

Risikoanalyse der Nutzung von Kleinwindkraftanlagen in urbanen Gebieten

Larissa ZAJICEK¹, Markus DRAPALIK

Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften, Universität für Bodenkultur Wien
Borkowskigasse 4 BAR 4, 1190 Wien
larissazajicek@boku.ac.at
www.risk.boku.ac.at

Kurzfassung:

Kleinwindkraftanlagen (betrachtet wurden Anlagen bis 10 kW Nennleistung) ermöglichen die Nutzung von Windenergie an Standorten, die für große Windkraftanlagen nicht geeignet sind. Sie bieten, ergänzend zur Photovoltaik, die Möglichkeit einer dezentralen Energieproduktion in urbanen Gebieten sowie der Umsetzung von Plusenergiehäusern. Auf Grund mangelnder Standardisierung ist der Markt für Kleinwindkraftanlagen hinsichtlich Qualität und Sicherheit der Anlagen sehr divers. Gerade in dicht besiedelten Gebieten ist die Sicherheit der Anlagen jedoch vorrangig zu betrachten. Ziel dieser Arbeit ist eine quantitative Erhebung der unmittelbaren Risiken für Personen durch Kleinwindkraftanlagen mit dem Ziel der Detektion von Schwachstellen und Verbesserungspotentialen. Hierzu wurde die Probabilistische Sicherheitsanalyse erstmals auf die Technologie der Kleinwindkraft adaptiert. Als Datengrundlage dienen die Erhebungen des Energieforschungsparks Lichtenegg. Im ersten Teil der Arbeit wurden vier auslösende Ereignisse für die drei herbeigeführten Schadensfälle *Brand*, *fallende Anlageteile* und *Eiswurf* ermittelt. Im zweiten Teil wurde der Einfluss der Kriterien *Achsenorientierung*, *Nennleistung ≤ 5 kW* und *Zertifizierung* auf das auslösende Ereignis *Materialversagen* getestet. Schadenshäufigkeiten sowie die Effizienz von verschiedenen Sicherheitssystemen wurden im dritten Schritt mittels Ereignisbäumen betrachtet. Es zeigt sich, dass gerade für eine urbane Anwendung von Kleinwindkraftanlagen Verbesserungspotentiale hinsichtlich Sicherheit und Wirtschaftlichkeit bestehen. Besonders *Eiswurf* und *fallende Anlageteile* haben eine hohe Auftrittswahrscheinlichkeit. *Brand* stellt hingegen nur ein sehr geringes Risiko dar.

Keywords: PSA, Probabilistische Sicherheitsanalyse, Kleinwindkraft, urbane Windkraft

¹ Jungautorin

1 Einführung

Die Energieversorgung ist eine der größten Herausforderungen unserer Zeit. Die Kombination aus Bevölkerungswachstum und Klimawandel erfordert eine Umstrukturierung des Energiesystems. Windenergie spielt eine der wichtigsten Rollen in dieser Transformation (IEA, 2014). Große Windkraftanlagen, die stetig in Leistung und Höhe zunehmen, sind die gängige Lösung zur Nutzung von Windenergie. Nach aktuellem Stand der Technik sind diese, an Standorten mit hohem Wind und ausreichend verfügbarer Fläche, die effizienteste Methode zur Windenergienutzung. Oft sind diese Standorte jedoch weit vom Verbraucher entfernt oder bereits genutzt.

Kleinwindkraftanlagen (KWKAs) ermöglichen die Nutzung von Windenergie an Standorten, die für große Windkraftanlagen ungeeignet sind. Aktuell ist die gängigste Anwendung für KWKAs der Inselbetrieb in Gebieten ohne Zugang zu einem verlässlichen Stromnetz. Sie ermöglichen die Versorgung einzelner Haushalte oder kleiner Betriebe, oft in Kombination mit PV-Systemen und Batteriespeichern. Ein weiterer Anwendungsbereich für KWKAs stellt die dezentrale Energieproduktion in urbanen Gebieten dar. Die europäische Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden schreibt vor, dass ab 2020 alle Neubauten dem Niedrigstenergiegebäude-Standard entsprechen müssen (Artikel 9 Abs 1, 2010/31/EU). Die Umsetzung dieser Richtlinie verlangt die Integration von Energiesystemen in Gebäuden. Neben der Photovoltaik könnten KWKAs hierzu maßgeblich beitragen. Ein Markt für KWKA besteht bereits, dieser ist jedoch sehr divers. Auf Grund mangelnder Standardisierung und Zertifizierung gibt es große Unterschiede nicht nur bezüglich Effizienz, sondern ebenfalls hinsichtlich Qualität und Sicherheit der KWKAs (Jüttemann, 2016). Einige Forschungsarbeiten beschreiben ernstzunehmende Schadensfälle von KWKAs (Sumanik-Leary, 2013). Gerade in dicht besiedelten Gebieten ist die Sicherheit der Anlagen jedoch essenziell. Wirtschaftlichkeit ist auf Grund des teuren Genehmigungsprozesses und der schlechteren Windverhältnisse bei der urbanen Nutzung von KWKAs selten gegeben. Eine zuverlässige und sichere Energieproduktion kann zur Kostenreduktion beitragen. Daher muss betrachtet werden, welche Sicherheitssysteme notwendig sind um eine sichere und effiziente Energieproduktion zu gewährleisten, ohne die Anlagen zu komplex zu gestalten.

In dieser Arbeit wurden KWKAs verschiedener Designs bis 10 kW Nennleistung betrachtet um folgende Fragen zu beantworten: Welche unmittelbaren Risiken für Personen entstehen durch die urbane Nutzung von KWKAs, welche Reduktionspotentiale bestehen und haben diese Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit? Ziel dieser Analyse ist eine quantitative Abschätzung der Gefährdungspotentiale durch die Nutzung von KWKAs in urbanen Gebieten. Diese soll weiter zur Ermittlung von Schwachstellen und Verbesserungspotentialen der verschiedenen Sicherheitssysteme von KWKAs beitragen. Hierzu wurde die Methodik der Probabilistischen Sicherheitsanalyse (PSA) an die Kleinwindkraft adaptiert.

2 Methodische Vorgehensweise

Datengrundlage für die Analyse sind die Schadensbeobachtungen im Forschungspark Lichtenegg, Niederösterreich. Hier werden seit 2011 verschiedene KWKAs getestet. In dieser Analyse wurden 15 verschiedene Anlagen betrachtet, die im Zeitraum April 2011 bis April 2016 getestet wurden. Insgesamt traten in diesem Zeitraum sieben Schäden auf.

Zur Ermittlung der zu betrachtenden Schäden sowie der auslösenden Ereignisse wurden weiter die Daten von Sumanik-Leary (2013) sowie Kühn (2007) betrachtet. Sumanik-Leary (2013) betrachtete handgefertigte KWKAs nach dem Design von Hugh Piggott, die im Zeitraum 2008 bis 2010 in der Region Cajamarca in den Anden, Peru errichtet und betrieben wurden. Die Daten von 35 KWKAs wurden analysiert. Innerhalb der drei Jahre traten 70 Schadensfälle auf, von denen 25 in dieser Betrachtung keine Rolle spielen, da sie keine physische Gefahr für Personen darstellen. Hierzu zählen vor allem Kabelbruch und Kurzschluss. Die Betrachtung der anderen 45 Schadensfälle hat wesentlich zur Identifizierung der auslösenden Ereignisse beigetragen. In Kühns Studie wurden 253 KWKAs von 16 verschiedenen Herstellern innerhalb Deutschlands zwischen 1989 und 2007 betrachtet. Jede KWKA wurde mindestens 10 Jahre lang evaluiert. Das Monitoring war Teil des „Scientific Monitoring and Evaluation Program“ innerhalb des „250MW Wind“ Förderprojekt der deutschen Bundesregierung. Da die Originaldaten nicht zur Verfügung standen, konnte für die vorliegende Analyse nur die publizierte Zusammenfassung zur Ermittlung von Fehlerursachen herangezogen werden.

Die PSA ist ein Tool zur Betrachtung der Sicherheit von technischen Anlagen. Die ursprüngliche Anwendung ist die Risikobeurteilung von Kernkraftwerken. Mittels Ereignisbäumen („Event Trees“, ET) werden Unfallsequenzen dargestellt und so die Wahrscheinlichkeit ungewollter Szenarien ermittelt. Berechnungsgrundlage sind die Versagenswahrscheinlichkeiten der Sicherheitssysteme sowie die Auftrittshäufigkeiten der auslösenden Ereignisse (Nusbaumer, 2009). Die sequenzielle Schadensbetrachtung bietet neben quantifizierten Aussagen zum Schadenseintritt die Möglichkeit konkrete Verbesserungspotentiale zu identifizieren. Die PSA wurde in folgenden sechs Schritten durchgeführt:

1. Definition des Risikoziels
2. Ermittlung der Schäden von KWKAs mit Gefährdungspotential für Personen in unmittelbarer Nähe
3. Identifizierung der auslösenden Ereignisse für die ermittelten Schäden
4. Berechnung der Auftrittshäufigkeiten für die auslösenden Ereignisse am Standort Lichtenegg
5. Identifizierung und Quantifizierung von Einflussfaktoren auf das auslösende Ereignis Materialversagen
6. Betrachtung verschiedener Sicherheitssysteme und Ermittlung der Schadenshäufigkeiten für die Beispielanlagen mit Hilfe von Entscheidungsbäumen

Schritt 2 und 3 wurden durch Analyse der drei Datenpools durchgeführt. Ergänzend wurden ExpertInnen aus der Industrie sowie dem Wissenschaftssektor befragt. Betrachtet wurden verschiedenste sich bereits in Anwendung befindende KWKAs mit einer Nennleistung bis 10 kW. Zur Berechnung der Auftrittshäufigkeiten der auslösenden Wetterereignisse (Schritt 4) wurden die von der Energiewerkstatt eV am Standort Lichtenegg erhobenen Wetterdaten genutzt. Für das Einzige nicht wetterabhängige auslösende Ereignis *Materialversagen* wurde die Auftrittshäufigkeit auf Grund der in Lichtenegg beobachteten Schäden ermittelt. Da es sich bei *Materialversagen* um ein anlagenabhängiges Ereignis handelt, wurden verschiedene

Anlageeigenschaften mittels Signifikanztest auf ihren Einfluss auf das Materialversagen getestet (Schritt 5). Der Einfluss folgender Kriterien wurde betrachtet:

1. *Achsenorientierung*: Vertikal oder horizontal
2. *Nennleistung*: Größer/kleiner 5 kW
3. *Zertifizierung*

Da die Datengrundlage von sieben Schadensfällen relativ klein ist, wurde der *exakte Test nach Fisher* als Signifikanztest für die Anlageeigenschaften verwendet. Als Nullhypothese wurde angenommen, dass das getestete Kriterium keinen Einfluss auf die Schadenshäufigkeit hat. Die Berechnung wurde mit der Statistiksoftware R mit einem Konfidenzniveau von 95% durchgeführt. Bei Ermittlung eines signifikanten Einflusses auf die Fehlerhäufigkeit, wurde das Kriterium durch einen Risikofaktor (F_x) in die Formel zur Berechnung der Auftrittshäufigkeit des Schadens integriert.

$$h_{\text{Materialversagen}} = f_3 \cdot P(\text{HA3}) \cdot F_1 \cdots F_n \quad [1]$$

Der Risikofaktor wurde bei einem negativen Ergebnis des Tests auf Unabhängigkeit durch das Verhältnis von tatsächlichen Schadensfällen zu erwarteten Schadensfällen berechnet.

$$F = \frac{\text{beobachtete Schäden}}{\text{erwartete Schäden}} \quad [2]$$

In Schritt 6 wurden die Sicherheitssysteme verschiedener KWKAs betrachtet. Mit Hilfe von ETs wurden die Versagenshäufigkeiten der Sicherheitssysteme betrachtet und mit der Auftrittshäufigkeit der auslösenden Ereignisse multipliziert. Mit folgender Gleichung konnten so quantitative Aussagen zum Auftreten der Schäden getroffen werden und ermittelt werden, welche Schäden durch welche Sicherheitssysteme erfolgreich reduziert werden können und wo noch Verbesserungsbedarf besteht.

$$h_{\text{Schaden}} = \sum f_{\text{auslösendes Ereignis}} \cdot P_{\text{Versagen des Sicherheitssystems}} \quad [3]$$

3 Ergebnisse

Betreffend KWKAs kann grundlegend zwischen zwei Arten von Schäden unterschieden werden. Erstens Schäden die lediglich die KWKA selbst betreffen. Diese stellen in Bezug auf Personen keinen physischen sondern einen wirtschaftlichen Schaden dar. Dazu zählen beispielsweise Produktionsausfälle aufgrund technischer Versagen der Anlage durch Kabelbruch oder Generatordefekt. Die zweite Schadensart umfasst Anlageschäden, die eine direkte Gefahr für Personen in unmittelbarer Nähe darstellen. Gerade bei der Installation von KWKAs in urbanen Gebieten ist die Betrachtung von Schäden der zweiten Art essenziell, da davon auszugehen ist, dass sich Personen in direkter Nähe der KWKAs befinden.

Somit lautet das in dieser Analyse untersuchte Risikoziel: *Schäden an KWKAs mit Gefährdungspotential für Personen in unmittelbarer Nähe der KWKAs*. Schäden ohne direkte physische Gefährdung werden nicht betrachtet. Folgend bezieht sich der Begriff *Schaden* in dieser Arbeit nur noch auf Schäden im Sinne des Risikoziels.

Drei Schäden nach der Definition des Risikoziels konnten aus den drei Datenpools abgeleitet werden:

1. *Brand der Anlage*
2. *Fallende Anlageteile*
3. *Eiswurf*

3.1 Auslösende Ereignisse

Folgende vier auslösende Ereignisse wurden auf Grund der Daten und der ExpertInnengespräche ermittelt:

- f1* *hohe Windgeschwindigkeiten (>12 m/s)*
f2 *Blitzschlag*
f3 *Materialversagen*
f4 *Eisansatz*

Abbildung 1 zeigt den Zusammenhang zwischen auslösenden Ereignissen und Schäden. Folgend wurde für jedes der auslösenden Ereignisse (f1 bis f4) die standortsspezifische Auftrittshäufigkeit ermittelt. Da alle betrachteten Daten im Forschungspark Lichtenegg erhoben wurden, gelten für die gesamte Analyse die Standortbedingungen des Standorts Lichtenegg.

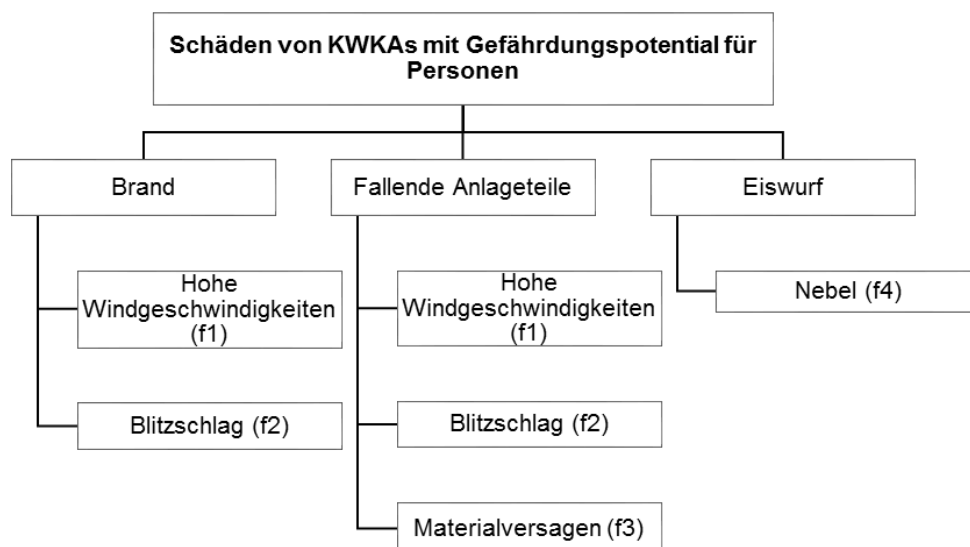


Abbildung 1: Schäden von KWKAs mit Gefährdungspotential für Personen und deren auslösende Ereignisse

3.1.1 Hohe Windgeschwindigkeiten (f1)

Daten über die auftretenden Windgeschwindigkeiten am Standort Lichtenegg werden durch die Energiewerkstatt eV seit Januar 2012 erhoben. Als *hohe Windgeschwindigkeiten* wurden auf Grund der Angaben in den Datenblättern verschiedener KWKAs und Literaturangaben Windgeschwindigkeiten ab 12 m/s definiert (Sumanik-Leary, 2013). Zur Berechnung wurden die Häufigkeiten für das Auftreten von Windgeschwindigkeiten größer gleich 12 m/s in 19 m Höhe am Standort Lichtenegg verwendet. Es wurde der Mittelwert pro Minute aus Messdaten mit einer Sekunde Messintervall verwendet. Es ergibt sich eine durchschnittliche Auftrittshäufigkeit von *10 589 Minuten pro Jahr*, also *rund 2 % der Zeit*.

3.1.2 Blitzschlag (f2)

Laut dem Austrian Lightning Detection and Information System, welches laut ÖNORM EN 62305-2 zur Risikoanalyse betreffend *Blitzschlag* heranzuziehen ist, beträgt die Blitzdichte am Standort Lichtenegg 2.39 Blitze / km² a. Der Einschlagradius eines auftretenden Blitzes wurde, wie in Tabelle 1 dargestellt, nach der Electro Geometrical Method (Cooray, 2015) berechnet. Der Einschlagradius (R) ist abhängig von der Stromstärke des Blitzes (I_p) sowie der Höhe des Objekts (h). Daher wurden folgende Annahmen getroffen:

1. I_p (Stromstärke des Blitzes) = 30 kA
2. h (Höhe der KWKA) = 20 m
3. KWKA höchstes Objekt in einem Umkreis mit 60 m Radius

Mit diesen Annahmen kann wie unten dargestellt, die *Attractive Area* (A), die potentielle Einschlagsfläche des Blitzes, berechnet werden. Über diese Fläche konnte die jährliche Blitzdichte als *0.024 Blitze pro Jahr* ermittelt werden.

Tabelle 1: Berechnung Blitzeinschlagshäufigkeit am Standort Lichtenegg nach der Electro Geometrical Method (Cooray, 2015)

Bezeichnung	Formel	Wert Lichtenegg	Einheit
Striking Distance	$S = 10 I_p^{0.65}$	91.228	m
Attractive Radius	$R = \sqrt{S^2 - (S - h)^2}$	57.001	m
Attractive Area	$A = \pi r^2$	10 207.429	m ²
Stroke Density	$N = 2.39 \cdot 10^{-6} \cdot A$	0.024	-

3.1.3 Materialversagen (f3)

Alle sieben Schadensfälle in Lichtenegg waren eine Folge von Materialversagen. Bei drei Fällen brach ein Rotorblatt, zwei Mal die Verbindung zum Mast, einmal der Mast selbst und einmal die Wicklungen im Generator. Insgesamt ergeben sich 30 Anlagebetriebsjahre aus den fünf Jahren mit jeweils mehreren parallel getesteten Anlagen. Sechs der sieben Schäden sind auf das Materialversagen als ursprünglichen auslösenden Faktor zurückzuführen. Aus diesen sechs Materialversagen sowie den 30 Betriebsjahren lässt sich somit eine Auftrittshäufigkeit für *Materialversagen* von *0.2 Mal pro Jahr* ableiten. Diese Aussage ist unabhängig vom verwendeten Material und Anlagendesign.

3.1.4 Eisansatz (f4)

Das Auftreten von Vereisungen ist aus Wetterdaten ableitbar. *Eisansatz* kann auf zwei Arten entstehen: Entweder durch das Anfrieren von Nebel oder durch gefrierenden Regen. Auftrittshäufigkeiten können für beide Ereignisse aus der topografischen Lage sowie den Wetterdaten des Standorts ermittelt werden. Hierzu werden die Kriterien verwendet, die Pospichal & Formayer (2011) als meteorologische Bedingungen für Eisansatz an großen Windkraftanlagen ermittelt haben.

Bezüglich Vereisung durch Nebel kann der exponierte Standort Lichtenegg näherungsweise mit dem Standort Bernstein verglichen werden. Bernstein ist einen repräsentativer Standort für „Erhöhte Standorte im Mittelburgenland und bucklige Welt“ (Pospichal & Formayer, 2011, S.

11). Dort tritt Vereisung *9.9 Mal pro Jahr* auf. Gefrierender Regen oder Eisregen wird definiert als „Unterkühlter Regen, der beim Auftreffen auf feste Gegenstände sofort zu Eis gefriert und die Gegenstände mit einem Eispanser überzieht“ (Deutscher Wetterdienst, 2016). Das Auftreten dieses Ereignisses ist im gesamten Osten Österreichs sehr ähnlich (Pospichal & Formayer, 2011). Daher lässt sich die für den Standort Schwechat ermittelte Häufigkeit von einem Ereignis alle zwei bis drei Jahre auf den Standort Lichtenegg übertragen. Es ergibt sich eine Häufigkeit von *0.36 Ereignissen pro Jahr*. Dieses Ereignis ist zwar deutlich seltener, jedoch oft von starken Böen begleitet und daher nicht zu vernachlässigen.

Somit ergibt sich in Summe eine *Eisansatz-Auftrittshäufigkeit von 10.26 Mal pro Jahr*. Aus den Erfahrungen der letzten fünf Jahre in Lichtenegg ist anzunehmen, dass es sich bei einem Großteil dieser Ereignisse um sehr geringe Eismassen handelt. Das beobachtete Auftreten von relevantem Eisansatz (Stücke mit einer Masse größer 200 g) ist mit 0 bis 1 Mal pro Jahr deutlich geringer. Daher wurde mit einer Wahrscheinlichkeit von 20 % angenommen, dass der Eisansatz eine relevante Masse aufweist. Zudem ist die KWKA mit einer Wahrscheinlichkeit von 73.5 % in Betrieb. Dies wurde über das minütige Mittel des Auftretens von Windgeschwindigkeiten größer gleich 2,5 m/s (durchschnittliche Anlaufgeschwindigkeit einer KWKA) ermittelt. Als Berechnungsgrundlage dienten die Daten der Monate Januar und Dezember, da zu dieser Zeit 90% des jährlichen Eisansatzes stattfindet (Pospichal & Formayer, 2011). Somit beträgt die Auftrittshäufigkeit von Eisansatz in einer relevanten Größe bei laufender KWKA *1.51 Mal pro Jahr* [4].

$$f_4 = f_{\text{Eisansatz}} \cdot P_{\text{relevante Größe}} \cdot P_{\text{Anlage in Betrieb}} \quad [4]$$

3.2 Einflussfaktoren auf Materialversagen

Folgend sind die Ergebnisse des Signifikanztestes nach Fisher für die drei Einflussfaktoren auf *Materialversagen* dargestellt. *Achsenorientierung*, *Nennleistung* und *Zertifizierung* wurden betrachtet.

Die Achsenorientierung einer KWKA, vertikal oder horizontal, bringt grundlegende Unterschiede im Aufbau sowie im Verhalten der Anlage mit sich. Zu dem existiert deutlich mehr Erfahrung im Betrieb von horizontalen KWKAs. Tabelle 2 zeigt die Schadensverteilung für das Kriterium *Achsenorientierung*. Das Kriterium beeinflusst die Häufigkeit von *Materialversagen* ($p=0.00045$). Folgender Risikofaktor F1 wurde berechnet [2]:

F1 horizontale Anlage 0.457

F1 vertikale Anlage 9.091

Tabelle 2: Schadensverteilung für das Merkmal Achsenorientierung

Merkmal: Achsenorientierung	Betriebserfahrungen [Volllaststunden]	tatsächliche Schadensfälle	erwartete Schadensfälle
1. Vertikal	23 401	4	0.44
2. Horizontal	351 355	3	6.56
Gesamt	374 756	7	7

$p=0.00045$

Auch in ihrer *Nennleistung* gibt es große Unterschiede zwischen KWKAs. Die in Lichtenegg getesteten Anlagen haben eine Nennleistung zwischen 1 und 10 kW. Die mittlere Nennleistung (5 kW) wurde als Grenze gewählt um zu ermitteln, ob kleinere oder größere Anlagen signifikant schadensanfälliger sind. Auch dieses Kriterium wurde als signifikantes Einflusskriterium ermittelt ($p=0.01961$). Folgender Risikofaktor F2 wurde berechnet [2]:

F2 größer-gleich 5 kW 0.394

F2 kleiner 5 kW 2.600

Immer mehr KWKAs durchlaufen die Zertifizierung IEC 61400-2 oder eine länderspezifische Zertifizierung, die sich an dieser orientiert. Bei dem Signifikanztest des Kriteriums *Zertifizierung* wurde nicht zwischen den verschiedenen Zertifizierungen unterschieden. Für dieses Kriterium konnte kein signifikanter Einfluss identifiziert werden ($p=0.4639$).

3.3 Schadenshäufigkeiten

Nach der Formel für Schadensauftrittshäufigkeiten [1] ergaben sich unter Berücksichtigung aller auslösenden Ereignisse folgende Auftrittshäufigkeiten für die drei Schäden:

$$h_{\text{Brand}} = \text{von } 2.07 \cdot 10^{-4} \text{ bis } 8.48 \cdot 10^{-3} \text{ Mal pro Jahr}$$

$$h_{\text{fallende Anlageteile}} = \text{von } 1.52 \cdot 10^{-2} \text{ bis } 7.43 \cdot 10^{-1} \text{ Mal pro Jahr}$$

$$h_{\text{Eiswurf}} = \text{von } 3.02 \cdot 10^{-1} \text{ bis } 1.51 \cdot 10^0 \text{ Mal pro Jahr}$$

Die großen Bandbreiten ergeben sich durch die Analyse unterschiedlicher KWKAs mit unterschiedlichen Sicherheitssystemen. Mit Hilfe der ETs werden folgend die größten Unterschiede dargestellt.

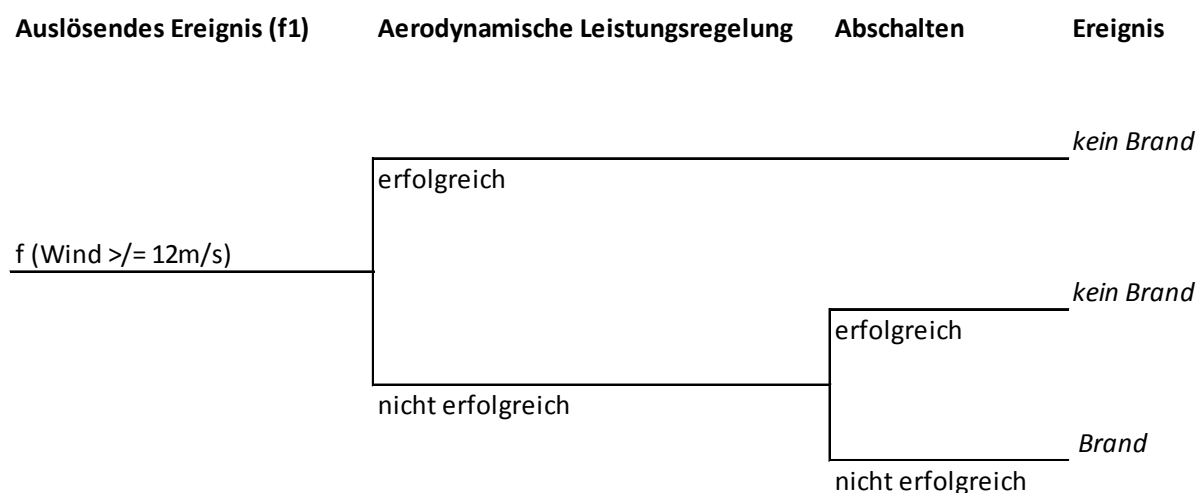


Abbildung 2: Ereignisbaum mit auslösendem Ereignis *hohe Windgeschwindigkeiten* und dem Schaden *Brand*

Abbildung 2 zeigt den ET zum auslösenden Ereignis *hohe Windgeschwindigkeiten* und dem Schaden *Brand*. Auch für den Schaden *fallende Anlageteile* ausgelöst durch *hohe Windgeschwindigkeiten* wurde dieser ET verwendet. Es kommen zwei Arten von Sicherheitssystemen zum Schutz vor hohen Windgeschwindigkeiten zur Anwendung. Die Aerodynamische Leistungsregelung, dargestellt durch den ersten Ast des ETs, regelt den Winkel der Flügel zur Windrichtung, sodass die Anlage auch bei höheren Windgeschwindig-

keiten produzieren kann ohne zu hohe Drehzahlen aufzuweisen. Beispiele für eine Aerodynamische Leistungsregelung sind das Pitch System, die Stall Regelung oder das Furling System (Mathew, 2006). Der zweite Ast des ETs ist dem Sicherheitssystem zum Abschalten der Anlage zugeordnet. Viele KWKA's verfügen über ein automatisches Abschaltssystem bei zu hohen Windgeschwindigkeiten.

Es zeigte sich, dass das Risiko des Schadens *Brand* durch das auslösende Ereignis *hohe Windgeschwindigkeiten* stark durch das Vorhandensein der Sicherheitssysteme reduziert werden kann. Vor allem ein redundantes Bremssystem reduziert die Möglichkeit eines Brandes stark. Während es bei KWKA's ohne Bremssystem zu 0.37 Bränden verschiedenster Anlageteile pro Jahr kommt (Sumanik-Leary, 2013), wird die Auftrittshäufigkeit durch ein redundantes Bremssystem auf $4.68 \cdot 10^{-3}$ pro Jahr reduziert. Die Aerodynamische Leistungsregelung reduziert die Auftrittswahrscheinlichkeit weiter auf $1.69 \cdot 10^{-5}$ Ereignisse pro Jahr. Auch das Auftreten des Schadens *fallende Anlageteile* durch das Ereignis *hohe Windgeschwindigkeiten* wird durch gängige Sicherheitssysteme von $7.43 \cdot 10^{-1}$ auf $3.81 \cdot 10^{-3}$ Ereignisse pro Jahr reduziert. Da häufig über die Auslegung der Anlage hinausgehende Schwingungen Ursache für Bruch auf Grund zu hoher Windgeschwindigkeiten zu sein scheinen, ist hier vor allem das Vorhandensein eines Vibrationssensors in Kombination mit einem automatischen Bremssystem effizient.

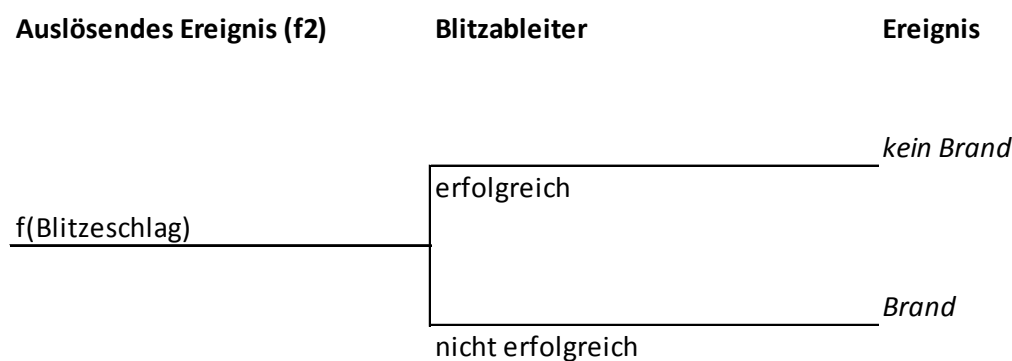


Abbildung 3: Ereignisbaum mit auslösendem Ereignis *Blitzschlag* und dem Schaden *Brand*

Abbildung 3 zeigt den ET für das auslösende Ereignis *Blitzschlag*. Viele Anlagen verfügen über eine Erdung durch den Mast. Das effiziente Ableiten des Blitzes durch dieses System ist durch den Ast des ETs dargestellt. Es zeigt sich, dass das Auftreten von *Brand* durch richtig ausgelegte Blitzableiter auf bis zu $1.9 \cdot 10^{-4}$ Ereignisse pro Jahr reduziert werden kann. Schlägt der Blitz in einen Teil des elektronischen Systems ein, wird er in den Boden abgeleitet. Durch die hohe Spannung schmelzen die Messinstrumente, der Generator kann jedoch geschützt werden. Bei einer KWKA ohne Erdung kann ein Blitzeinschlag direkt zum Generatorbrand führen. Nicht geschützt sind im Normalfall die Rotorblätter einer KWKA. Je nach verwendetem Material der Rotorblätter ist hier ein Brand möglich, jedoch auf Grund der schlechten Brennbarkeit der Materialien sehr unwahrscheinlich. *Fallende Anlageteile* auf Grund des Ereignisses *Blitzschlag* können daher lediglich auf $1.14 \cdot 10^{-2}$ Ereignisse pro Jahr reduziert werden.

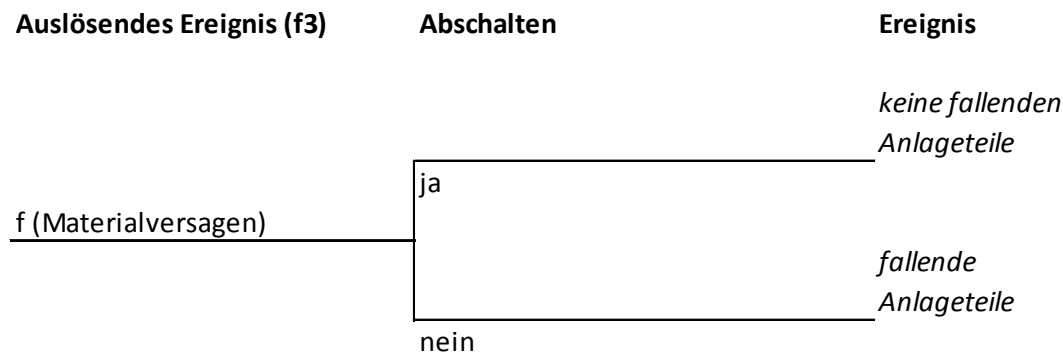


Abbildung 4: Ereignisbaum mit auslösendem Ereignis *Materialversagen* und dem Schaden *fallende Anlageteile*

Das Risiko des Schadens *fallende Anlageteile* ausgelöst durch *Materialversagen* ist in Abbildung 4 dargestellt. Innerhalb der erhobenen Daten ist das auslösende Ereignis häufig aufgetreten, daher ist eine Vermeidung des Schadens durch Materialfehler ein wichtiger Faktor zur Reduktion des Gesamtrisikos. Der Ast Abschalten beinhaltet jegliche Art der frühzeitigen Detektion von Materialversagen und dem damit verbundenen Abschalten der Anlage. Drei Arten der Detektion konnten ermittelt werden: Erkennen des Fehlers während der Wartung, elektronische Überwachung der Anlageparameter und Erkennung von Unwucht mittels einem Vibrationssensor. Vor allem Letztere zeigte eine deutliche Reduktion der Schadensfälle. Zudem haben die in Kapitel 3.2 beschriebenen Risikofaktoren einen großen Einfluss auf die Häufigkeit von *fallenden Anlageteilen* auf Grund von *Materialversagen*. Je nach Design und Sicherheitssystem variiert das Auftreten des Schadens *fallende Anlageteile* auf Grund von *Materialversagen* zwischen 0.73 und $3.66 \cdot 10^{-5}$ Ereignissen pro Jahr.

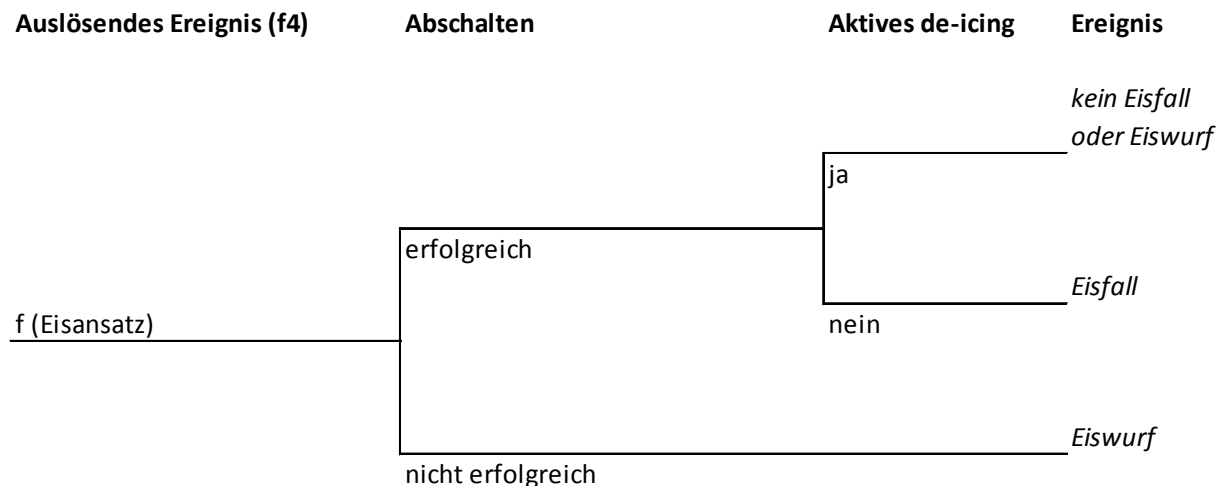


Abbildung 5: Ereignisbaum mit auslösendem Ereignissen *Eisansatz* und dem Schaden *Eiswurf*

Das auslösende Ereignis *Eisansatz*, dargestellt im ET Abbildung 5, kann mehrmals pro Jahr auftreten. Die meisten KWKAs verfügen über kein Sicherheitssystem zur Reduzierung des Risikos des Schadens *Eiswurf*. Es gibt die Möglichkeit durch Sensoren Eis zu detektieren und daraufhin die Anlage abzuschalten. Bislang werden synoptische oder optische Sensoren sowie Vibrationssensoren verwendet. Diese Sicherheitssysteme reduzieren *Eiswurf* auf bis zu $1.51 \cdot 10^{-1}$ Ereignisse pro Jahr, führen jedoch zu *Eisfall* (Abfallen der Eisansätze in unmittelbarer Nähe der Anlage). Aktives entfernen des Eises ist derzeit allenfalls händisch

vorgesehen. Durch Personal, welches große Eisstücke an der Anlage entfernt, kann die Sicherheit weiter erhöht werden.

4 Verbesserungspotentiale hinsichtlich Sicherheit urbaner KWKAs

Es zeigt sich, dass gerade in Bezug auf die Schäden *Eiswurf* und *fallende Anlageteile* die Sicherheitsansprüche an KWKAs in besiedelten Gebieten von vielen Herstellern nicht erfüllt werden. Der gängigere Standort für KWKAs ist nach wie vor ländliches Gebiet. An diesen Standorten ist es möglich größere Sicherheitsabstände einzuhalten, sodass *Eisfall* sowie *Eiswurf* keine unmittelbare Gefahr darstellen. Für diese Anwendung sind die meisten KWKAs ausgelegt. Bei Installationen von KWKAs in urbanen Gebieten muss der Sicherheitsstandard der Anlagen jedoch angepasst werden. Die Art der Anwendung ist also gerade im Hinblick auf *Eiswurf* entscheidend. Ein Vibrationssensor bietet die Möglichkeit Eis in relevanter Größe zu detektieren und daraufhin die Anlage abzuschalten. Synoptische Sensoren reduzieren ebenfalls drastisch das Risiko von *Eiswurf*, wenn sie mit dem automatischen Abschalten der Anlage verbunden sind. Sie neigen jedoch dazu die KWKAs regelmäßig auch ohne Eisansatz abzuschalten. Dies könnte sich negativ auf die Wirtschaftlichkeit der Anlage auswirken. Das Integrieren von menschlicher Aktivität macht einen Sicherheitsmechanismus zur Vermeidung von *Eiswurf* deutlich unsicherer. Ist der Sensor mit einem Alarm verbunden, muss dieser erst von einer Person wahrgenommen werden und weiter darauf reagiert werden. Da KWKAs im Normalfall nicht dauerhaft überwacht werden, kann sich dadurch das Abschalten deutlich verzögern. Eiswurf ist stark standortabhängig und sollte daher bei jeder Installation standortsbezogen evaluiert werden.

Fallende Anlageteile hingegen sind stark anlagen- und installationsabhängig. Hauptauslöser sind vor allem falsche Auslegung des Materials auf Grund von Unterschätzung der dynamischen Lasten, menschliches Versagen bei der Installation der Anlage, Installation von ungeschultem Personal sowie das Fehlen der notwendigen Sicherheitssysteme und der regelmäßigen Wartung (Arbeitsgruppe Kleinwindkraft Wien, 2016). Bei einer qualitativ hochwertigen Anlage mit Schwingungsüberwachung, die von geschultem Personal installiert wurde, ist das Auftreten von fallenden Teilen deutlich geringer. Hier besteht dringendes Verbesserungspotential vieler Anlagen. Der Signifikanztest ergab, dass das Kriterium Zertifizierung keinen signifikanten Einfluss auf das Materialversagen hat. Dies zeigt, dass auch bei hochwertigen Anlagen, durch fehlende Sensorik oder falsche Installation, Materialversagen auftreten kann. *Brand* stellt hauptsächlich bei Anlagen ohne redundantes Bremssystem eine potentielle Gefahrenquelle dar. Diese sind jedoch nicht für den urbanen Bereich zugelassen.

Der Signifikanztest ergab, dass sowohl vertikale KWKAs, als auch Anlagen mit einer Leistung unter 5 kW häufiger zu Materialversagen neigen. Beide Kriterien treffen auf die meisten für die urbane Anwendung bestimmten KWKAs zu. Bei vertikalen Anlagen scheinen die dynamischen Lasten, vor allem hervorgerufen durch Resonanzen, ein noch zu bewältigendes Problem darzustellen. Das vertikale Design ist allgemein deutlich weniger getestet und angewendet als das horizontale Design. Das häufigere Versagen von KWKA im unteren Leistungsbereich könnte auf das Verzichten auf Sicherheitsmechanismen zurückzuführen sein. Darüber hinaus sind KWKAs im Bereich 1 kW oft Prototypen der Hersteller und somit technisch noch nicht voll ausgereift.

5 Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit

Die Stromgestehungskosten variieren bei KWKA zwischen ca. 12 und 32 ct/kWh, abhängig von Windgeschwindigkeiten und der Leistung der Anlage (Liersch, 2010). Auf Grund des niedrigen Strompreises in Österreich sind hier KWKA noch nicht rentabel. In Deutschland hingegen entspricht dies in etwa dem Strompreis des Netzes, somit können Reparatur- und Wartungskosten über die Wirtschaftlichkeit der Anlage entscheiden. KWKA können dort wirtschaftlich sein, wo der Strom direkt vom Produzenten verbraucht wird.

Die Investitionskosten für eine KWKA betragen zwischen 2 000 und 10 000 Euro pro kW, prinzipiell steigend umso kleiner die Anlage. Zur Installation in urbanen Gebieten bieten sich häufig KWKA mit niedriger Leistung an. Diese benötigen weniger Platz, das Genehmigungsverfahren ist günstiger sowie schneller und die Installation erfordert weniger Aufwand. Im Vergleich zur Gesamtinvestition ist, gerade bei Anlagen im Leistungsbereich von etwa 1 kW, das Einbauen von Sicherheitssystemen oft zu teuer. Somit können sich Sicherheitssysteme durch Reduzierung von Wartungs- und Reparaturkosten einerseits positiv auf die Wirtschaftlichkeit auswirken, andererseits sind die zusätzlichen Kosten, gerade bei KWKA mit niedriger Leistung, oft ein zu hoher Mehraufwand.

6 Schlussfolgerungen

Aus der Arbeit lassen sich folgende vier grundsätzliche Schlussfolgerungen ableiten:

1. Die Auftrittshäufigkeiten für die Schäden *Eiswurf* (bis zu 1.5 jährlich) sowie *fallende Anlageteile* (bis zu 0.7 jährlich) sind sehr hoch. Möglichkeiten zur drastischen Reduzierung der Auftrittshäufigkeiten sind vorhanden. Der Einsatz sollte anlagen- sowie standortsspezifisch angepasst werden.
2. *Materialversagen* tritt sehr häufig auf. Das Ereignis ist stark anlagenabhängig und kommt vor allem bei vertikalen KWKA und jenen mit einer Nennleistung unter 5 kW vor.
3. Bei den momentanen Investitionskosten für KWKA und dem aktuellen österreichischen Strompreis ist die Wirtschaftlichkeit meist nicht gegeben. Eine Reduzierung der Kosten ist somit nötig. Reparatur- und Wartungskosten können durch Sicherheitsmechanismen reduziert werden und haben starken Einfluss auf die Gesamtkosten. Ineffiziente Sicherheitssysteme können jedoch auch zu einer zusätzlichen Kostenbelastung führen.
4. Die PSA ist ein hilfreiches Tool zur Erhebung des Schadensrisikos spezifischer KWKA, sofern alle Daten über die Funktionsweise der KWKA vorliegen. Sie eignet sich zum Vergleichen verschiedener Sicherheitssysteme sowie zur Detektion von Verbesserungspotentialen. Mit Hilfe der adaptierten ETs und der Einflussfaktoren (Fx) können KWKA mit unterschiedlichen Sicherheitssystemen und verschiedenen Standorten verglichen werden.

Literatur

- Arbeitsgruppe Kleinwindkraft Wien. (2016). *Persönliche Mitteilung* 8.6.2016. FH Technikum Wien.
- Cooray, V. (2015). *An Introduction to Lightning*. Dordrecht: Springer Verlag.
- Deutscher Wetterdienst. (17. 09 2016). *Wetterlexikon: Eisregen*. Von <http://www.dwd.de/DE/service/lexikon/> abgerufen
- International Energy Agency. (2014). *World Energy Outlook 2014*. OECD Paris.
- Jüttemann, P. (2016). *Kleinwind-Marktreport: Die Besten Kleinwindkraftanlagen in Deutschland*. Bad Honnef: Kleinwindkraft-Portal.
- Kühn, P. (2007). *Big experience with small wind turbines - 235 small wind turbines and 15 years of operational results*. Mailand: European Wind Energy Conference and Exhibition.
- Liersch, J. (2010). *Wirtschaftlichkeit und Vergütung von Kleinwindenergieanlagen*. Berlin: Bundesverband WindEnergie e.V.
- Mathew, S. (2006). *Wind Energy: Fundamental, Resource Analysis and Economics*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Nusbaumer, O. (2009). *Einführung in die Probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA)*. Leibstadt.
- Pospichal, B., & Formayer, H. (2011). *Bedingungen für Eisansatz an Windkraftanlagen in Nordostösterreich: Meteorologische Bedingungen und klimatologische Betrachtungen*. Wien: Universität für Bodenkultur.
- Richtlinie des europäischen Parlamentes und des Rates über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden - 2010/31/EU. Amtsblatt der europäischen Union L 153/13. (idF v. 19.5.2010).
- Sumanik-Leary, J. (2013). *Small wind turbines for decentralised rural electrification: case studies in Peru, Nicaragua and Scotland*. Diss., University of Sheffield.