

IEC 62793: Thunderstorm Warning Systems – Theorie, Anwendung und Performance von Gewitterwarnsystemen auf Basis von Blitzortungsdaten

Hannes Kohlmann¹, Wolfgang Schulz¹

¹ OVE Service GmbH (ALDIS/BLIDS)

Kurzfassung

Gewitterwarnsysteme, deren technische Auslegung und deren Performance, sind in IEC 62793: Thunderstorm warning systems (kurz TWS) beschrieben. Neben der Umsetzung mittels E-Feld-Messvorrichtungen ist ein wesentlicher Bestandteil dieser Norm die technische Umsetzung unter der Verwendung von Blitzortungsdaten. Die letztere Art wird in der gegenständlichen Arbeit im Detail erläutert und die zu erwartende Performance eines Gewitterwarnsystems auf Basis von archivierten Blitzortungsdaten über einen Zeitraum von 10 Jahren ermittelt. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf den Performance-Parametern Probability of Detection (POD), Failure to Warn Ratio (FTWR) und Effective Alarm Ratio (EAR), sowie den erzielbaren Vorlaufzeiten (engl. Lead Times, LT) und insbesondere deren Abhängigkeit von der durch die AnwenderInnen festzulegenden Konfiguration des Gewitterwarnsystems. Zusätzlich dazu werden praxisrelevante Beispiele und Fallstudien, konkret eines TWS für einen Outdoor-Veranstaltungsort und eine Windkraftanlage auf einem Bergkamm präsentiert.

Abstract

Thunderstorm warning systems (TWS), their technical design, and their performance are described in the IEC 62793 standard. In addition to implementation using electric field measurement devices, a key component of this standard is the technical realization based on lightning location data. The latter approach is examined in detail in this work, and the expected performance of a thunderstorm warning system based on archived lightning detection data over a 10-year period is evaluated. The main focus lies on the performance parameters "Probability of Detection (POD)", "Failure to Warn Ratio (FTWR)", and "Effective Alarm Ratio (EAR)", as well as the achievable lead times (LT) and the dependence of all these parameters on the configuration of a TWS. In addition, relevant examples and case studies are presented, specifically addressing a TWS for an outdoor event location and a wind turbine that is located at the summit of a mountain ridge.

1 Einleitung

Bei Outdoor-Events befinden sich auf dem Veranstaltungsort viele Personen, die bei nahenden Gewittern der Gefahr eines Blitzschlages ausgesetzt sind und entsprechend Schutz aufsuchen müssen, bzw. das Gelände von VeranstalterInnen gegebenenfalls evakuiert werden muss. Weiters erfordern Anlagen und Betriebsmittel der elektrischen Energieversorgung, etwa Freileitungen und Windkraftanlagen, im Rahmen von Wartungs- oder Instandhaltungsarbeiten regelmäßig eine Begehung oder Besteigung. In allen erwähnten Situationen kann ein Gewitter-Warnsystem (eng. „Thunderstorm Warning System“, kurz TWS) für die VeranstalterInnen bzw. das Wartungspersonal von großem Vorteil sein, da die Personensicherheit im Falle von heranziehenden Gewittern gefährdet wird. Die Vorwarnzeiten eines TWS können den nötigen zeitlichen Puffer bieten, um Maßnahmen zur Evakuierung des Personals rechtzeitig durchführen zu können. Ein Gewitterwarnsystem kann, über die erwähnten Beispiele hinaus, allerdings auch für Betriebe, welche kritische Produktionszyklen fahren, von wesentlichem Nutzen sein, wenn die Schadenshöhe bei Blitzschlag während des vollen Betriebes hoch ist, und durch eine Betriebsunterbrechung vermieden werden kann. Präventivmaßnahmen, die auf Basis der gebotenen Vorwarnzeiten umgesetzt werden können, sind somit auch von

der wirtschaftlichen Perspektive aus gesehen von Bedeutung.

Diese Arbeit untersucht die Leistungsfähigkeit von Gewitterwarnsystemen, die auf Basis von Daten eines Blitzortungssystems (LLS) implementiert werden. Die Norm IEC 62793 für Gewitterwarnsysteme umfasst derzeit die Implementierung und Anwendung von Warnsystemen, die sowohl LLS-Daten als auch elektrische Feldmühlen verwenden. Darüber hinaus definiert die Norm verschiedene Leistungskennwerte, die in der gegenständlichen Arbeit statistisch für mehrere Anwendungsszenarien ausgewertet werden. Die untersuchten Szenarien beziehen sich insbesondere auf den Einsatz eines TWS zum Schutz von Personen und Infrastruktur in verschiedenen Bereichen – darunter Energieanlagen, sowie öffentliche Veranstaltungen im Freien.

2 Methode

2.1 Definition der TWS-Parameter

Bei Gewitterwarnsystemen (TWS), die auf Daten von Blitzortungssystemen (LLS) basieren, definiert die Norm IEC 62793 eine Reihe von Parametern, die im Folgenden beschrieben werden. Eine Warnung (Alarm) wird ausgelöst, wenn eine definierte Schwelle bezüglich der Anzahl von Blitzereignissen innerhalb eines Überwachungsgebiets

(MA) überschritten wird. Diese Blitzereignisse umfassen sowohl

- WW-Blitze (*Wolke-Wolke-Blitze*, oder auch *Wolkeblitze*, engl. *IC* = *intra-cloud* oder *inter-cloud*), also Entladungen innerhalb oder zwischen Wolken, die keinen Bodenkontakt haben, sowie
- WE-Blitze (*Wolke-Erde-Blitze*, oder auch *Erdblitz*, engl. *CG* = *cloud-to-ground*), also Entladungen, die mindestens einmal den Boden treffen.

(Hinweis: In den Grafiken und Abbildungen dieser Arbeit werden teilweise die englischen Abkürzungen *IC* und *CG* verwendet, da sie in internationalen Normen und Datenformaten (z. B. IEC 62793) üblich sind.)

Die Begriffe „Alarm“ und „Warnung“ werden im Folgenden synonym verwendet, sofern nicht ausdrücklich anders angegeben.

Die verwendeten Abkürzungen sind wie folgt definiert:

- MA (Monitoring Area / Überwachungsgebiet): Das Gebiet, in dem Blitzereignisse (WW oder WE) erkannt und lokalisiert werden. Bei Auftreten entsprechender Ereignisse wird ein Alarm getriggert.
- SA (Surrounding Area / Umgebungsgebiet): Das Gebiet, in dem ein WE-Blitz (CG) entweder eine zuvor ausgegebene Warnung effektiv werden lässt (→ *Effective Alarm*, EA) oder – im Falle einer ausbleibenden Warnung – als Alarmausfall (*Failure-to-Warn*, FTW) klassifiziert wird. Die Größe des SA kann anwendungsspezifisch festgelegt werden und sollte so gewählt sein, dass sie eine aussagekräftige Bewertung der TWS-Performance ermöglicht.
- TA (Target / Zielobjekt / Zielgebiet): Das zu schützende Objekt bzw. der Bereich, insbesondere Orte mit Aufenthalt von Personen.
- FTW (Failure-to-Warn / Alarmausfall): Ein WE-Blitz (CG) tritt in der SA auf, ohne dass zuvor ein Blitz im MA detektiert wurde – es wurde somit kein Alarm ausgelöst. Das Alarmausfallrate (*Failure-to-Warn Ratio*, FTWR) beschreibt die statistische Häufigkeit solcher Ereignisse. $FTWR = FTW / (EA + FTW)$.
- POD (Probability of Detection / Wahrscheinlichkeit der Erkennung): Die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Gewitter mit einer WE-Entladung (CG) in der SA durch eine vorausgehende Warnung erfasst wurde. Mit der FTWR ergänzt sich diese Wahrscheinlichkeit zu 100%, d. h. $POD = 1 - FTWR$ („entweder, es wurde detektiert, oder nicht“). POD_x bezeichnet die Erkennungswahrscheinlichkeit unter der Bedingung, dass eine minimale Vorwarnzeit von mindestens x Minuten zur Verfügung stand. Daraus folgt stets: $POD_x \leq POD$.
- EA (Effective Alarm / effektiver Alarm): Ein zuvor ausgegebener Alarm wird durch ein nachfolgendes WE-Ereignis (CG) in der SA bestätigt. Das Verhältnis effektiver Alarme (*Effective Alarm Ratio*, EAR) beschreibt den prozentuellen Anteil an EAs an der Gesamtanzahl der Warnungen (= effektive + nicht effektive Alarme). $EAR = EA / (EA + NEA)$

- NEA (Non-Effective Alarm / nicht effektiver Alarm): Ein Alarm, bei dem innerhalb des SA kein WE-Blitz (CG) auftritt. Auch wenn ausschließlich WW-Blitze (IC) in der SA registriert werden, bleibt der Alarm als nicht effektiv klassifiziert. Das Verhältnis nicht effektiver Alarme (*Non-Effective Alarm Ratio*, NEAR) beschreibt den prozentuellen Anteil der NEAs an der Gesamtanzahl der Warnungen. $NEAR = NEA / (EA + NEA)$
- LT (Lead Time / Vorwarnzeit): Die Zeitspanne zwischen dem Empfang einer Warnung und dem Auftreten des ersten WE-Blitzes (CG) in der SA – also die effektive Vorwarnzeit zur Einleitung präventiver Maßnahmen.
- TTC (Time to Clear / Zeit zum Zurücksetzen des Alarms): Sobald nach dem letzten Blitzereignis in der MA die TTC verstrichen ist, wird der Alarm aufgehoben. Erst danach kann ein neuer Alarm für dieses Gebiet ausgelöst werden.

Ein über die IEC 62793 hinausgehender Begriff, der in dieser Arbeit eingeführt wird, ist der Alarmausfall mit Direkttreffer (engl. *Target-Hit Failure-to-Warn*, THFTW). Ein solcher liegt vor, wenn ein WE-Blitz (CG) in die unmittelbare Umgebung des Zielobjekts (TA) einschlägt und davor kein Alarm ausgelöst wurde – im Folgenden wird die unmittelbare Umgebung um das TA als *kritischer Bereich* bezeichnet. Dieses wird als ein Umkreis von ± 500 m um das Ziel definiert. Bei einer mittleren Ortungsgenauigkeit des LLS im Bereich von 100–150 m (siehe Abschnitt 2.2) kann ein Blitzereignis innerhalb dieses Bereichs mit hoher Wahrscheinlichkeit als direkter Treffer auf das TA gewertet werden.

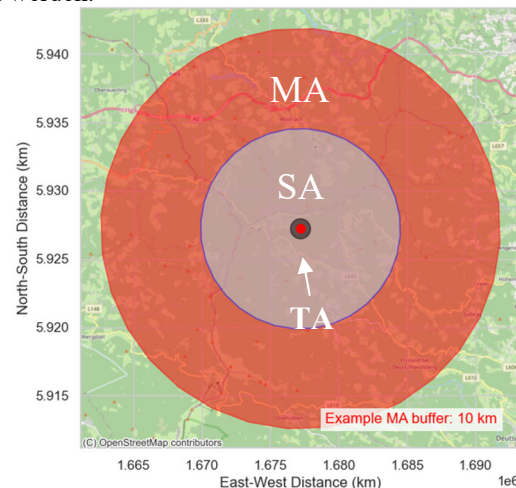


Abb. 1: Definition der Gebiete eines Gewitter-Warnsystems (TWS). MA: Überwachungsgebiet (rot), SA: Umgebungsgebiet (blau), TA: Zielobjekt (roter Punkt); der kritische Bereich – dargestellt in dunkelgrau – wird mit ± 500 m um das TA angenommen.

Abb. 1 zeigt ein Beispiel für ein Überwachungsgebiet (MA), das Umgebungsgebiet (SA), das Zielobjekt (TA, roter Punkt) und der kritische Bereich (kleiner dunkelgrauer Kreis um das TA) für das Szenario eines TWS das z.B. im Fall eines Outdoor-Veranstaltungsortes oder einer Windkraftanlage angewendet wird. Abb. 2 zeigt ein Beispiel für einen effektiven Alarm (inkl. direktem Blitzschlag am TA)

mit einer Vorwarnzeit von etwa 16 Minuten für eine gegebene MA (15 km Radius) und SA (3 km Radius). Ein nicht effektiver Alarm hingegen würde keine WE-Blitze in der SA beinhalten.

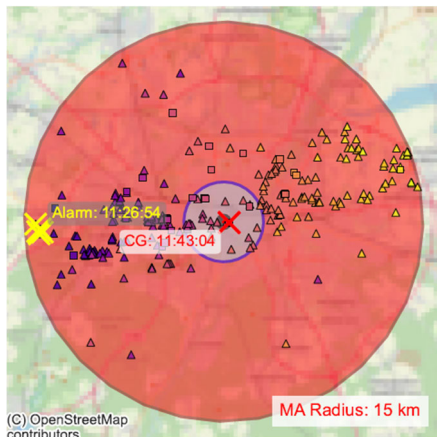


Abb. 2: Beispielhaftes Alarmszenario mit einem Überwachungsgebiet (MA) von 15 km und einem Umgebungsgebiet (SA) von 3 km. Es handelt sich um einen effektiven Alarm, gefolgt von einem Direkteinschlag am TA, und einer Vorwarnzeit (LT) von etwa 16 Minuten (Geschwindigkeit der Gewitterzelle: ca. 50 km/h). Dreiecke stellen WW-Impulse (IC) dar, Quadrate und Kreise sind WE-Entladungen (CG), die vom Blitzortungssystem ALDIS/BLIDS lokalisiert wurden. Die Symbolfarbe gibt die zeitliche Entwicklung wieder (früheste Entladungen in Dunkelblau, späteste in Gelb). Gelbe Kreuze markieren die Entladungen des alarmauslösenden Blitzes, das rote Kreuz kennzeichnet die WE-Entladung in der SA, die den Alarm effektiv macht. Gesamtalarmdauer: 100 min.

2.2 LLS-Datensatz

Der für diese Studie verwendete Datensatz von Blitzereignissen stammt vom österreichischen Blitzortungssystem ALDIS/BLIDS (Austrian Lightning Detection & Information System), das über Deutschland und Österreich eine Blitzdetektionseffizienz (engl. Detection Efficiency, DE) von 96-99 % und eine mediane Ortungsgenauigkeit (engl. Location Accuracy, LA) für WE-Blitze von ca. 100-150 m aufweist, siehe [1]. Diese Genauigkeit ermöglicht eine Beurteilung, ob ein Objekt mit hoher Wahrscheinlichkeit direkt getroffen wurde oder nicht. Bodengestützte Blitzortungssysteme erfassen, aufgrund der physikalischen Natur von Aufwärtsblitzen, im Durchschnitt etwa nur die Hälfte der Blitze, die von hohen Türmen ausgehen ([2]), und zwar nur dann, wenn die Entladung zum Turm zusätzlich impulshafte Teilblitze enthält. Blitzentladungen bei Windkraftanlagen, die rein vom Initial-Continuing-Current-Typ (aufwärtsgerichtete initiale Langzeitströme) sind, können von bodengestützten Niederfrequenz LLS nicht detektiert werden.

2.3 Auswahl der Targets

Zwei unterschiedliche Arten von Targets (TA), also zu schützende Objekte oder zu evakuierende Zielgebiete, wurden ausgewählt: 1) Ein typischer Outdoor-Veranstaltungsort in der bayrischen Landeshauptstadt München (Theresienwiese), mit einer lokalen Blitzdichte von 1.4

Blitzeinschlägen pro km² und pro Jahr, und eine Windkraftanlage auf einem österreichischen Gebirgskamm, in einer Region mit vergleichsweise hoher Blitzdichte (≥ 3 WE-Blitze pro km² pro Jahr). Diese TAs sind interessante Fallstudien, da 1) gegebenenfalls eine große Menschenmenge evakuiert werden muss, und 2) exponierte Windkraftanlagen regelmäßig von Blitzen getroffen werden. Oft lösen Windkraftanlagen selbst Blitzentladungen (sog. Aufwärtsblitze) aus. Daher ist die Nutzung eines TWS während Veranstaltungen, bzw. Wartungsarbeiten an den gegebenen Standorten von größter Bedeutung. Unter anderem zielt die vorliegende Studie darauf ab, zu untersuchen, wie häufig direkte Treffer an den TAs (THFTWs) ohne vorherigen Alarm auftreten.

2.4 Spezifikation der TWS-Parameter

Die in dieser Studie betrachteten Zielgebiete (TAs) sind Punkte, die das Zentrum eines Veranstaltungsortes, bzw. eine Windkraftanlage repräsentieren. Für die statistische Analyse wird das Überwachungsgebiet (MA) variiert, während das Umgebungsgebiet (SA) und der kritische Bereich um das TA jeweils festgelegt sind. Im Fall eines Outdoor-Veranstaltungsortes wird das Umgebungsgebiet mit einem Pufferbereich von 3 km Radius um das Zielobjekt definiert. Diese Wahl ist durch folgende Hintergrundinformation motiviert: Es wurde festgestellt, dass Blitze mit mehreren Bodenkontaktpunkten einen medianen Abstand von etwa 1,4 km zueinander aufweisen, mit einem Maximum von 6,9 km (siehe dazu [3], eine Studie, die in Österreich durchgeführt wurde). Mit der Wahl eines 3 km Radius für die SA wird eine hohe Wahrscheinlichkeit von Direkteinschlägen am Veranstaltungsort (TA) ab dem Moment der ersten WE-Blitze in der SA berücksichtigt. Der kritische Bereich wurde mit einem 500 m Radius rund um das Zentrum des Veranstaltungsortes festgelegt, wobei ein Treffer innerhalb dieses Gebiets als „direkter Treffer“ in den Auswertungen zählt. Der 500 m Radius für den kritischen Bereich wurde sowohl für den Outdoor-Veranstaltungsort, als auch für Windkraftanlagen gleich gewählt.

Im Fall von Windkraftanlagen wurde der Radius des Umgebungsgebiets (SA) jedoch auf 5 km festgelegt (im Vergleich zu 3 km für den Veranstaltungsort). Diese Wahl berücksichtigt die Tatsache, dass auch weiter entfernte Blitzschläge nachgewiesenermaßen häufig als Auslöser für Blitzentladungen an Türmen wirken, siehe z. B. [4].

Die Anzahl der Blitzereignisse als Auslöseschwelle für einen Alarm wurde auf zwei festgelegt. Dadurch werden Fehlalarme vermieden, die durch sog. „Outlier-Detektionen“ (Detektionen mit einer weit entfernten Lokalisierung relativ zum tatsächlichen Ort der Entladung) ausgelöst werden. Eine TTC von 60 Minuten wurde für den Outdoor-Veranstaltungsort gewählt, und 30 Minuten für die Auswertung im Fall der Windkraftanlage.

2.5 Auswertung der TWS-Performance

Basierend auf einem Auswertungszeitraum von zehn Jahren (2015–2024) wurden die Parameter POD (und POD_x), FTWR, EAR und LT für unterschiedliche Radien des Überwachungsbereichs (MA) berechnet (auch als „MA-

Buffer“ bezeichnet), siehe schematische Darstellung in Abb. 3. Die Ergebnisse werden anschließend in Diagrammen über abnehmenden MA-Radien (x-Achse) dargestellt.

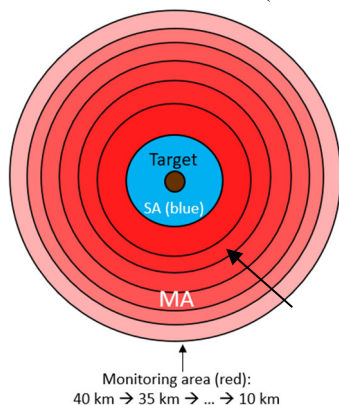


Abb. 3: Schematische Darstellung zur Evaluierung der TWS-Performance für variierende Radien der MA.

3 Resultate

Die Diagramme in Abb. 4 und Abb. 5 zeigen die statistischen Ergebnisse der TWS-Performance für den Outdoor-Veranstaltungsort, bzw. des Windkraftwerkes. Das obere Diagramm jeder Abbildung zeigt die Parameter POD, POD_x , FTWR und EAR, das untere Diagramm stellt die Vorwarnzeiten (LT) in Minuten dar. Die LT-Werte sind als Streudiagramm dargestellt, wobei jedes graue Punkt-Symbol eine individuelle Alarm-Vorwarnzeit repräsentiert. Die Punkte sind zur besseren Sichtbarkeit seitlich leicht versetzt zum jeweiligen MA-Radius dargestellt, gehören jedoch zum selben Radius. In Kombination mit der vertikal dargestellten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (grau schattierte Flächen) der LT-Werte, sowie einer Medianlinie, ergibt sich eine umfassende Visualisierung der LT-Verteilung in Abhängigkeit vom MA-Radius, die eine korrekte Interpretation der Ergebnisse erlaubt.

Die eingefügten Kästchen zwischen oberem und unterem Diagramm enthalten absolute Zahlen über den gesamten Auswertungszeitraum von zehn Jahren, und zwar von oben nach unten: Gesamtanzahl aller Alarme („Total“), durchschnittliche Alarmanzahl pro Jahr („Al/y“), Gesamtzahl effektiver Alarme („EA“), nicht effektiver Alarme („NEA“), Alarmausfälle („FTW“) und Alarmausfälle bei Direkttreffern („THFTW“ in Rot). Zusätzlich ist in der oberen Diagrammmitte mit „Direct hits“ die Anzahl jener Alarmszenarien angegeben, bei denen es während einer aktiven Warnung, oder auch bei Alarmausfall, zu einem direkten Einschlag in das Objekt kam (WE-Blitze innerhalb des 500 m kritischen Bereichs). Für diese kritischen Fälle stellen Gewitterwarnsysteme, sofern sie erfolgreich warnen, den idealen Nutzen dar.

Abb. 4 zeigt, dass am analysierten Ort VeranstalterInnen von Outdoor-Events unter Anwendung eines auf Blitzortungsdaten beruhenden Gewitterwarnsystems am gegebenen Ort in den vergangenen 10 Jahren von besonders hohen POD-Werten nahezu 100% (entsprechend wenigen

FTWs) profitiert hätten, und keinen Alarmausfall mit Direkttreffern verzeichnet hätten, also THFTW = 0 (unter der Annahme, dass die Leistungsanforderungen des LLS gemäß Abschnitt 2.2 stets erfüllt waren). Bei genügend groß gewähltem Radius (≥ 30 km) ist die bedingte Detektionsrate mit mindestens 30 Minuten Vorwarnzeit (POD_{30}) $\geq 80\%$ (rote strichlierte Linie). In mehr als 90% der Fälle wären jedoch zumindest mehr als 20 Minuten Zeit gewesen (POD_{20} , grüne gestrichelte Linie), um Präventivmaßnahmen umzusetzen. Die Alarmeffektivität steigt mit abnehmendem Radius von etwa 10% bei 40 km bis etwa 35% bei 10 km an. Jedoch steigt im Gegenzug bei kleiner werden den Radien die FTWR leicht an und die LT sinkt von 80 Minuten auf 20 Minuten (Medianwerte), mit individuellen Szenarien, die sogar deutlich unter 20 Minuten Reaktionszeit geboten hätten. Im 10-jährigen Analysezeitraum folgten in 11 Alarmszenarien nach erfolgter Vorwarnung auch direkte Treffer im kritischen Bereich.

Die LTs verteilen sich für große MA-Radien über einen großen zeitlichen Bereich. Als Medianwert blieben den VeranstalterInnen bei 40 km MA-Radius 80 Minuten Zeit, um Präventivmaßnahmen umzusetzen. Bei 10 km MA-Radius waren es median nur 20 Minuten, wobei hier eine Vielzahl an Alarmszenarien sogar nur 10-20 Minuten Reaktionszeit geblieben wäre. An dieser Stelle sei erwähnt, dass bei einer Zeit zum Zurücksetzen des Alarms (TTC) von 30 Minuten die Alarme am ausgewerteten Standort im Schnitt etwas zu früh wieder aufgelöst hätte, und dadurch

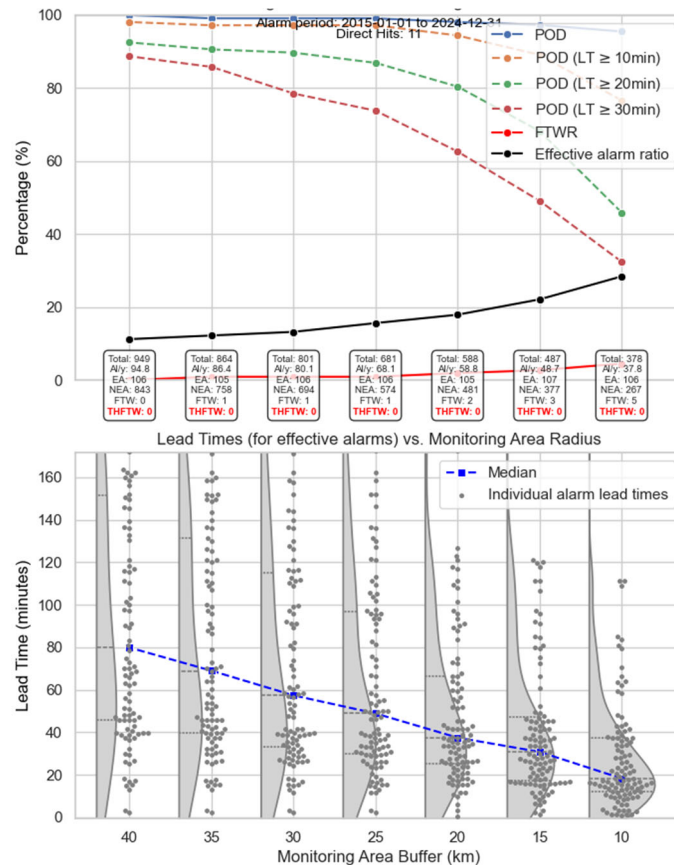


Abb. 4: Gewitterwarnung für das Beispiel eines Outdoor-Veranstaltungsortes (Theresienwiese/München, Blitzdichte 1.4 Blitze/km²/Jahr), 3 km SA-Radius.

Gewitterperioden ungünstig gestückelt worden wären. Generell wird die Performance eines TWS mit kürzeren TTC-Werten schlechter: Mehr nicht effektive Alarmer, sowie mehr FTWs unmittelbar nach Alarmauflösung. Eine zu frühe Entwarnung kann demnach eine falsche Sicherheit suggerieren.

Die Ergebnisse für die Windkraftanlage sind in Abb. 5 dargestellt. Die Windkraftanlage liegt in einem Blitz-Hotspot in Österreich, und weist trotz kleinerer MA-Radien eine hohe Anzahl an Alarmszenarien pro Jahr auf. Im Schnitt wird das Windrad jährlich in 5,8 Alarmszenarien (EAR bzw. FTW) direkt getroffen (andere Anlagen in ähnlicher geographischer Lage wiesen in Analysen deutlich weniger Alarmszenarien mit Direkteinschlag auf). Zwischen den MA-Radien von 40-25 km liegt die POD etwa bei 92-93% bei einer Effektivität EAR von 18-22% (ca. jeder fünfte Alarm ist effektiv). Für kleine MA-Radien zwischen 10-15 km liegt die Effektivität EAR bei hohen 30-40%. Während die Anzahl der effektiven Alarmer (in absoluten Zahlen) über die unterschiedlichen MA-Radien annähernd konstant bleibt, sinkt die Gesamtzahl der getriggerten Alarmer deutlich, was zu dieser hohen Effektivität führt. Anschaulich betrachtet: Ein Gewitter, das sehr nahe bei der SA detektiert wird (kleiner MA-Radius), wird mit höherer Wahrscheinlichkeit auch in die SA eintreten. Dieser hohe EAR-Wert wird allerdings von einer gleichzeitig hohen Alarmausfallsrate FTWR von 15-25% (MA-Radien zwischen 10-15 km) begleitet. Außerdem wäre die Windkraftanlage während des Auswertungszeitraums bei einer kleinen MA von 10 km insgesamt 8-mal ohne Vorwarnung direkt getroffen worden (THFTW, in den Kästchen rot hervorgehoben), während es für einen MA-Radius von ≥ 25 km nur 3 THFTWs gewesen wären. Dies bedeutet, dass die Information über die Blitzaktivität aus einer größeren Umgebung für ein TWS für Windkraftanlagen im alpinen Raum mit hoher Blitzdichte bereits viel über die Wahrscheinlichkeit eines Blitzschlages am TA aussagt und nach einer Warnung durch das TWS sofort die Präventivmaßnahmen (z.B. Evakuierung) in Gang gesetzt werden sollten.

Die medianen Vorwarnzeiten betragen 20 bis 70 Minuten für MA-Radien zwischen 10–40 km mit annähernd linearer Abnahme bei kleiner werdendem MA-Radius. Der Median teilt die Daten in zwei Hälften, liegen 50 % der LT-Werte unterhalb, die anderen 50 % oberhalb des Medians. Einzelne Alarmereignisse mit sehr kurzen LTs weisen auf Gewitterzellen hin, die plötzlich lokal entstanden und nahezu einem FTW-Szenario entsprachen. Solche Fälle können selbst durch die Wahl größerer MA-Radien nicht vermieden werden. Für ziehende Zellen, die über einen längeren Zeitraum existieren, würden die individuellen LTs (graue Punkte), ähnlich wie in Abb. 4, bei kleinerem MA-Radius in den Bereich kleiner LTs gedrängt (siehe die Häufungen um die mediane LT bei 10 km MA-Radius), da die Blitze derselben Gewitterzelle dann erst wesentlich später Alarmer triggern, und außerhalb der MA liegenden Blitzentladungen der Zelle entsprechend keine Alarmer auslösen.

Letzterer Sachverhalt führt in der Regel auch zu häufigerem Alarmausfall, was gemäß Abb. 4 und Abb. 5 in Form eines Abfalls der POD-Kurve (blau) zu kleineren MA-Radien hin sichtbar ist.

Die allgemein hohe Anzahl an THFTWs für die Windkraftanlage lässt sich vermutlich auf die exponierte Lage auf dem höchsten Punkt eines Bergkammes, und damit die Auslösung von Blitzentladungen durch das Objekt selbst, zurückführen. Diese Anlage liegt höher als die benachbarten Anlagen und wird daher am häufigsten direkt getroffen. Dennoch zeigten weitere Analysen, dass ähnlich exponierte Anlagen in anderen Windparks, die sich ebenfalls auf Bergkämmen befinden, weniger hohe THFTW-Werte aufweisen. Daher ist die in dieser Arbeit behandelte Windkraftanlage ein Sonderfall hinsichtlich der Performance der Gewitterwarnung. Trotzdem bleiben THFTW-Ereignisse sehr selten im Vergleich zu normalen FTW-Szenarien. Außerdem könnten benachbarte Windkraftanlagen ebenfalls Blitze auslösen, was höhere FTW- bzw. THFTW-Werte zur Folge hat, etwa wenn eine nahegelegene Windkraftanlage außerhalb bzw. innerhalb von 500 m getroffen wird.

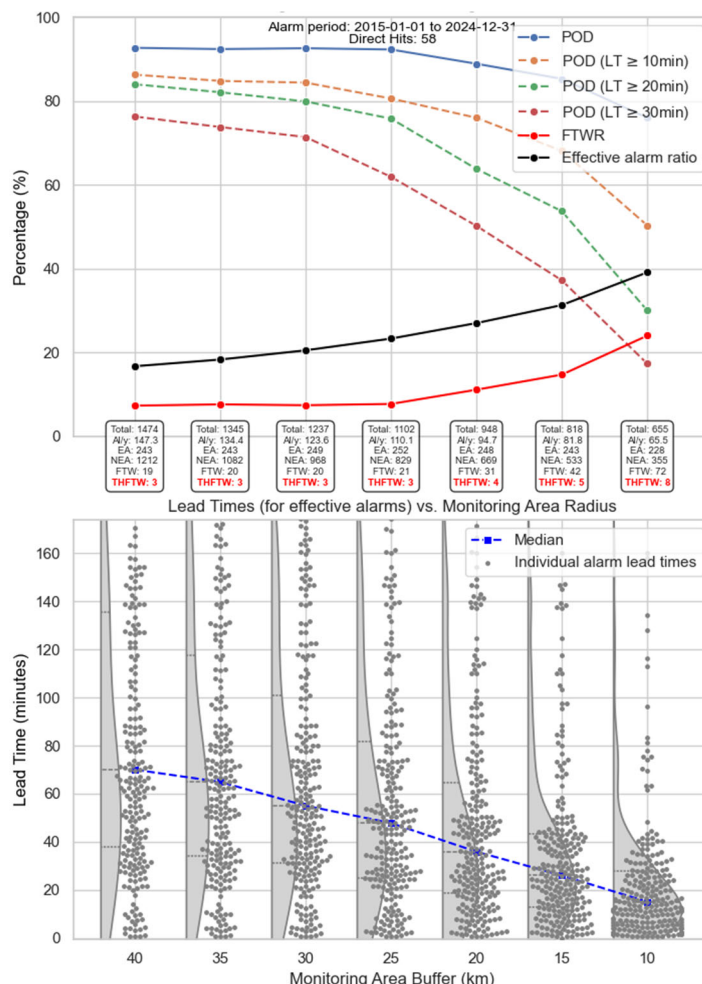


Abb. 5: Performance eines TWS für eine Windkraftanlage mit hoher Direkttreffer-Anzahl. Für den Radius der SA wurden 5 km gewählt.

4 Diskussion

Wie die Ergebnisse Abb. 4 am Beispiel eines TWS für einen Outdoor-Veranstaltungsort in München zeigt, kann mit einem gestaffelten Ansatz, durch eine Kombination aus zwei Alarmbereichen (Warnung mit großem Radius und Alarm mit kleinerem Radius), das Veranstaltungspersonal somit den größten Nutzen aus einem TWS ziehen. Die NutzerInnen profitieren in dieser Form der Gewitterwarnung von einer hohen Erkennungswahrscheinlichkeit (POD) im großen Bereich und einer hohen Effektivität (EAR) im kleineren Bereich. Außerdem lassen sich dadurch gestaffelte Maßnahmenpläne umsetzen, etwa mit einer Vorbereitung nach „Warnung“ und der Umsetzung nach „Alarm“. Hohe Objekte, wie Türme oder Windkraftanlagen, können Verzerrungen in den EAR- und FTWR-Kurven verursachen, wenn sie Einschläge in MA (negativer Einfluss auf EAR) bzw. in der SA (negativer Einfluss auf FTWR) begünstigen oder auslösen. Dies würde sich in einer starken Verschiebung des EAR in Richtung verdächtig niedriger Werte, mit nur geringer Verbesserung selbst bei kleinen MA-Radien erkennen lassen. Befindet sich das hohe Objekt in der SA, so verschlechtert sich stattdessen die FTWR bzw. POD, wobei sich die FTWR-Kurve um einen konstanten Betrag nach oben und die POD-Kurve im selben Maß nach unten verschiebt. Solche Effekte können durch das Ausschließen der betroffenen Bereiche im Warnsystem korrigiert werden, etwa indem Blitze innerhalb dieser Bereiche ignoriert werden. Da eine hohe Zahl an nicht-effektiven Alarmen für die Nutzer eher störend als hilfreich empfunden werden kann, würde diese Maßnahme die Gesamtleistung des Systems verbessern. Ob ein solcher Alarm, der von einem Blitzschlag auf einen Turm ausgelöst wird, praktisch relevant ist, liegt im Ermessen der TWS-NutzerInnen.

Obwohl bekannt ist, dass Windkraftanlagen die lokale Blitzhäufigkeit erhöhen, indem sie Aufwärtsblitze auslösen oder selbst durch nahegelegene Blitze getriggert werden (siehe z. B. [5] und [6]), bzw. bekannt ist, dass viele Blitzentladungen auf Türme von bodengestützten LLS nicht detektierbar sind (vgl. [7] und [8]), zeigte sich in dieser Studie, dass ein auf Blitzortungsdaten basierendes Gewitterwarnsystem auch bei Windkraftanlagen zufriedenstellende Ergebnisse in Bezug auf POD, EAR und mittlere Vorlaufzeiten (LT) liefert.

5 Zusammenfassung

Die vorliegende Studie untersuchte die Leistungsfähigkeit von auf Blitzortungsdaten (LLS) basierenden Gewitterwarnsystemen (TWS) für zwei Szenarien über einen Zeitraum von 10 Jahren in Österreich und Deutschland. Konkret wurden die TWS für einen begehrten Outdoor-Veranstaltungsort im Süden Deutschlands und eine Windkraftanlage an einem exponierten Ort (Bergkamm) in Österreich evaluiert und die Performance analysiert. In allen betrachteten Fällen zeigte ein solches Gewitterwarnsystem durchgängig gute Ergebnisse hinsichtlich der Erkennungswahrscheinlichkeit (POD) von Gewittern, der Effektivitätsraten

(EAR) der Alarme sowie nur weniger direkter Alarmausfälle (THFTW), also solcher Fälle, in denen das Ziel ohne jegliche vorhergehende Blitzaktivität direkt getroffen wurde.

Die gestaffelte Anwendung eines Gewitterwarnsystems, in Form einer Kombination zweier Überwachungsbereiche unterschiedlicher Größe, ermöglicht es den NutzerInnen des Warnsystems, sowohl von einer hohen Erkennungswahrscheinlichkeit (und damit einer niedrigen Alarmausfallsrate) im großen Überwachungsbereich als auch von hoher Alarmeffektivität für kleinere Überwachungsbereiche zu profitieren – dies bei angemessenen Vorlaufzeiten zur Vorbereitung und Umsetzung von Präventivmaßnahmen im Falle eines herannahenden Gewitters. Anhand einer Auswertung vieler Jahre, wie sie in dieser Arbeit vorgestellt wurde, können TWS-NutzerInnen über statistische Performance-Werte Strategien für Maßnahmen entwickeln oder optimieren. Zukünftige Arbeiten werden regionale Trends wie typische Zugrichtungen von Gewitterzellen berücksichtigen, mit dem Ziel, dass ein richtungsabhängiges Warnsystem gegebenenfalls eine noch bessere Leistung ermöglicht.

6 Literatur

- [1] W. Schulz, G. Diendorfer, S. Pedebay, and D. R. Poelman, “The European lightning location system EUCLID – Part 1: Performance analysis and validation,” *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 16, no. 2, pp. 595–605, 2016, doi: 10.5194/nhess-16-595-2016.
- [2] G. Diendorfer, H. Pichler, and M. Mair, “Some Parameters of Negative Upward-Initiated Lightning to the Gaisberg Tower (2000 - 2007),” *Electromagn. Compat. IEEE Trans.*, vol. 51, no. 3, pp. 443–452, 2009, doi: 10.1109/TEM.2009.2021616.
- [3] L. Schwalt and W. Schulz, “Analyses of Negative Cloud-to-Ground Flashes and Their Ground Strike Points in Austria,” *SSRN Electron. J.*, vol. 217, no. July 2022, p. 109140, 2022, doi: 10.2139/ssrn.4212097.
- [4] A. Sunjerga *et al.*, “LMA observations of upward lightning flashes at the Säntis Tower initiated by nearby lightning activity,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 181, no. July, p. 106067, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.epsr.2019.106067.
- [5] M. Long, M. Becerra, and R. Thottappillil, “On the lightning incidence to wind farms,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 157, pp. 211–226, 2018, doi: 10.1109/ICLP.2016.7791459.
- [6] M. Saito, M. Ishii, A. Ohnishi, F. Fujii, M. Matsui, and D. Natsuno, “Frequency of upward lightning hits to wind turbines in winter,” *IEEE Trans. Power Energy*, vol. 131, no. 12, pp. 979–985, 2011, [Online]. Available: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84855770041&partnerID=40&md5=515385f19018adc379da10ad26f6427d>
- [7] G. Diendorfer, H. Pichler, and W. Schulz, “LLS Detection of Upward Initiated Lightning Flashes,” in *9th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL)*, Nagoya, Japan, 2015, pp. 1–5.
- [8] A. Smorgonskiy, F. Rachidi, M. Rubinstein, and G. Diendorfer, “On the Estimation of the Number of Upward Flashes From Wind Turbines in Mountainous Areas,” in *24th International Lightning Detection Conference & 6th International Lightning Meteorology Conference (ILDC/ILMC)*, San Diego, California, USA, 2016.



Dipl.-Ing. Hannes Kohlmann

Hannes Kohlmann arbeitet seit 2014 bei der Abteilung ALDIS (Austrian Lightning Detection & Information System) beim Österreichischen Verband für Elektrotechnik (OVE). Seine Zuständigkeitsbereiche umfas-

sen Datenbankverwaltung und -infrastruktur und Softwareentwicklung. Darüber hinaus befasst er sich mit wissenschaftlichen Fragestellungen zur elektromagnetischen Feldausbreitung nach Blitzentladungen sowie mit der Entwicklung bzw. Leistungsbewertung von Gewitterwarnsystemen. Abschluss des Bachelor- und Masterstudiums in Elektrotechnik bzw. Telekommunikation an der TU Wien (2020). Derzeit Doktoratsstudium mit Schwerpunkt Blitzortung und -forschung an der École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Schweiz.



Dipl.-Ing. Dr. Wolfgang Schulz

Wolfgang Schulz ist Leiter der Abteilung ALDIS (Austrian Lightning Detection & Information System) beim Österreichischen Verband für Elektrotechnik (OVE). Seine Forschungsschwerpunkte umfassen Blitzor-

tung und Feldmessung von Blitzentladungen.

Der Matura am TGM in Wien (1985) folgte das Studium an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Elektrotechnik, Sponsion 1992 und Promotion 1997.

Wolfgang Schulz ist Autor bzw. Koautor von mehr als 150 wissenschaftlichen Beiträgen.