

Einflüsse der Luftrübung, der Sonnenausdehnung und der Flügel- form auf den Schattenwurf von Windenergieanlagen

Influences of the opaqueness of the atmosphere, the extension of the sun and the rotor blade profile on the shadow impact of wind turbines

Hans-Dieter Freund, FH Kiel / UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Zusammenfassung

Zur Zeit werden Schattenwurfzeiten mit rein geometrischen Rechenmodellen ermittelt. Dieser Ansatz wird im referierten Forschungsprojekt [1] in Frage gestellt. In dem Projekt werden die real vorliegenden Verhältnisse genauer untersucht. Dazu zählen:

1. die endliche Ausdehnung der Sonne
2. die trapezförmige Struktur der Rotorflügel
3. die getrübte Atmosphäre als Medium der Strahlungsausbreitung

Diese physikalischen Einflußparameter verändern den Schattenwurf wesentlich. Man erkennt, daß die geometrisch berechneten Schattenwurfzeiten prinzipiell nicht die *worst case*-Zeiten darstellen können. Bei den in Frage kommenden Entfernungen sind sie im allgemeinen zu groß. Bei ca. 76% der maximalen Reichweite beträgt der geometrische Systemfehler 100%, und er vergrößert sich weiter mit zunehmender Entfernung. Durch diese Systemfehler können den Windenergie-Betreibern Kosten durch unnötige Abschaltanlagen entstehen. Durch den Einsatz einer neuen Zusatzsoftware zu den herkömmlichen Computerprogrammen kann das in Zukunft vermieden werden.

Summary

At present, shadow flicker periods are determined by purely geometrical models. This approach is questioned in the research project referred to in this article [1]. The project investigates in detail the ambient conditions existing in reality. These are:

1. *the finite extension of the sun*
2. *the trapezoidal structure of the rotor blades*
3. *the opaque atmosphere as a medium of radiation*

These physical parameters have a significant influence on the shadow flicker. One can see that the shadow flicker periods calculated geometrically cannot represent the worst-case periods as a matter of principle. For the distances in question, they are generally too large. For approx. 76% of the maximum range the geometric system error is 100% and gets even larger with increasing distance. Because of this system error, wind turbine operators are sometimes faced with costs for shut-off systems that are not really necessary. By using a new supplementary software in addition to the conventional computer programmes, such extra costs could be avoided.

1. Einleitung und erste Ergebnisse

Die von WEAn ausgehenden Beschattungszeiten werden zur Zeit mit geometrischen Annahmen ermittelt. Die Sonne wird dabei punktförmig definiert und die von den Rotorflügeln überstrichene Fläche wird als schattenwerfende, strukturlose Kreisscheibe angenommen.

Der Einfluß der Atmosphäre wird vernachlässigt, d.h. man betrachtet die Strahlausbreitung des Lichtes unter Vakuumbedingungen. Unter diesen Annahmen reicht der Schatten unendlich weit. Durch zwei Zusatzannahmen, nämlich durch die Definition einer maximalen Reichweite und durch die Definition eines Kappwinkels versucht man die Rechenergebnisse realistischer zu gestalten. Im Forschungsprojekt wird die Schattenbildung unter den physikalisch realen Randbedingungen untersucht, nämlich einer endlichen Ausdehnung der Sonne, der trapezförmigen Flügelform und der Existenz der Atmosphäre.

Die Rechnungen zeigen, daß die mit dem Geo-

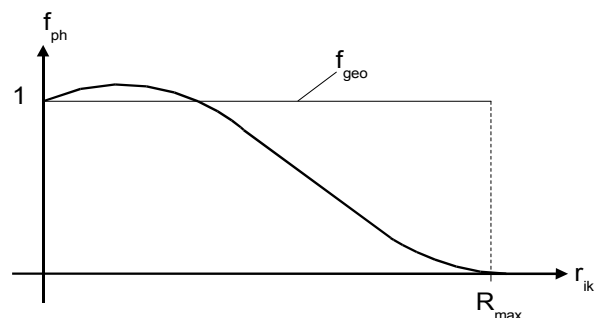


Abb.1: Physikalischer Korrekturfaktor f_{ph}
Fig. 1: Physical correction factor f_{ph}

metriemodell ermittelten Schattenwurfzeiten T_{geo} nicht als *worst case*-Zeiten bezeichnet werden dürfen. Bei geringen Entfernungen kann aufgrund der Sonnenausdehnung die Beschattungszeit größer sein als T_{geo} . Bei größeren Entfernungen ist T_{max} jedoch kleiner als die geometrisch ermittelte Beschattungszeit T_{geo} . Aufgrund der trapezförmigen Struktur der Rotorflügel wird der Schatten der Rotorspitzen früher unsichtbar als Bereiche mit größerer Flügelbreite. Da das Geometriemodell Beschattungszeiten liefert, die prinzipiell nicht eintreten können, ist die *worst case*-Zeit neu zu formulieren. Es gilt:

$$T_{\text{max}} = f_{\text{ph}} \times T_{\text{geo}}$$

f_{ph} ist dabei ein physikalisch bedingter Korrekturfaktor, mit dem die geometrisch ermittelte Beschattungszeit zu multiplizieren ist. Der prinzipielle Verlauf von f_{ph} sieht wie in Abbildung 1 aus.

2. Einfluß der Sonnenausdehnung

Für den Kern- und Halbschatten werden zunächst geometrische Beziehungen hergeleitet und in das Schwellenkontrast-Kriterium [2] involviert. Sodann wird dieses Kriterium auf den Schattenwurf einer ausgedehnten Sonne unter Vakuumbedingungen angewandt. Dadurch gewinnt man einen Einblick auf den prinzipiellen Einfluß der ausgedehnten Sonne auf den Schattenwurf. Drei neue Erkenntnisse werden dabei gewonnen:

- 1.) Die Ausdehnung der Sonne führt in geringer Entfernung von der WEA zu einer Vergrößerung der Schattenwurfzeit gegenüber der geometrischen Rechnung mit einer punktförmigen Sonne. Die Ursache für dieses Phänomen ist die Tatsache, daß der Schwellenkontrastwert von 2,5% schon erreicht wird, wenn ein Flügelende nur den Sonnenrand abdeckt, der Sonnenmittelpunkt den Rotorrand aber noch nicht berührt.
- 2.) Die Ausdehnung der Sonne führt zu einer endlichen Reichweite des periodischen Schattenwurfs. Der Grund dafür ist die Abschattungskompensation mehrerer Flügelflächen. In größerer Entfernung verbleiben die Flügelflächen während der Rotation in der Sonnenscheibe. Damit ist aber keine Helligkeitsänderung verbunden. Es tritt kein periodischer Schatten mehr auf. Es existiert zwar ein Halbschatten, dieser ist jedoch statisch. Die Reichweite des periodischen Schattenwurfs wird dadurch begrenzt.
- 3.) Befindet sich der Rotor annähernd zentrisch in der Sonnenscheibe, so scheint die Sonne zu blinzeln, ohne daß ein periodischer Schatten auftritt. Dieser **Blinzeleffekt** ist ebenfalls das Ergebnis der Abschattungskompensation der Flügelflächen.

3. Einfluß der Flügelform

Für die Schattenwurfrechnungen wird von einer trapezförmigen Flügelform ausgegangen, die sich zum Nabenzentrum wieder verjüngt. Der so geformte Rotorflügel deckt die Sonnenscheibe partiell ab und erzeugt dadurch den Schattenwurf. Dieser Schatten ist um so dunkler, bzw. kontrastreicher, je größer die abgedeckte Sonnenfläche ist. Wandert die Sonne hinter einem WEA-Rotor entlang, so decken die Flügelspitzen eine geringere Sonnenfläche ab als innenliegende Rotorbereiche mit größeren Flügelbreiten. Der Schwellenkontrastwert des Schattens der Flügelspitzen ist daher geringer. Mit zunehmender Entfernung erreicht der Schwellenkontrastwert der Flügelspitzen zuerst den Sichtbarkeitsgrenzwert von 2,5%. Der Schatten der Flügelspitzen wird unsichtbar. Wird die Entfernung weiter vergrößert, so wirft nicht mehr die ganze Rotorfläche den Schatten, sondern nur noch die Rotorzone, deren Schwellenkontrastwert über dem Sichtbarkeitsgrenzwert liegt. Nun verjüngt sich der Flügel zur Rotornabe ebenfalls, d.h. der periodische Schatten aus dem Nabenzentrum wird ebenfalls früher unsichtbar. Das Profil des Rotorflügels erzeugt daher zunächst eine ringförmig schattenwerfende Zone, die sich mit zunehmender Entfernung weiter verändert. Diese Veränderungen werden in Kapitel 5 genauer diskutiert.

4. Einfluß der getrübbten Atmosphäre

Der Schwellenkontrast beschreibt den Helligkeitsunterschied zwischen Halbschatten und Umgebung. Er ist eine Funktion der Beleuchtungsstärken, die von der Direkt- und Globalstrahlung der Sonne erzeugt werden. Diese Strahlungskomponenten werden bei der Ausbreitung in der Atmosphäre entscheidend beeinflusst.

Streu- und Absorptionsprozesse an den Luftmolekülen und Aerosolteilchen wie z.B. Staub Rauch und Wassertröpfchen verändern die Spektren und integralen Größen der Strahlungskomponenten. Je nach

Konzentration der Aerosolteilchen ist die Atmosphäre mehr oder weniger getrübt und damit der Einfluß auf die Strahlungskomponenten mehr oder weniger groß. Nach Linke kann dieser Einfluß durch einen Trübungsfaktor T_L beschrieben werden. Der Trübungsfaktor ist starken zeitlichen Schwankungen unterworfen, die einerseits auf die Zunahme des Wasserdampfgehaltes der Luft mit der Temperatur zurückzuführen sind, andererseits von Luftmassenwechseln herrühren. Über diese tages- und jahreszeitlichen Varianzen hinaus ändert sich der Trübungsfaktor aber auch noch im jahreszeitlichen Mittelwert. Diese langzeitlichen Veränderungen werden u. a. durch die Vulkantätigkeit auf der Erde hervorgerufen. Der Deutsche Wetterdienst hat aus Strahlungsmessungen die funktionale Abhängigkeit des Trübungs-faktors bestimmt [3].

Aus den Ausführungen geht hervor, daß der Schwellenkontrast und damit der Schattenwurf eine Funktion der Lufttrübung ist. Bei klarer Luft, d.h. geringer Trübung reicht der Schattenwurf weit und umgekehrt ist die Reichweite geringer, wenn die Trübung groß ist.

Bei den weiteren Untersuchungen stellt sich heraus, daß die Reichweite des Schattenwurfs auch von der Neigung der bestrahlten Fläche abhängt. Da die direkte Strahlungskomponente bei niedrigen Sonnenständen auf eine senkrechte Wand intensiver ist, reicht auch der Schattenwurf auf eine vertikale Fläche weiter als auf eine horizontale Fläche. Der Schattenwurf muß daher bezüglich der Flächenneigung differenziert behandelt werden. Um die jeweiligen Schwellenkontraste berechnen zu können, muß eine Vielzahl verschiedener strahlungstechnischer Größen bestimmt werden. Dazu zählen die sichtbaren Anteile der verschiedenen Strahlungskomponenten, deren Normspektrien und deren visuelle Nutzeffekte. Es wurde dafür notwendig, die Hay'sche Theorie zur diffusen Gesamtstrahlung auf den sichtbaren Teil der Strahlung zu übertragen. Unter Einbeziehung des Streuverhaltens der verschiedenen Strahlungskomponenten an Aerosolen und Luftmolekülen konnte diese Fragestellung beantwortet werden.

Insgesamt stellt sich heraus, daß die Strahlungsdiffusion in der Atmosphäre zu einer wesentlich geringeren Schattenreichweite gegenüber Vakuumbedingungen führt. Diese Aussage war zu erwarten, doch kann der Sachverhalt jetzt quantifiziert werden.

5. Ergebnisse der Parameterstudie

Um einen Überblick über die numerischen Einflüsse der Lufttrübung, der Sonnenausdehnung und der Flügelform zu gewinnen, wird eine Parameterstudie mit drei WEAn aus verschiedenen Größenklassen vorgenommen. Gewählt werden folgende Anlagen:

| <i>Kleine WEA</i> | <i>Mittelgroße WEA</i> | <i>Große WEA</i> |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Leistung P=200 kW | Leistung P=600 kW | Leistung P=1 MW |
| Nabenhöhe H=50 m | Nabenhöhe H=70 m | Nabenhöhe H=85 m |
| Rotordurchmesser D=30 m | Rotordurchmesser D=46 m | Rotordurchmesser D=60 m |

Die genauen Zahlenergebnisse sind im Forschungsbericht [1] zusammengestellt. Hier sollen sie anhand von Diagrammen diskutiert werden.

5.1 Die schattenwerfende Fläche A_{eff}

In der Abbildungssequenz (Abb. 2-7) wird die Entwicklung der schattenwerfenden Fläche in Abhängigkeit von der Entfernung aufgezeigt. Die Darstellungen gehen in diesem Fall von der großen WEA aus. Für die kleine und mittelgroße WEA liegen die Verhältnisse jedoch sehr ähnlich. In den Berechnungen wird weiterhin angenommen, daß der Schatten an einem dunstigen Sommertag geworfen wird. Der Linke-Trübungsfaktor besitzt dann einen Wert von ca. $T_L=6$. Für die Flügelform wird ein mittelschlankes Profil herangezogen.

In geringen Entfernungen ist die schattenwerfende Fläche A_{eff} größer als die Rotorfläche πR^2 . Die Sonnenausdehnung besitzt hier noch einen wesentlichen Einfluß. Sie vergrößert die Fläche A_{eff} maximal gegenüber der Rotorfläche um 3,7%. Bei größeren Entfernungen wird dieser Effekt durch den Einfluß der Flügelform kompensiert. Durch die trapezförmige Struktur der Rotorflügel wird der Schatten der Rotorspitzen früher unsichtbar als in Bereichen mit größerer Rotorbreite. Derselbe Effekt tritt in Nabennähe auf, da sich auch hier die Rotorblätter verjüngen. Auch hier wird der Schatten früher unsichtbar. Dadurch bildet sich eine ringförmig schattenwerfende Zone heraus, die im unteren Bereich abgeplattet ist (Abb. 3/4). Die Ursache für die Abplattung ist mit der Strahlungsunsymmetrie zu erklären. Diese wird durch die größeren Luftmassenzahlen in Horizontnähe ausgelöst.

Schattenwerfende Fläche A_{eff} in Abhängigkeit von der Entfernung

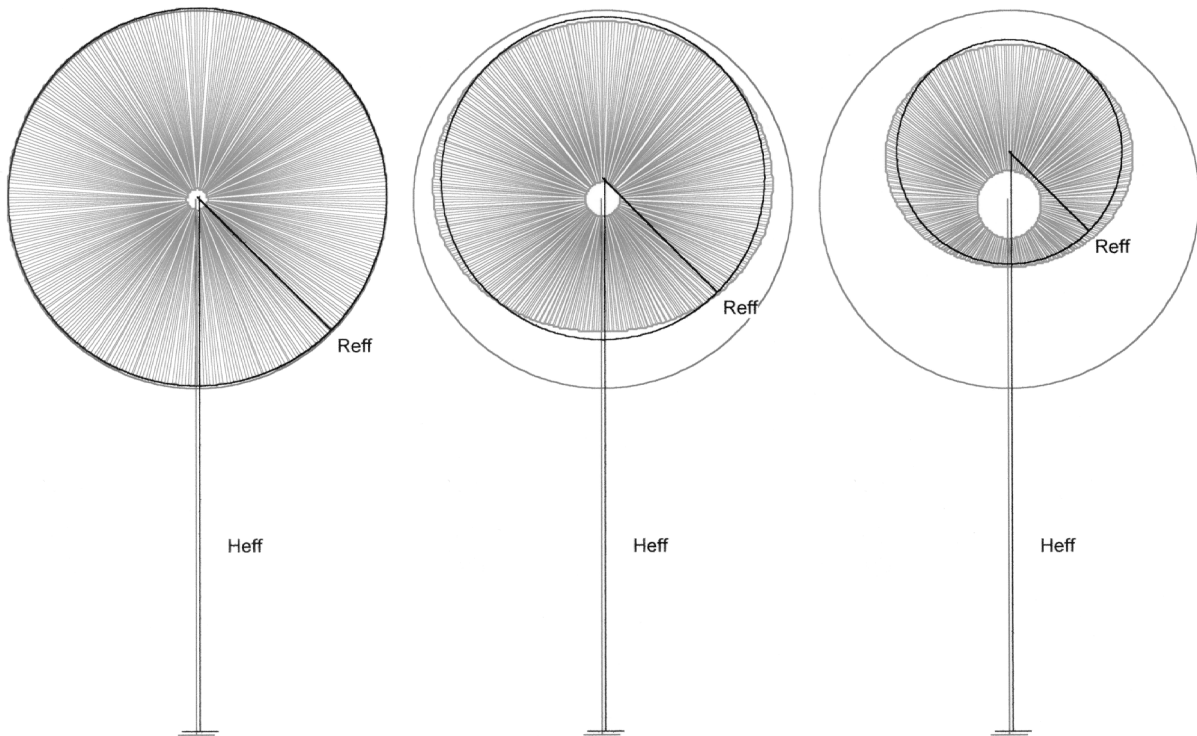


Abb. 2: Relative Entfernung $r_{ik}/R_{max}=0,37$ Verhältnis $A_{eff}/\pi R^2=0,998$
 Fig. 2: Relative distance $r_{ik}/R_{max}=0,37$ Ratio $A_{eff}/\pi R^2=0,998$
 Abb. 3: Relative Entfernung $r_{ik}/R_{max}=0,65$ Verhältnis $A_{eff}/\pi R^2=0,731$
 Fig. 3: Relative distance $r_{ik}/R_{max}=0,65$ Ratio $A_{eff}/\pi R^2=0,731$
 Abb. 4: Relative Entfernung $r_{ik}/R_{max}=0,83$ Verhältnis $A_{eff}/\pi R^2=0,352$
 Fig. 4: Relative distance $r_{ik}/R_{max}=0,83$ Ratio $A_{eff}/\pi R^2=0,352$

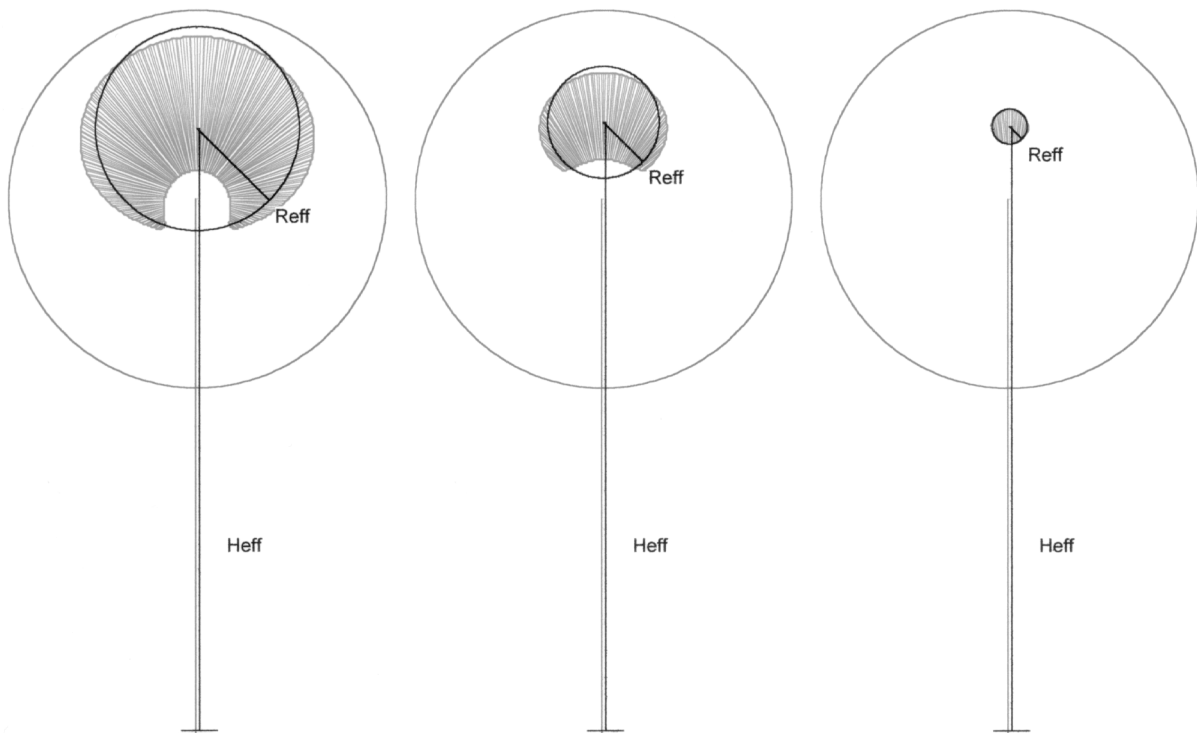


Abb. 5: Relative Entfernung $r_{ik}/R_{max}=0,88$ Verhältnis $A_{eff}/\pi R^2=0,292$
 Fig. 5: Relative distance $r_{ik}/R_{max}=0,88$ Ratio $A_{eff}/\pi R^2=0,292$
 Abb. 6: Relative Entfernung $r_{ik}/R_{max}=0,96$ Verhältnis $A_{eff}/\pi R^2=0,088$
 Fig. 6: Relative distance $r_{ik}/R_{max}=0,96$ Ratio $A_{eff}/\pi R^2=0,088$
 Abb. 7: Relative Entfernung $r_{ik}/R_{max}=0,99$ Verhältnis $A_{eff}/\pi R^2=0,009$
 Fig. 7: Relative distance $r_{ik}/R_{max}=0,99$ Ratio $A_{eff}/\pi R^2=0,009$

Bei ca. 86% der maximalen Reichweite reißt der Ring im unteren Bereich auf (Abb. 5). Die schattenwerfende Zone nimmt nun eine nierenförmige Gestalt an (Abb. 5). Die Zone wird immer kleiner und zieht sich oberhalb der Rotornabe schließlich bis auf einen Punkt zusammen. Die maximale Reichweite des Schattenwurfs ist erreicht.

Sonnenausdehnung besitzt hier noch einen wesentlichen Einfluß. Sie vergrößert die Fläche A_{eff} maximal gegenüber der Rotorfläche um 3,7%. Bei größeren Entfernungen wird dieser Effekt durch den Einfluß der Flügelform kompensiert. Durch die trapezförmige Struktur der Rotorflügel wird der Schatten der Rotorspitzen früher unsichtbar als in Bereichen mit größerer Rotorbreite. Derselbe Effekt tritt in Nabennähe auf, da sich auch hier die Rotorblätter verjüngen. Auch hier wird der Schatten früher unsichtbar. Dadurch bildet sich eine ringförmig schattenwerfende Zone heraus, die im unteren Bereich abgeplattet ist (Abb. 3/4). Die Ursache für die Abplattung ist mit der Strahlungsunsymmetrie zu erklären. Diese wird durch die größeren Luftmassenzahlen in Horizontnähe ausgelöst.

Bei ca. 86% der maximalen Reichweite reißt der Ring im unteren Bereich auf (Abb. 5). Die schattenwerfende Zone nimmt nun eine nierenförmige Gestalt an (Abb. 5). Die Zone wird immer kleiner und zieht sich oberhalb der Rotornabe schließlich bis auf einen Punkt zusammen. Die maximale Reichweite des Schattenwurfs ist erreicht.

5.2 Der physikalischer Korrekturfaktor f_{ph}

Die Rechnungen zeigen, daß die mit dem Geometriemodell ermittelten Schattenwurfzeiten T_{geo} nicht als *worst case*-Zeiten bezeichnet werden dürfen. Diese lassen sich allerdings mit Hilfe des physikalischen Korrekturfaktors f_{ph} aus T_{geo} bestimmen.

$$T_{max} = f_{ph} \times T_{geo}$$

Bei geringen Entfernungen kann aufgrund der Sonnenausdehnung die Beschattungszeit T_{max} größer sein. Bei größeren Entfernungen ist T_{max} kleiner als die geometrisch ermittelte Beschattungszeit T_{geo} . Der Grund dafür ist die trapezförmige Struktur der Rotorflügel. Der Schatten von schmalen Flügelspitzen wird eher unsichtbar als der Schatten aus Rotorbereichen mit größeren Flügelbreiten. Die schattenwerfende Zone zeigt eine große Varianz hinsichtlich der Einflußgrößen Lufttrübung, Anlagengröße, Bodenreflexion und Höhengaufstellung über dem Meeresspiegel. Ein großer Teil der Varianz läßt sich eliminieren und ein gleichartiges Verhalten aufdecken, wenn die übergeordneten Systemgrößen in Abhängigkeit von der relativen Entfernung r_{ik}/R_{max} dargestellt werden. In der Abb.8 ist der Verlauf von f_{ph} für den Schatten auf einer horizontalen Fläche dargestellt.

Der Korrekturfaktor besitzt bei 20% der Reichweite R_{max} ein Maximum. Bei klarem Wetter ($T_L=3,5$) hat f_{ph} dort den Wert von 1.04. Bei trüber Atmosphäre ($T_L=6$) ist das Maximum geringer. Ab 40% der maximalen Reichweite R_{max} wird f_{ph} kleiner als 1, d.h. die *worst case*-Zeit T_{max} ist geringer als T_{geo} . Bei etwa 77% von R_{max} besitzt f_{ph} den Wert 0,5. Bei klarem Wetter ($T_L=3,5$) tritt dieser Wert etwas früher auf, bei trüber Luft ($T_L=6$) etwas später. Abb.9 zeigt das Verhalten des Korrekturfaktors f_{ph} für den Schattenwurf auf eine vertikale Fläche. Der Verlauf ähnelt sehr dem Verlauf in Abb.8. Das Maximum tritt jedoch früher auf, etwa bei 16% der maximalen Reichweite. Kleiner als 1 wird f_{ph} jetzt schon ab 32%, und auch der Wert von 0.5 wird schon bei 76% der maximalen Schattenreichweite erreicht. Unterschiedliche Wetterlagen bezüglich des Trübungs-faktors T_L führen nur zu einer kleinen Varianz. Auch alle anderen Einflußparameter wie Anlagengröße, Reflexionsgrad und Höhenglage führen nur zu Varianzen, die innerhalb der von dem Trübungs-faktor T_L vorgezeichneten Bandbreite liegen. Aus den Daten können fol-

Physikalischer Korrekturfaktor f_{ph}

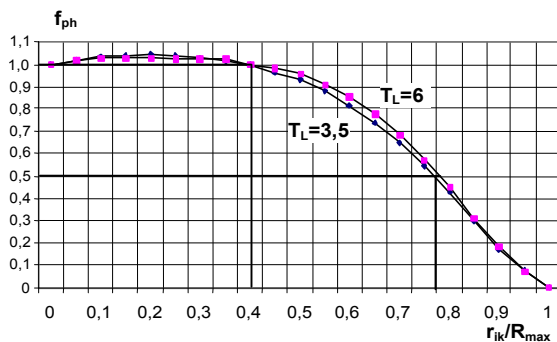


Abb. 8: Schattenwurf auf eine **horizontale** Fläche
 Fig. 8: Shadow flicker on a **horizontal** surface

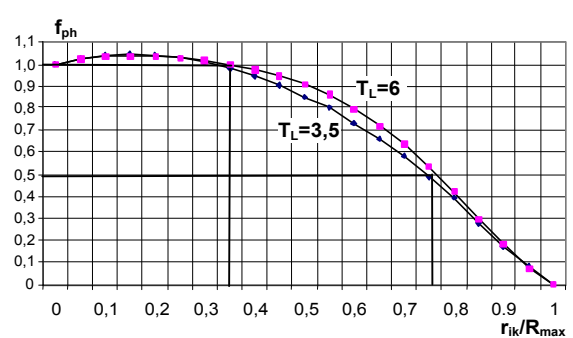


Abb. 9: Schattenwurf auf eine **vertikale** Fläche
 Fig. 9: Shadow flicker on a **vertical** surface

gende Schlußfolgerungen gezogen werden:

1.) Schatten auf der horizontalen Fläche

Die maximalen Reichweiten des Schattenwurfs sind relativ gering. Das Maximum von f_{ph} liegt daher immer vor der 300 m Abstandsgrenze. Hinter der Abstandsgrenze ist f_{ph} nahezu immer kleiner als T_{geo} .

2.) Schatten auf der vertikalen Fläche

Für kleine und mittelgroße Anlagen liegt auch hier das Maximum vor der 300 m Grenze. Bei Megawattanlagen kann das Maximum jedoch auf der Abstandsgrenze oder sogar dahinter liegen. In diesem Fall kann die *worst case*-Zeit T_{max} je nach Entfernung sowohl größer als auch kleiner als T_{geo} werden. Die fehlerhaften Aussagen von T_{geo} können dabei erheblich sein. Bei 76% der maximalen Reichweite beträgt der Fehler schon 100%. Beträgt $R_{max}=900$ m, so tritt dieser Fehler schon in einer Entfernung von 684 m auf. Bei zunehmender Entfernung wird der Fehler noch größer.

5.3 Der effektive Rotorradius R_{eff}

Für Schattenwurfprognosen werden die täglichen Beschattungszeiten benötigt. In diesem Fall reicht der Korrekturfaktor f_{ph} für die jährliche Beschattungszeit nicht aus. Als Näherung für die Berechnung der täglichen Beschattungszeit können der effektive Rotorradius und die effektive Nabenhöhe herangezogen werden. Den effektiven Rotorradius R_{eff} erhält man durch Umverteilen der schattenwerfenden Fläche A_{eff} auf eine gleich große Kreisfläche. Die effektive Nabenhöhe H_{eff} erhält man aus der Summe der ursprünglichen Nabenhöhe H und der exzentrischen Schwerpunktsverlagerung der schattenwerfenden Fläche A_{eff} . Die mit diesen Werten geometrisch berechneten Beschattungszeiten sind identisch mit der *worst case*-Zeit T_{max} . Das Computerprogramm liefert dann auch die täglichen Abschattungszeiten. In den Abb.10 / 11 sind die relativen effektiven Radien in Abhängigkeit von der relativen Entfernung dargestellt. Die Ergebnisse entsprechen den Resultaten für den Korrekturfaktor f_{ph} . Ein Maximum größer 1 erreichen sie bei 16 %, bzw. 20 % von R_{max} . Kleiner als 1 werden sie bei 32 %, bzw. 40 % von R_{max} . Bei unterschiedlichen Wetterlagen bezüglich der Lufttrübung T_L treten kleine Varianzen auf. Dasselbe gilt auch für die anderen Einflußparameter. Die von der Lufttrübung aufgespannten Bandbreiten werden jedoch nicht überschritten.

5.4 Die effektive Nabenhöhe H_{eff}

Die Strahlungsunsymmetrie führt dazu, daß die schattenwerfende Zone unten abgeplattet ist. Mit zunehmender Entfernung wird dieser Effekt immer stärker, bis die Zone unten ganz aufreißt, und aus der Ringzone ein mehr oder weniger nierenförmiger Bereich wird. Bei diesem Prozeß verschiebt sich der Flächenschwerpunkt immer mehr nach oben, d.h. die effektive Nabenhöhe wird größer. Der allgemeine Zusammenhang kann wieder durch eine Relativgröße veranschaulicht werden. In diesem Fall ist es die relative Exzentrizität $(H_{eff}-H)/R$. In Abb.12 ist diese Größe in Abhängigkeit von der relativen Entfernung für einen Schatten auf der **horizontalen** Fläche dargestellt. Bei den ersten 30% der maximalen Reichweite bleibt die Exzentrizität praktisch Null, dann steigt sie kontinuierlich an und erreicht bei $r_{ik}=R_{max}$ Werte zwischen 0,4 und 0,5 R. Der höhere Wert wird bei trübem Wetter erreicht.

Effektiver Rotorradius

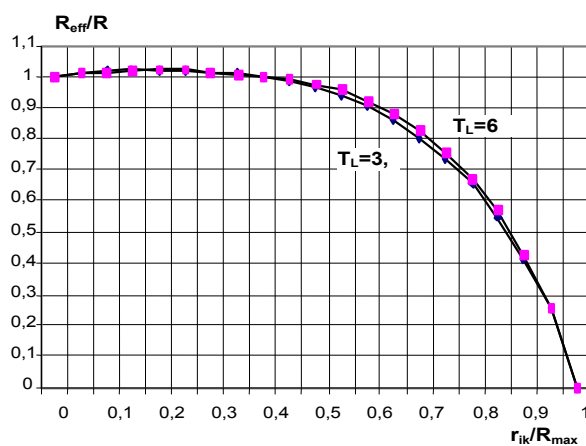


Abb.10: Schattenwurf auf eine **horizontale** Fläche
 Fig. 10: Shadow flicker on a **horizontal** surface

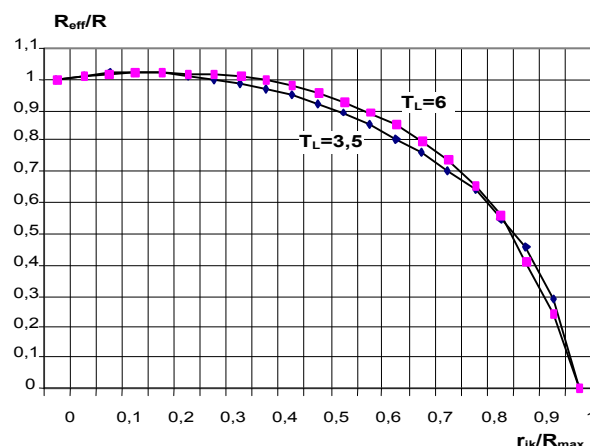


Abb.11: Schattenwurf auf eine **vertikale** Fläche
 Fig. 11: Shadow flicker on a **vertical** surface

Exzentrizität der effektiven Nabenhöhe

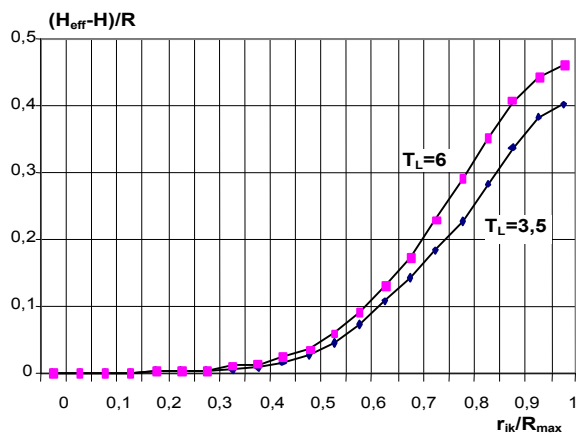


Abb.12: Schattenwurf auf eine **horizontale** Fläche
 Fig. 12: Shadow flicker on a **horizontal** surface

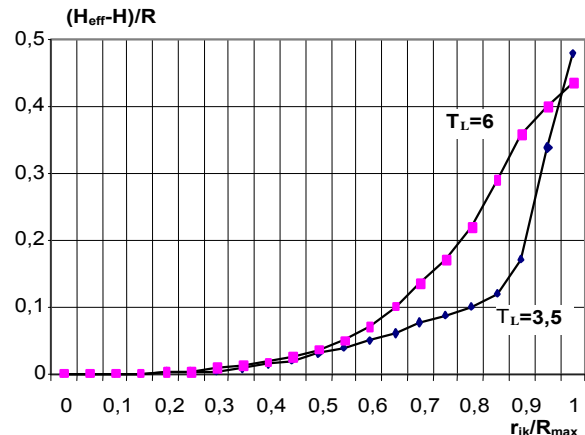


Abb.13: Schattenwurf auf eine **vertikale** Fläche
 Fig. 13: Shadow flicker on a **vertical** surface

Auf der **vertikalen** Fläche sehen die Verhältnisse etwas anders aus (Abb.13). Bei trübem Wetter liegt zunächst ein analoges Verhalten vor, während bei klarem Wetter die Exzentrizität zunächst nur langsam zunimmt. Ab 90% der maximale Reichweite nimmt die Exzentrizität dann schnell zu und erreicht bei R_{max} sogar höhere Werte. Das Verhalten läßt sich dadurch erklären, daß bei zunehmender Entfernung die Höhenwinkel der Rotorfläche kleiner werden und dadurch die von der Strahlung zu durchdringenden Luftmassenzahlen sehr stark ansteigen. Dieser Effekt erzwingt schließlich die Zunahme der Exzentrizität.

5.5 Die maximale Reichweite des Schattens

In den nachfolgenden Abb.14-17 sind die maximalen Schattenreichweiten für WEAn mit unterschiedlichen Nabenhöhen und verschiedenen Rotorradien dargestellt. Da für die Rechnungen ein mittelschlankes Profil zugrunde gelegt wurde, können die Reichweiten im Einzelfall von den hier errechneten Werten abweichen. Es zeigt sich, daß neben der Nabenhöhe H und dem Rotorradius R der Linke Trübungsfaktor T_L einen wesentlichen Einfluß auf die Schattenreichweite besitzt. Eine große Rolle spielt auch die Neigung der Beschattungsebene. Bei niedrigen Sonnenständen ist die Bestrahlung auf eine senkrechte Fläche intensiver. In diesem Fall reicht auch die Schattenbildung weiter als auf einer horizontalen Fläche. Das gilt besonders für das Flachland, während sich im Bergland für große Höhenwinkel diese Unterschiede ausgleichen können.

Die Abb. 14 und 15 zeigen die Reichweite des Schattenwurfs in Abhängigkeit vom Rotorradius. Parameter der Kurvenscharen ist jeweils die Nabenhöhe H . Die hier dargestellten Reichweiten gelten für einen Sommertag, an dem der Linke Trübungsfaktor T_L den hohen Wert 6 besitzt. Man erkennt, daß die Schattenbildung für kleine und mittelgroße WEAn die 1000 m Grenze nicht überschreitet. MW-Anlagen mit Rotorblattthöhen oberhalb von 100 m führen hingegen zu Schattenreichweiten, die auch die 1000 m Grenze überschreiten. Aus den Abbildungen ist weiter ersichtlich, daß gerade die Rotorblattthöhe einen entscheidenden Einfluß auf die Reichweite der Schattenbildung besitzt. Die Rotorblattthöhe bestimmt die Sonnenstandshöhe und damit die Atmosphärenschicht, die von der Strahlung zu durchdringen ist. Mit zunehmender Sonnenstandshöhe wird die zu durchdringende Atmosphärenschicht kleiner und entsprechend die direkte Strahlung größer. Die Schattenbildung wird intensiver, sie reicht weiter.

Die Abb. 16 und 17 zeigen die Schattenreichweiten für einen Linke Trübungsfaktor von 3,5. Dabei handelt es sich um klare Luft, wie sie an einem Wintertag auftreten kann. Die dadurch verbesserten Strahlungsverhältnisse führen zu wesentlich größeren Schattenreichweiten. Für die horizontal beschattete Fläche ergibt sich ein Plus von ca. 80%, bei der vertikal beschatteten Fläche sind es noch gut 60%. MW-Anlagen können aufgrund der besseren Strahlungsverhältnisse jetzt die 2000 m Marke beim Schattenwurf überschreiten.

5.6 Einfluß der Bodenreflexion

Die Bodenreflexion hat nur einen geringen Einfluß auf die Reichweite des Schattenwurfs. Die Verminderung der Reichweite gegenüber Grünflächen liegt im allgemeinen unter 5%. Bei einer inhomogenen

Reichweite des Schattenwurfs von Windenergieanlagen

Schattenbildung auf der horizontalen Fläche

Linke - Trübungsfaktor 6.0

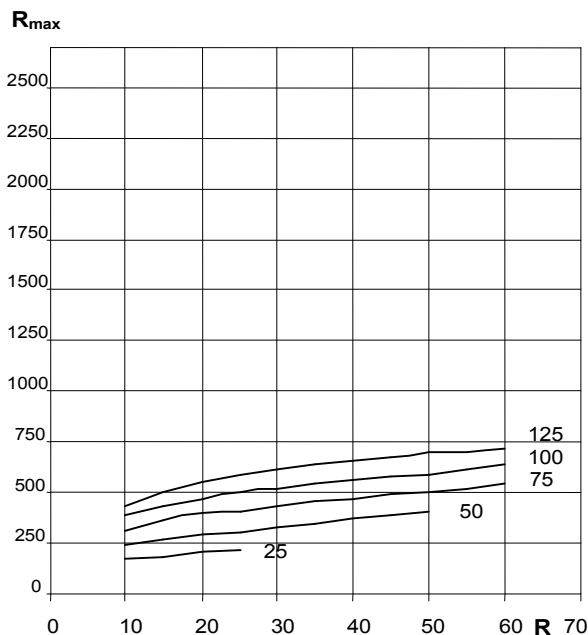


Abb.14: Reichweite R_{max} und Rotorradius R in Metern
Parameter der Kurvenschar ist die Nabenhöhe H (m)

Fig. 14: Range R_{max} and rotor radius R in metres
Parameter of the group of curves is the hub height H (m)

Schattenbildung auf der vertikalen Fläche

Linke - Trübungsfaktor 6.0

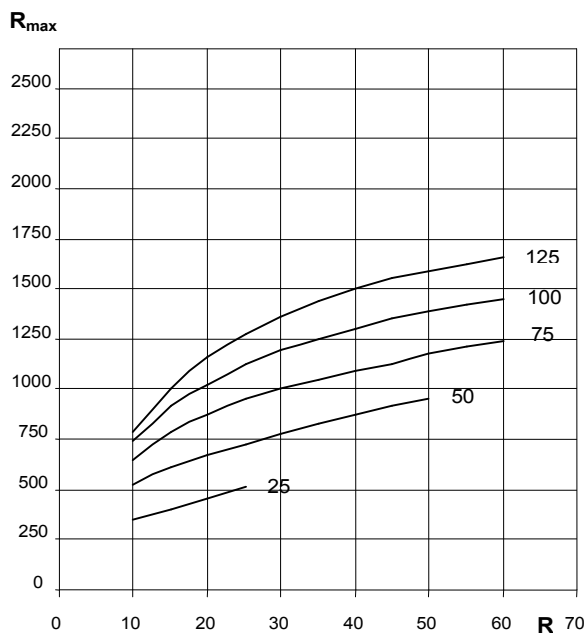


Abb.15: Reichweite R_{max} und Rotorradius R in Metern
Parameter der Kurvenschar ist die Nabenhöhe H (m)

Fig. 15: Range R_{max} and rotor radius R in metres
Parameter of the group of curves is the hub height H (m)

Schattenbildung auf der horizontalen Fläche

Linke - Trübungsfaktor 3.5

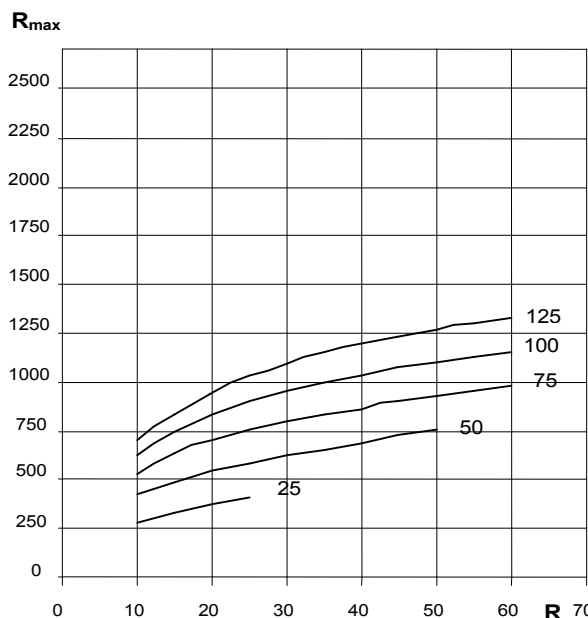


Abb.16: Reichweite R_{max} und Rotorradius R in Metern
Parameter der Kurvenschar ist die Nabenhöhe H (m)

Fig. 16: Range R_{max} and rotor radius R in metres
Parameter of the group of curves is the hub height H (m)

Schattenbildung auf der vertikalen Fläche

Linke - Trübungsfaktor 3.5

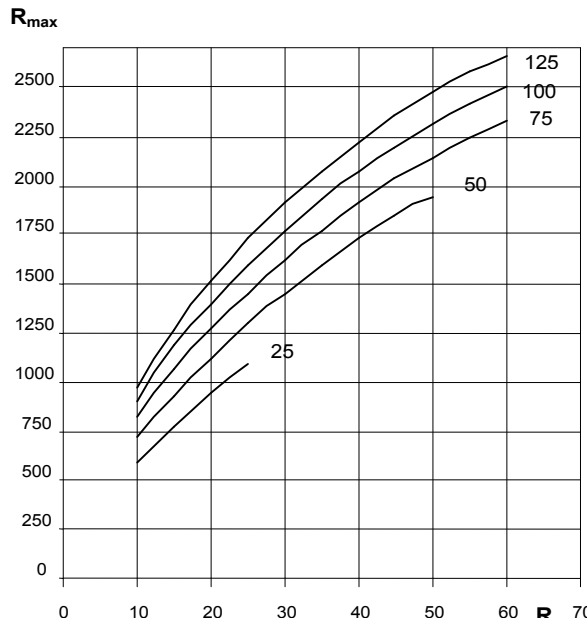


Abb.17: Reichweite R_{max} und Rotorradius R in Metern
Parameter der Kurvenschar ist die Nabenhöhe H (m)

Fig. 17: Range R_{max} and rotor radius R in metres
Parameter of the group of curves is the hub height H (m)

Bodenbeschaffenheit reichen daher gemittelte Reflexionswerte aus, die sich am Flächengewicht orientieren. Die vorhandene Winkelabhängigkeit kann vernachlässigt werden. Bei Schneelandschaften vermindern sich die Schattenreichweiten jedoch merklich. Das Minderungsmaß kann 10% übersteigen. Grund dafür ist die deutlich erhöhte Umgebungsstrahlung, die zu einem schnelleren Absinken des Schwellenkontrastes führt. Diese Aussagen gelten natürlich nur für vertikal beschattete Flächen. Auf horizontal beschatteten Flächen ändert sich die Reichweite nicht.

5.7 Einfluß der Niveauhöhe des Areal

In bergigem Land sind die mit zunehmender Höhe von der Strahlung zu durchdringenden Luftmassenzahlen geringer. Infolgedessen wird die Reichweite des Schattens größer. Bis zu einer Höhenlage von 400 m vergrößert sich die Schattenreichweite nur geringfügig ($\Delta R_{\max} \leq 2\%$). Erst in Höhen von 2000 m übersteigen diese die Reichweiten in Meereshöhe um 10%.

6. Literatur

- [1] H.-D. Freund; Einflüsse der Lufttrübung, der Sonnenausdehnung und Flügelform auf den Schattenwurf von Windenergieanlagen, Forschungsbericht zur Umwelttechnik, FH Kiel (Jan. 2002)
- [2] H.-D. Freund; Die Reichweite des Schattenwurfs von Windkraftanlagen, Umweltforschungsdatenbank UFORDAT (Jun. 1999)
- [3] Kasten, Dehne, Behr, Bergholter; Die räumliche und zeitliche Verteilung der diffusen und direkten Sonnenstrahlung in der Bundesrepublik Deutschland, Forschungsbericht (BMFT) T84-125 / 1984
- [4] World Meteorological Organization; WMO-N0. 557, Meteorological Aspects of the Utilization of Solar Radiation as an Energy Source
- [5] H.-D. Freund; Systematik des Schattenwurfs von Windenergieanlagen, Forschungsbericht zur Umwelttechnik, FH Kiel (2000)
- [6] Page, J. (1986); Prediction of solar radiation on inclined surfaces. Solar Energy R&D in the EC, Ser. F, Vol. 3, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht
- [7] CH. Rigolier, O. Bauer, L. Wald; ON THE CLEAR SKY MODEL OF THE ESRA (EUROPEAN SOLAR RADIATION ATLAS) WITH RESPECT TO THE HELIOSAT METHOD, Solar Energy Vol.68 no.1 pp 33-48 (2000)

Kooperation

Das Projekt wird in Kooperation mit dem Deutschen Wetterdienst durchgeführt. Dem DWD fällt dabei die Aufgabe zu, neue Trübungsfaktoren aus Strahlungsmessungen der letzten Dekade zu bestimmen. Die Veröffentlichung erfolgt durch Herrn Czeplak vom DWD zu einem späteren Zeitpunkt.