr als 100 Anlagen sind eher selten, oft bestehen diese nur aus einer geringen Anzahl oder gar einer einzelnen Windenergieanlage.<sup>28</sup> Hersteller vertreiben wie bereits angemerkt etwa 50 bis 2.000 Windenergieanlagen pro Jahr. Windparks werden in Abstimmung mit den Kunden als Projekte und nicht als einzelne Produkte verkauft. Dies entspricht einem Engineer-to-Order-Prozess bei dem im Gegensatz zu einem Configure-to-Order-Prozess stets Entwicklungsaufwände anfallen. Weiterhin besteht ein Projekt in der Regel aus unterschiedlichen Typen von Windenergieanlagen, weil diese den spezifischen Bedingungen vor Ort angepasst werden. So wird dem Nachlauf-Effekt

---

<sup>28</sup> Vgl. Falkenberg (2015), Marktanalyse – Windenergie an Land, S. 5

Rechnung getragen, welcher die Beeinflussung einer Windenergieanlage durch andere beschreibt.<sup>29</sup> Die Kundenwünsche sowie die projekt- bzw. parkspezifischen Rahmenbedingungen stellen hohe individuelle Anforderungen. Zwar wird diesen externen Anforderungen durch die projektspezifische Konstruktion Rechnung getragen, Aspekte der Standardisierung spielen dabei jedoch meist eine untergeordnete Rolle. Dieser mangelnde Fokus, aber auch die verschiedenen Anforderungen an sich, resultieren in einer großen Varianz im Produktportfolio. Zu Beginn müssen daher die externen Anforderungen der Windenergiebranche an ein Baukastensystem bestimmt werden.

Die variantentreibenden Anforderungen an Windenergieanlagen lassen sich grob in drei Bereiche gliedern. Diese Teilbereiche beinhalten externe Anforderungen, projektinduzierte Anforderungen und prozessinduzierte Anforderungen. Die externen Anforderungen haben ihren Ursprung im Wesentlichen in den regions- oder länderspezifischen Rahmenbedingungen. Nationale Standards und Normen machen Vorgaben hinsichtlich Arbeitssicherheit und Anlagensicherheit. Die Einhaltung dieser Vorgaben werden im Allgemeinen durch Zertifizierung seitens unabhängiger Akkreditierungsstellen bestätigt.<sup>30</sup> Weiterhin lassen sich die häufig national vorgegebenen Netzanschlussbedingungen unter dieser Überschrift subsumieren, welche das Vorgehen vom Antrag über die Netzverträglichkeitsprüfung bis zur Trassierung und Kabelverlegung zum Netzanschlusspunkt regeln.

---

<sup>29</sup> Vgl. Kern et al. (2019), Das Potenzial von vertikalen Windenergieanlagen im Kontext wachsender Flächennutzungskonflikte und Akzeptanzprobleme der Windenergie, S. 294

<sup>30</sup> Vgl. Rheinland (2018), Prüf- und Zertifizierungsordnung für Windenergieanlagen, S. 2ff.