



LEIBNIZ UNIVERSITÄT HANNOVER

WIRTSCHAFTSWISSENSCHAFTLICHE FAKULTÄT  
INSTITUT FÜR WIRTSCHAFTSINFORMATIK

**WAHRSCHEINLICHKEIT EINES SCHADENEINTRITTS BEI  
WINDTURBINEN**

—

**EINE QUANTITATIVE UNTERSUCHUNG**

**BACHELORARBEIT**

Zur Erlangung des akademischen Grades „Bachelor of Science (B.Sc.)“ im Studiengang  
Wirtschaftsingenieur der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik, Fakultät für Maschinenbau und  
der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Leibniz Universität Hannover

vorgelegt von

Serhat Aral



Prüfer:

Prof. Dr. Michael H. Breitner

Betreuer:

Tobias Kraschweski

Hannover, den 25. Oktober 2022

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>II</b>
<b>2</b>	<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....</b>	<b>III</b>
<b>3</b>	<b>ABSTRACT .....</b>	<b>IV</b>
<b>4</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>5</b>	<b>THEORETISCHE GRUNDLAGEN.....</b>	<b>2</b>
5.1	FUNKTIONSWEISE EINER WINDKRAFTANLAGE.....	2
5.1.1	<i>Leistung</i> .....	2
5.1.2	<i>Widerstands- und Auftriebsprinzip</i> .....	4
5.1.3	<i>Achse und Orientierung</i> .....	6
5.2	KOMPONENTEN .....	7
5.2.1	<i>Fundament</i> .....	7
5.2.2	<i>Turm</i> .....	8
5.2.3	<i>Rotor</i> .....	8
5.2.4	<i>Triebstrang</i> .....	9
5.2.5	<i>Azimutsystem</i> .....	9
5.2.6	<i>Generator</i> .....	9
5.2.7	<i>Steuerungssystem</i> .....	10
5.2.8	<i>Umrichtersystem</i> .....	10
5.3	LEISTUNGSREGELUNG .....	10
5.3.1	<i>Stall</i> .....	10
5.3.2	<i>Pitch</i> .....	11
<b>6</b>	<b>METHODISCHES VORGEHEN.....</b>	<b>12</b>
<b>7</b>	<b>ZUVERLÄSSIGKEITSANALYSE.....</b>	<b>13</b>
7.1	NUTZUNGSGRAD .....	14
7.2	AUSFALLRATE .....	14
7.3	MTBF/MTTF.....	15
7.4	DATENQUELLEN .....	16
7.5	FORSCHUNGSSTAND .....	17
7.6	UNSICHERHEIT VON AUSFALLRATEN .....	19
7.7	IDENTIFIKATION KRITISCHER KOMPONENTEN .....	20
<b>8</b>	<b>ERGEBNISSE/DISKUSSION .....</b>	<b>21</b>
<b>9</b>	<b>AUSBLICK.....</b>	<b>22</b>
<b>10</b>	<b>HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN .....</b>	<b>22</b>
<b>11</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>IV</b>
<b>12</b>	<b>ANHANG.....</b>	<b>VI</b>
<b>13</b>	<b>EXPERTENINTERVIEWS .....</b>	<b>XII</b>
<b>14</b>	<b>EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG .....</b>	<b>XXII</b>

## 4 EINLEITUNG

Angesichts der aktuellen Klima- und Energiekrise wird unsere Gesellschaft vor immense Herausforderungen gestellt. Bislang gewährleisteten endliche Ressourcen einen wesentlichen Teil der Energieversorgung in Deutschland (Anhang 1). Änderung sieht demnach das „Erneuerbare-Energien-Gesetz“ (EEG-2023) vor. So soll der Anteil an regenerativen Energiequellen bis ins Jahr 2030 auf 80 Prozent erhöht werden. Im Gesetz steht dazu Folgendes: *„Zur Beschleunigung des Ausbaus in allen Rechtsbereichen wird im EEG der Grundsatz verankert, dass die Nutzung aller erneuerbarer Energien im überragenden öffentlichen Interesse liegt und der öffentlichen Sicherheit dient.“*. (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2022). Zum einen wird damit erreicht, dass zumindest in Deutschland der Strom zu einem großen Teil klimaneutral produziert wird und zum anderen wird die Abhängigkeit von Energieimporten vermindert. Laut dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz spielt die Windenergie momentan die tragende Rolle beim Ausbau. (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2022). 2020 wurde bereits rund ein Viertel am Strommix durch diese Form der Energiegewinnung erzeugt (Statistisches Bundesamt 2022). Damit zählte die Windenergie in diesem Jahr noch vor der konventionellen Stromerzeugung aus Kohle zum wichtigsten Energielieferanten. Konkret bedeutet der Ausbau auf 80 Prozent für die Windbranche an Land (onshore), dass die Leistung jährlich um 10 GW steigen soll. Auf See (offshore) soll die Leistung der Windenergie von 20 GW auf 30 GW erhöht werden (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2022).

Das ist ein ehrgeiziges Ziel und ein rapider Anstieg in kürzester Zeit. Im Anbetracht dieser Aspekte legitimiert sich die Frage, wie zuverlässig Windenergieanlagen funktionieren. So sind Windenergieanlagen hohen Windgeschwindigkeiten ausgesetzt, insbesondere im offshore Bereich. Das geht einher mit einer höheren Belastung und kann unter Begleitumständen zu Schäden führen. Jedoch verursachen nicht nur äußere Aspekte einen Stillstand, sondern auch interne Komponenten können zu einem Ausfall der Anlage führen. Die Forschungsfrage dieser Arbeit leitet sich demnach wie folgt ab:

*„Wie aussagekräftig ist die Zuverlässigkeitskennzahl der Ausfallrate von Windkraftanlagen?“*

## 8 ERGEBNISSE/DISKUSSION

In diesem Abschnitt werden die zentralen Ergebnisse der Arbeit vorgestellt. Diese werden auf die Forschungsfrage, die anfangs formuliert wurde, bezogen. Im Zuge der Literatuarbeit und den Interviews kann festgehalten werden, dass die Beantwortung der Forschungsfrage nicht pauschal erfolgen kann. ID-1 erklärt, dass es schwierig ist, übergreifende Daten zu bekommen. Zum einen liegt das daran, dass selten Auswertungen über ein Gesamtportfolio durchgeführt werden, und zum anderen werden Daten in der breiten Praxis aus Gründen des Kosten-Nutzenfaktor, nicht systematisch analysiert. Dieses Problem konnte ebenfalls in der Literatuarbeit nachgewiesen werden.

Es wird deutlich, dass diverse Unterscheidungen getroffen werden können hinsichtlich eines Anlagentyps. Eine generische Auswertung der Ausfallraten ist demnach weniger sinnvoll. Dieser Schluss kann auch durch die Teilfrage im Interview mit ID-1 gezogen werden. Dieser antwortet auf die Frage, ob erhobene Ausfallraten eines Instituts auf eigene Anlagen übertragbar sind wie folgt: *„Das stelle ich mir aus der eigenen Erfahrung aber eher schwierig vor, weil es zwischen den Herstellern und den einzelnen Anlagentypen so unterschiedlich ist, was dann letztendlich tatsächlich ausfällt, dass ich glaube, so eine allgemeine Auswertung ist immer mit Vorsicht zu genießen, sage ich mal.“* Es ist also nachdrücklich zu erwähnen, dass Ausfallraten in jedem Fall in einen sinnvollen Kontext gebracht werden müssen. Bisher unbeachteter Aspekt von WEA-Ausfällen sind die Wartungsverträge. ID-1 legt zudem offen, dass Wartungsverträge ebenfalls eine nicht zu missachtende Rolle spielen. Anlagen, die erst kürzlich errichtet wurden, sind in der Regel mit einem sogenannten Vollwartungsvertrag ausgestattet. Infolgedessen fallen diese seltener aus, da sie durch regelmäßige Wartung schlichtweg weniger anfällig für einen Ausfall sind. Bei Anlagen, die schon seit einer geraumen Zeit im Betrieb sind, ist es möglich, dass die Laufzeit dieses Vollwartungsvertrags bereits erlischt ist. Das Risiko eines Ausfalls wird in Kauf genommen, weil die Wartung einer solchen Anlagen teuer wäre, so ID-1. Zur Dauer der Gültigkeit antwortet ID-2, dass Ausfallraten bestenfalls nicht lange gültig sein sollten, da aktiv Unternehmungen angestellt werden, um diese zu senken. *„Idealerweise werden neue Raten ständig ermittelt“*, fügt er hinzu. ID-1 nimmt an, dass die Gültigkeit hinsichtlich der Antriebsart, also Anlagen mit Direktantrieb und Anlagen ohne Antrieb, eine recht hohe Gültigkeit haben. Aussagen über die Gültigkeit generische Anlagepopulationen können nicht getroffen. Zur Beantwortung der Forschungsfrage lässt sich festhalten, dass diese beschränkt ist und geknüpft ist an den Hintergrund der Anlage. ID-1 erklärt, dass die Unsicherheit/Varianz der Interpretation der Ausfallraten relativ groß ist. Die Unsicherheit wird ebenfalls in der Antwort von ID-2 deutlich. Dieser erläutert, dass falsche Schlüsse gezogen werden können, indem man zwei Fälle vergleicht, die tatsächlich unterschiedlich waren. Abschließend lässt sich sagen, dass die Aussagekraft einer generischen

Ausfallrate zwar gering ist, allerdings geben diese eine Tendenz, welche Komponenten störanfällig sind.

## 9 Ausblick

Für diesen Abschnitt wurden ID-2, welcher Experte auf dem Gebiet der prädiktiven Instandhaltung ist, Fragen zur Schadensvorbeugung gestellt. Mittels künstlicher Intelligenz können Vorhersagen getroffen um Fehler frühzeitig zu erkennen. Diese Fehler können bereits ein bis zwei Wochen im Voraus erkannt werden. Entsprechend können Wartungsmaßnahmen rechtzeitig eingeleitet werden, um die Anlage vor einem größeren Ausfall zu schützen. In 90 % der Fälle, ergänzt er, können zuverlässige Vorhersagen über die Schadensart getroffen werden. Künstliche Intelligenz bietet großes Potenzial in der Schadensminimierung von WEA. Fokus zukünftiger Forschung könnte also die prädiktive Instandhaltung auf Grundlage von Machine Learning sein.

## 10 Handlungsempfehlungen

Es wurde festgestellt, dass die Betrachtung der Ausfallrate für WEA ohne Berücksichtigung des Hintergrundes problematisch ist. Da verschiedene Institutionen unterschiedliche Anlagen im Portfolio analysieren, ist es sinnvoll aufzulisten, welchen Umfang diese Umfragen haben. In der nachstehenden Tabelle sind die wichtigsten Institutionen dargestellt, die Zuverlässigkeitsanalysen für WEA erstellt haben.