Experimentelle Untersuchung der strömungsinduzierten Schallabstrahlung von Kiteleinen

Lukas Saur[1], Jörg Riedel[1], Stefan Becker[1]

[1] *Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik, 91058 Erlangen, Deutschland, Email: sr@ipat.uni-erlangen.de*

Einleitung

Im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) hat die deutsche Bundesregierung festgelegt, bis im Jahr 2030 mindestens 65% des Strombedarfs durch regenerative Energien zu decken. Windenergie leistet den größten Beitrag zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, jedoch ging die neu istallierte Windkraftleistung in den letzten 3 Jahren stark zurück [1]. Ein Grund hierfür ist, dass die Anzahl potenziell neuer Standorte mit guten Windbedingungen in Deutschland begrenzt ist.

Eine Lösung für dieses Problem bieten Kitewindkraftwerke. Diese neuartigen Windenergieanlagen operieren in Flughöhen von bis zu 800 m. Dort bläst der Wind stetiger und kräftiger, wodurch eine Vielzahl neuer Standorte ermöglicht wird. Gleichzeitig ist der Materialaufwand stark reduziert, da keine große Stahlkonstruktion wie bei Windkrafträdern benötigt wird [2].

Die Funktionsweise von Kitewindkraftwerken ist in Abbildung 1 dargestellt. Der bis zu 120 m^2 große Kite steigt in einer 8er-förmigen Flugkurve auf und entwickelt dabei Auftrieb. Zur Stromproduktion zieht der Flugdrachen das Seil von einer Winde und der angeschlossene Generator wandelt die Drehbewegung der Winde in elektrische Energie um (1). Sobald das Zugseil vollständig ausgerollt ist, beginnt die Rückholphase (2). Der Kite steuert automatisch an eine Position sehr geringen Auftriebs. Der Generator arbeitet nun als Motor und holt das Seil wieder bis zu der Länge ein, bei der die nächste Energiegewinnungsphase beginnt (3). Das Einholen erfolgt wesentlich schneller und benötigt dabei nur einen Bruchteil der Energie, die zuvor gewonnen wurde. Der überschüssige Strom wird mittels Umrichtern in das Stromnetz eingespeist. Während dieses Powerzyklus erreicht der Kite Fluggeschwindigkeiten bis zu 40 $m\,s^{-1}$ [3].

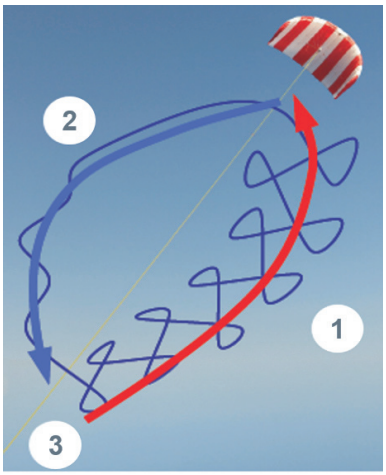


Abbildung 1: Powerzyklus des Kitewindkraftwerks [3]

Im Flugbereich des Kite sind tonale Geräusche hörbar. Diese Pfeiftöne sind strömungsinduzierte Geräusche, die durch die Bewegung der Kiteleinen durch Luft mit größerer Geschwindigkeit hervorgerufen werden. Die Kiteleinen verbinden das Textilgewebe des Kitesegels mit dem starken Zugseil, welches die Auftriebskraft an die Seilwinde am Boden überträgt. Beispielsweise wird ein 90 m^2 großes Kitesegels von mehr als 600 m Kiteleinen aufgespannt, um die entstehenden Kräfte aufzunehmen und die Formstabilität des Kitesegels zu gewährleisten.

Nach Kenntnis des Autors gibt es nur sehr wenige Untersuchungen mit Daten zum strömungsinduzierten Schall von flexiblen Leinen wie Seilen, Kabeln oder Drachenleinen. Ziel unserer Untersuchungen war es, die aeroakustischen Eigenschaften umströmter Kiteleinen zu charakterisieren und die Entstehung tonaler Strömungsgeräusche an Kitewindkraftwerken zu verstehen.

Theoretische Grundlagen

Im 19. Jahrhundert stellte Strouhal [4] fest, dass die Wirbelablösung an quer angeströmten Zylindern ein tonales Geräusch, den so genann-

ten Äolischen Ton, erzeugt, dessen Frequenz der Strouhal-Frequenz f_{St} entspricht. Die Strouhalfrequenz berechnet sich mithilfe der Strouhal-Zahl St, der Strömungsgeschwindigkeit U sowie dem Zylinderdurchmesser d.

$$f_{St} = \frac{St \cdot U}{d} \tag{1}$$

Die Strouhal-Zahl St ist bei der Umströmung eines ruhenden Zylinders eine Funktion der Reynoldszahl sowie der Oberflächenrauheit [5, 6]. Im betrachteten Reynoldszahlbereich $2000 \leqq Re \leqq 7000$ gilt die Näherung $St \approx 0,2$ [7]. Lighthill [8] klassifizierte die Umströmung von Zylindern als Dipolschallquelle, die Hauptabstrahlrichtung des Schalls liegt senkrecht zur Strömungsrichtung. Das Zylindergeräusch wird in erster Linie durch das Phänomen der instationären Wirbelablösung erzeugt, wodurch große Druckschwankungen an der Zylinderoberfläche verursacht werden.

Bei der Umströmung zylindrischer Objekte löst sich im untersuchten Reynoldszahlbereich die Strömung kurz vor der breitesten Stelle ab und bildet hinter dem zylindrischen Objekt eine vollturbulente Wirbelstraße aus [9]. Gerrard [10] führte Schallmessungen an kreisförmigen Zylindern in Luftströmungen durch und stellte einen Einfluss der durch die Wirbelablösung hervorgerufenen Zylinderschwingungen auf die Schallabstrahlung fest.

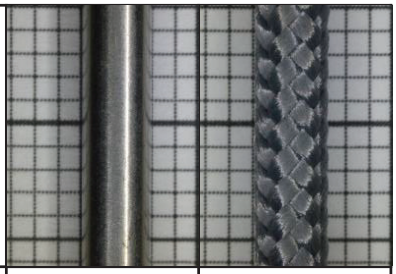
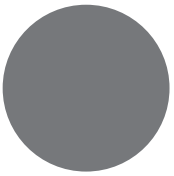
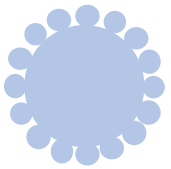
Messung der Schallabstrahlung einer Kiteleine im aeroakustischen Windkanal

Für die Untersuchung der strömungsinduzierten Schallabstrahlung von Kiteleinen wird der abgestrahlte Schall einer einzelnen umströmten Leine im aeroakustischen Windkanal bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten gemessen. Für den Vergleich der aeroakustischen Eigenschaften gespannter Leinen und zylindrischer Festkörper wird zusätzlich die Schallabstrahlung einer Drahtstange mit gleichem Durchmesser untersucht. Abbildungen und Eigenschaften der Testobjekte sind in Tabelle 1 dargestellt.

Versuchsaufbau

Die Schallmessungen wurden im aeroakustischen Windkanal der Universität Erlangen-Nürnberg (Lehrstuhl für Sensorik) durchgeführt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 2 dargestellt. Mithilfe eines Gestells wird das zylindrische Testobjekt in der Mitte des Freistrahls positioniert. Am Ende der Kiteleine werden Gewichte mit einer Masse von 50 kg befestigt, um die vom Kite erzeugte Zugkraft zu simulieren. Die Schallmessungen wurden bei Strömungsgeschwindigkeiten von $10\,\mathrm{m\,s^{-1}}$, $22\,\mathrm{m\,s^{-1}}$ und $34\,\mathrm{m\,s^{-1}}$ durchgeführt, woraus sich Reynoldszahlen von $2000 \leqq Re \leqq 7000$ ergeben. Diese drei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten ermöglichen eine Aussage über die Schallabstrahlung von Kiteleinen im gesamten Arbeitsbereich von Kitewindkraftwerken.

Tabelle 1: Eigenschaften der Testobjekte

Abbildung		
Bezeichnung	**Drahtstange**	**Kiteleine**
Durchmesser	3,0 mm	3,0 mm
Material, Aufbau	Kaltgezogene Drahtstange aus Stahl	Kern: HMPE, Mantel: 16 HMPE Stränge, geflochten
Querschnitt		

Das strömungsinduzierte Geräusch wird in dem reflexionsarmen Raum mit vier Freifeldmikrofonen vom Typ Brüel & Kjær 1/2 Zoll Freifeldmikrofonen aufgenommen. Abbildung 3 zeigt die Mikrofonpositionen, die sich in einem Abstand von 1 m von der, durch den grünen Punkt gekennzeichneten, Position des Testobjekts befinden. Die Mikrofone Nr. 2 & 4 sind in der Richtung der maximalen Schallabstrahlung eines kreisförmigen Zylinders, senkrecht zur Strömungsrichtung positioniert. Die Mikrofone Nr. 1 & 3 sind um 22,5° zu dieser Richtung versetzt,

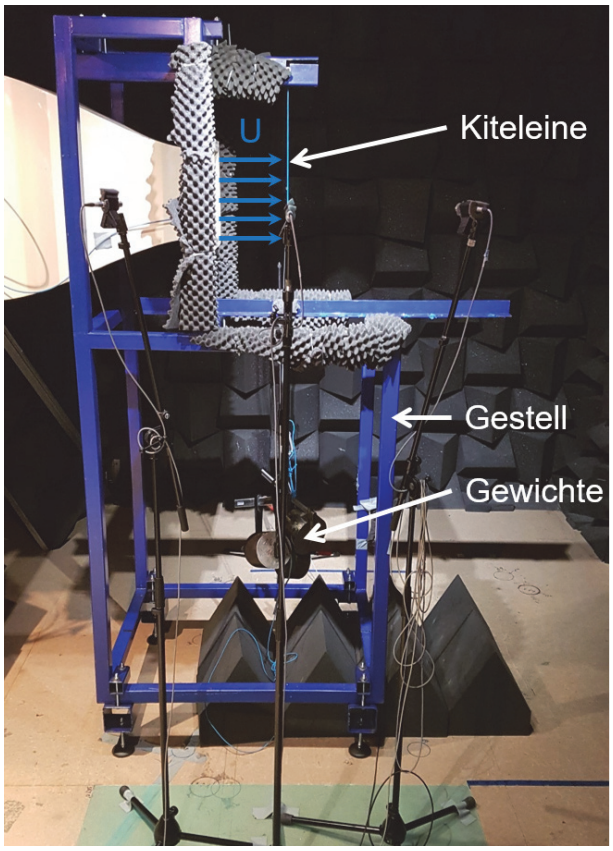


Abbildung 2: Versuchsaufbau, Seitenansicht

um Abweichungen in der Abstrahlcharakteristik des Schalls zu bestimmen.

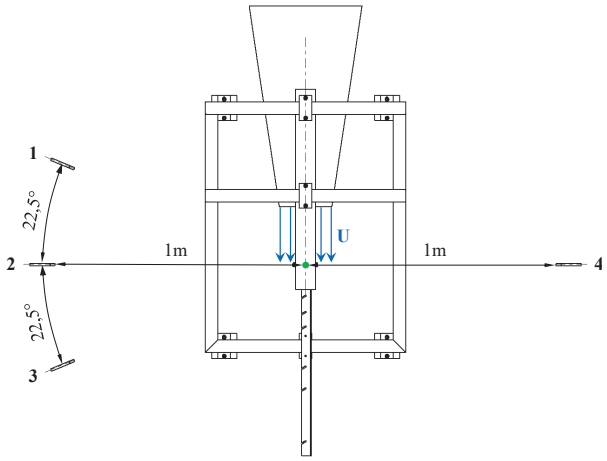


Abbildung 3: Schematischer Messaufbau, Draufsicht

Die Messzeit beträgt 30 Sekunden mit einer Abtastfrequenz von 48 000 Hz. Der Gesamtschalldruckpegel ($L_{p,ges}$) wird durch Integration des dargestellten Geräuschspektrums von 100 Hz bis 10 000 Hz ermittelt. Die Strouhal-Zahl St wird auf Grundlage der Frequenz f_{peak} berechnet, die dem Spitzenschalldruckpegel ($L_{p,max}$) entspricht.

Ergebnisse

Abbildung 4 zeigt den A-bewerteten Schalldruckpegel der 3 mm Drahtstange und der Kiteleine (vgl. Tabelle 1) über einen Frequenzbereich von 100 Hz bis 10 000 Hz bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten. Das gemessene Windkanal-Eigengeräusch ist im Schmalbandspektrum in schwarzer Farbe dargestellt, denn der Freistrahllärm stellt die untere Grenze bei der akustischen Vermessung umströmter Objekte dar. Der Geräuschpegel im Windkanal nimmt mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit zu, was hauptsächlich auf den Schall zurückzuführen ist, der durch die Vermischung des Freistrahls mit der statischen Umgebungsluft im Breitbandbereich entsteht.

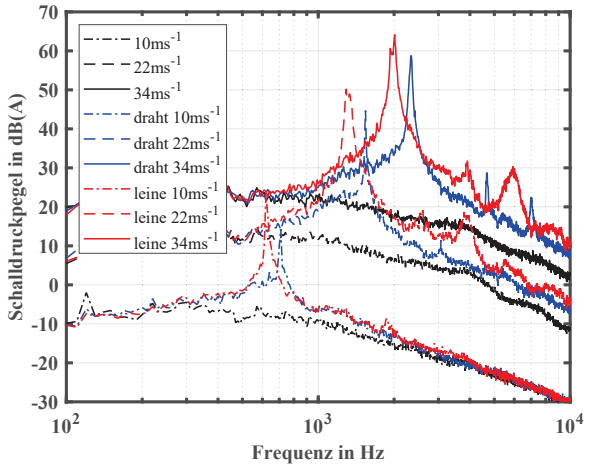


Abbildung 4: Schmalbandspektrum des Schalldruckpegels einer Drahtstange und einer Mehrzweckleine für unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten

Grundsätzlich weisen die Kiteleine und die Drahtstange ähnliche Schallspektren auf. Beide zeigen einen dominierenden Peak, der den äolischen Ton repräsentiert, der mit der Luftströmung um zylindrische Objekte verbunden ist. Dieser äolische Ton ist als Pfeifen mit zunehmender Lautstärke bei höheren Windgeschwindigkeiten wahrnehmbar. Bei Windgeschwindigkeiten von $U \geqq 22\,\mathrm{m\,s^{-1}}$ treten bei der doppelten und dreifachen Strouhal-Frequenz kleinere Nebenpeaks auf. Die Peaks der Kiteleine sind breitbandiger und haben eine größere Amplitude. Die Nebenpeaks der Leine sind ebenfalls stärker ausgeprägt. Die Peaks der Kiteleine treten bei 15% niedrigerer Frequenz auf. Für $f > f_{St}$ nimmt der Schalldruckpegel mit 20 dB pro Größenordnung der Frequenz ab.

Die Peaks des Drahtes sind schmalbandiger, da die Wirbel an der starren Drahtstange mit konstanter

Frequenz ablösen. Dagegen wird die flexible Leine durch die fluktuierenden Drücke, die während der Wirbelablösung auf die Leinenoberfläche wirken, zu Schwingungen angeregt. Die Schwingungen der Leine nehmen bei höheren Windgeschwindigkeiten zu und führen zu Wirbelablösungen mit variiender Frequenz, dies resultiert in einem breitbandigeren Peak [10]. Die niedrigere Strouhalfrequenz der Kiteleine resultiert aus ihrer größeren Oberflächenrauheit. An der rauen Oberfläche der Leine kann sich eine dickere Grenzschicht ausbilden, von der sich größere Wirbel mit niedrigerer Frequenz ablösen [11].

Tabelle 2 zeigt die akustischen Kennwerte der Drahtstange und der Kiteleine bei einer Windgeschwindigkeit von $34\,\mathrm{m\,s^{-1}}$. Die gemessene Strouhal-Zahl des Stahldrahtes $St = 0,206$ entspricht dem Literaturwert für glatte, runde Zylinder in diesem Reynoldszahlbereich [7]. Da die Strouhal-Zahl proportional zur Strouhalfrequenz ist, ist der St-Wert der Leine um 15% kleiner. Spitzen- und Gesamtschalldruckpegel der Kiteleine sind größer aufgrund der raueren Oberfläche und der stärker angeregten Schwingungen.

Tabelle 2: Strouhal-Zahl, Spitzen- und Gesamtschalldruckpegel eines 3 mm starken Drahts und einer Kiteleine bei $34\,\mathrm{m\,s^{-1}}$

Testobjekt	$\boldsymbol{St}$	$\boldsymbol{L_{p,max}}$ in dB(A)	$\boldsymbol{L_{p,ges}}$ in dB(A)
3 mm Draht	0.206	61,1	77,4
Kiteleine	0.177	63,9	82,2

Fazit

Die Schallabstrahlung von Kiteleinen wurde untersucht, um Erkenntnisse zur Lärmemission von Kitewindkraftwerken zu gewinnen. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass gespannte Leinen und starre, dünne Zylinder vergleichbare aeroakustische Eigenschaften besitzen. Beide strahlen tonalen Schall ab und zeigen einen dominanten Peak im Schallspektrum bei der spezifischen Strouhal-Frequenz. Flexible Leinen erzeugen mehr Schall als starre zylindrische Körper, da durch Wirbelablösung stärkere Schwingungen angeregt werden. Die tonalen Geräusche im Operationsbereich des Kitewindkraftwerks lassen sich auf strömungsinduzierte Geräusche der Kiteleinen zurückführen.

Literatur

[1] Deutsche Windguard. *Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland Jahr 2020*. 2021.

[2] P. Bechtle U. Zillmann. *Airborne Wind Energy: Advances in Technology Development and Research*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2018.

[3] SkySails Power GmbH Homepage. `https://skysails-power.com/technology.html/`.

[4] V. Strouhal. Ueber eine besondere art der tonanregung. *Annalen der Physik und Chemie*, 5:216-251, 1887.

[5] K. Gersten H. Schlichting. *Grenzschicht-Theorie*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 9. auflage edition, 1997.

[6] D. Wolf R. Lerch, G. Sessler. *Technische Akustik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.

[7] R.D. Blevins. *Flow-induced Vibration*. Krieger Publishing Company, 2001.

[8] M.J. Lighthill. On sound generated aerodynamically: Ii. turbulence as a scource of sound. *Proc. Royal Society London 222*, pages 1-32, 1954.

[9] M. Morkovin. Flow around circular cylinder - a kaleidoscope of challenging fluid phenomena. *American Society of Mechanical Engineering*, 1964. Symposium on fully separated flows.

[10] J. H. Gerrard. Measurements of the sound from circular cylinders in an air stream. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 68(7):453-461, 1955.

[11] O. Güven, C. Farell, and V. C. Patel. Surface-roughness effects on the mean flow past circular cylinders. *Journal of Fluid Mechanics*, 98(4):673-701, 1980.