## Höhenwindenergie: Antriebskraft des Weihnachtsmanns ?

#### Moritz Diehl

Lehrstuhl Systemtheorie Chair of Systems Theory, Control and Optimization Department of Microsystems Engineering (IMTEK) Albert Ludwig University of Freiburg (100%) and Ilectrical Engineering Department (ESAT-STADIUS) and Optimization in Engineering Center (OPTEC) KU Leuven University (10%)

RG

D

60

**KU LEUVEN** 

Weihnachtsvorlesung 18. Dezember 2014









## ~80% des europäischen Stroms ist fossilen oder nuklearen Ursprungs



EU-27 electricity generation by source 2011

[eurostat]

## Müssen wir zurück zu Strom aus Kohle?



Kohlenmine Limbourg-Meuse, 1901-1987 [source: wordpress]

## Bereits jetzt ist mehr Kohlendioxid in der Atmosphäre als jemals seit 500000 Jahren

CO2 führt zu Erderwärmung und lässt die Polkappen schmelzen



Carbon Dioxide and Temperatures over last 450 000 years, and melting ice caps [source: C2ES / gws]



- Ein typischer Europäer verbraucht 5 kW
  (1 kW Elektrizität + Transport + Heizung ...)
- Das sind 120 kWh oder 12 Liter Benzin pro Tag
- Ein Hin- und Rückflug nach Los Angeles verbraucht
  I 200 Liter Kerosin pro Person (~I00 Tage)



5 kW: eine große Heizlampe, von der Geburt bis zum Tod angeschaltet.

[MacKay 2009]





5 kW: eine große Heizlampe, von der Geburt bis zum Tod angeschaltet.





5 kW: eine große Heizlampe, von der Geburt bis zum Tod angeschaltet.





5 kW: eine große Heizlampe, von der Geburt bis zum Tod angeschaltet.





5 kW: eine große Heizlampe, von der Geburt bis zum Tod angeschaltet.



5 kW: eine große Heizlampe, von der Geburt bis zum Tod angeschaltet.

 $5 \text{ kW} = 40\ 000 \text{ LEDs}$  am Dortmunder Weihnachtsbaum

## Erneuerbare Energien



Nur **Sonne** und **Wind** haben das Potenzial, unseren gesamten Energiebedarf zu decken:

- Die Sonne strahlt 1.3 kW pro m<sup>2</sup> auf die Erde. Ein Teil davon wird Windenergie.
- Durchschnitt in Deutschland: ca. 0.1 kW per m<sup>2</sup>. Jede
  Person hat 50 m<sup>2</sup> Grund nötig für 5 kW.



- Energiedichte ist relativ gering, schwer zu konzentrieren
- nicht exakt vorherzusagen



## Solarzellen?

#### liefern in Deutschland rund 12 W pro m<sup>2</sup>



es sind ca **400 m<sup>2</sup>** Solarpanele nötig um den Gesamtverbrauch eines Europäers zu decken (20m x 20m)

10 m<sup>2</sup> PV (=1kW) liefert ca 1000 kWh pro Jahr [solarbranche.de]. Ein Jahr hat 8760 Stunden.

## Solarzellen?

#### liefern in Deutschland rund 12 W pro m<sup>2</sup>



es sind ca **400 m<sup>2</sup>** Solarpanele nötig um den Gesamtverbrauch eines Europäers zu decken (20m x 20m)

10 m<sup>2</sup> PV (=1kW) liefert ca 1000 kWh pro Jahr [solarbranche.de]. Ein Jahr hat 8760 Stunden.

## Windenergie ?

#### Eine große 6 MW Turbine liefert rund 1,5 MW, genug für 300 Personen



Thornton Bank

## Windenergie ?

#### Eine große 6 MW Turbine liefert rund 1,5 MW, genug für 300 Personen



#### Windenergie wächst seit 15 Jahren stark



Installed capacity of wind power (318 GW) nearly as large as for nuclear power (370 GW)

## Windenergieproduktion in der Welt

liefert in Deutschland im Jahr bereits soviel Elektrizität wie 6 Kernkraftwerke



53000 GWh  $\approx$  6 x 8760 h x I GW

[source: wikipedia]

## 6% des Stroms in Europa kommt bereits aus Windkraft



EU-27 electricity generation by source 2011

[eurostat]

## Könnten wir Windenergie noch effizienter ernten?

Ein MW benötigt ca 20 000 kg Flügel und 400 000 kg Fundamente



Repower Thornton Bank / Construction of wind turbine foundations in Ostende, Belgium



# HÖHENWINDENERGIE

## Windenergie wächst kubisch mit der Windgeschwindigkeit

Energieinhalt von Luft verschiedener Geschwindigkeiten



Eine verdoppelte Windgeschwindigkeit führt zu 8 mal mehr Leistung

Histogramm der Windgeschwindigkeiten in 100m und 500m Höhe



Wind speed in 100m [hlack] and 500m [grev] in De Rilt (NII) [Fagiano 2009]

## Der höchste Weihnachtsbaum der Welt hat 45m



Histogramm der Windgeschwindigkeiten in 100m und 500m Höhe



Wind speed in 100m [black] and 500m [grev] in De Rilt (NII) [Fagiano 2009]

Histogramm der Windgeschwindigkeiten in 100m und 500m Höhe



Wind speed in 100m [black] and 500m [grev] in De Rilt (NII) [Fagiano 2009]

Histogramm der Windgeschwindigkeiten in 100m und 500m Höhe



Wind speed in 100m [hlack] and 500m [grev] in De Rilt (NII) [Fagiano 2009]

Histogramm der Windgeschwindigkeiten in 100m und 500m Höhe



Wind speed in 100m [black] and 500m [grev] in De Rilt (NII) [Fagiano 2009]

Histogramm der Windgeschwindigkeiten in 100m und 500m



Wind speed in 100m [hlack] and 500m [grev] in De Rilt (NII) [Fagiano 2009]

Histogramm der Windgeschwindigkeiten in 100m und 500m



Wind speed in 100m [hlack] and 500m [grev] in De Rilt (NII) [Fagiano 2009]

Histogramm der Windgeschwindigkeiten in 100m und 500m Höhe



Wind speed in 100m [hlack] and 500m [grev] in De Rilt (NII) [Fagiano 2009]

Histogramm der Windgeschwindigkeiten in 100m und 500m, Höhe



Wind speed in 100m [black] and 500m [grev] in De Rilt (NII) [Fagiano 2009]

Histogramm der Windgeschwindigkeiten in 100m und 500m Höhe



Wind speed in 100m [black] and 500m [grev] in De Rilt (NII) [Fagiano 2009]
### In der Höhe weht stärkerer Wind

Histogramm der Windgeschwindigkeiten in 100m und 500m Höhe



### In der Höhe weht stärkerer Wind

Histogramm der Windgeschwindigkeiten in 100m und 500m Höhe



### In der Höhe weht stärkerer Wind

Histogramm der Windgeschwindigkeiten in 100m und 500m Höhe



Wind speed in 100m [hlack] and 500m [grev] in De Rilt (NII) [Fagiano 2009]

### Leistung: Kraft x Windgeschwindigkeit

"Ohne Kraft gegen den Wind keine Windenergie"











# Eine 500m hohe Turbine ist schwer zu bauen Ein Kabel kann die Kraft sehr effizient aufnehmen

# Eine 500m hohe Turbine ist schwer zu bauen Ein Kabel kann die Kraft sehr effizient aufnehmen

# Eine 500m hohe Turbine ist schwer zu bauen Ein Kabel kann die Kraft sehr effizient aufnehmen

### Metamorphose einer Windturbine





### DER CROSSWIND-EFFEKT und zwei Varianten, damit Energie zu ernten

### Normale Windturbine



Durch die hohe Geschwindigkeit sind die Flügelspitzen der effizienteste Teil des Rotors

### Normale Windturbine



Durch die hohe Geschwindigkeit sind die Flügelspitzen der effizienteste Teil des Rotors

Können wir eine Turbine nur aus Flügelspitzen und Generator bauen?

### Der Crosswind-Effekt



- Wind lässt Drachen schnelle Loopings fliegen
- Drachen fliegt quer zum Wind
- starke Zugkraft in der Leine: Kraft wächst quadratisch mit der Drachengeschwindigkeit

Aber wohin soll der Generator?

("Drachen" = fliegendes Objekt an einer Leine)

### Variante I: Drag Modus (Turbine an Bord)



- effektiver Wind treibt kleine Windturbine an Bord des Drachens an
- Strom wird durch Kabel zum Grund geleitet

Vorteil: kleiner schnelldrehender Generator Nachteil: Kabel muss Hochspannung leiten

### Variante 2: Lift Modus (Generator am Boden)



Pumpzyklus mit zwei Phasen:

- Produktionsphase:
  - Drachen fliegt schnell, hohe Zugkraft
  - Leine wird von Trommel abgerollt
  - Generator produziert Elektrizität

### Variante 2: Lift Modus (Generator am Boden)



Pumpzyklus mit zwei Phasen:

- Produktionsphase:
  - Drachen fliegt schnell, hohe Zugkraft
  - Leine wird von Trommel abgerollt
  - Generator produziert Elektrizität
- Rückholphase:
  - Drachen fliegt langsam, geringe Zugkraft
  - Leine wird wieder aufgerollt

Vorteil: elektrische Maschine am Boden Nachteil: langsam drehender, schwerer Generator

## Illustration des Pumpzyklus (Lift Modus)



[AmpyxPower]

# Illustration des Pumpzyklus (Lift Modus)



Welche Abrollgeschwindigkeit ist optimal? Zu langsam: Generator dreht zu wenig. Zu schnell: Drachen ''sieht'' weniger Wind, zu wenig Kraft.

[AmpyxPower]

### Welche Abrollgeschwindigkeit ist optimal?

Maximale Leistung wird bei 1/3 der Windgeschwindigkeit erreicht

Bemerkung: Drachen fliegt viel schneller quer zum Wind, abhängig von seiner aerodynamischen Effizienz. Je schneller, desto höher die Kraft.



### Welche Abrollgeschwindigkeit ist optimal?

Maximale Leistung wird bei 1/3 der Windgeschwindigkeit erreicht



Bemerkung: Drachen fliegt viel schneller quer zum Wind, abhängig von seiner aerodynamischen Effizienz. Je schneller, desto höher die Kraft.

### Die Formel von Miles Loyd

J. ENERGY

VOL. 4, NO. 3 ARTICLE NO. 80-4075

### **Crosswind Kite Power**

Miles L. Loyd\* Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, Calif.

 $P = \frac{2}{27} \rho A w^3 C_{\rm L} \left(\frac{C_{\rm L}}{C_{\rm D}}\right)$ 

Auftriebs-Widerstands-Verhältnis (L/D

Luftdichte  $\rho$ 

Drachenfläche A

Windgeschw. w



Flügelfläche von **I m<sup>2</sup>** produziert Leistung von **40 kW** (bei Wind von 13 m/s und L/D Verhältnis von 15). Dieselbe Effizienz für Lift und Drag Modus.



# Wieviel sind 40 kW pro $m^2$ ?

Ein Quadratmeter Flügel liefert mehr Elektrizität als 400 m<sup>2</sup> Solarzellen



Eine realistische Schätzung ist, dass der Flügel nur 25% des Jahres diese Leistung erbringt, im Mittel also 10 kW pro m<sup>2</sup>. Zwei Personen benötigen 1m<sup>2</sup>. Flügelfläche, um ihren Gesamtenergieverbrauch zu decken.



[solar cells / master students Wouter Vandermeulen and Jeroen Stuyts]

### AIRBORNE ENERGY 2011 CONFERENCE

### Flugwindenergiekonferenz 2011 in Leuven

₩

### Flugwindenergiekonferenz letzten September in Berlin AIRBORNE 2013

WIND ENERGY



## VERSCHIEDENE HÖHENWINDENERGIE KONZEPTE







2002

### Kategorisierung der Crosswind Konzepte



## Kategorisierung der Crosswind Konzepte

	bodenbasierter Generator	fliegender Generator
Starrflügler		the second secon
Gleitschirm		(nicht effizient)

### Ampyx Power: Starrflügler mit bodenbasiertem Generator



### Ampyx Power



- Startup der TU Delft, seit 2008
- 18 Mitarbeiter (zwei Freiburger Doktoranden)
- finanziert durch Risikokapital



Pumpzyklus mit Starrflügler

## Das ''Power Plane'' ist voll mit Mikrosystemtechnik



GPS, Accelerometer, Magnetometer, Pitotrohr, CPU, Batterie, ...

### Ampyx Power: Flugexperimente (mit mitfliegender Kamera)



50 minutes autonomous flight Complete video from the on-board camera November 2012

### Ampyx Power: Flugexperimente (aus Sicht der Bodenstation)



Autonomous pattern flying View from the anchor point November 2012

## AmpyxPower hat in Experimenten bereits 6 kW Leistung pro m<sup>2</sup> Flügelfläche geerntet



The Ampyx Power Plane has 3 m<sup>2</sup> surface area and delivers up to 18 kW,
6 kW per m<sup>2</sup>. This is still much less than the 40 kW per m<sup>2</sup>, mostly due to cable drag, which is less relevant for larger scale systems.

[Ruiterkamp, Sieberling 2013]
### SkySails: Gleitschirme mit bodenbasiertem Generator





- Startup seit 2001
- ~30 Mitarbeiter
- entwickelt Zugdrachen für Schiffe
- seit 2011 auch für Elektrizitätsgewinnung
- finanziert durch Reeder, Investoren, Fördergelder



Konzept: Zugdrachen für Schiffe, oder für Elektrizitätsgewinnung durch Pumpzyklus

# SkySails: Gleitschirme mit bodenbasiertem Generator



# SkySails: Gleitschirme mit bodenbasiertem Generator



# Einladung zu SkySails Vortrag am 20. Januar um 8:15 Uhr hier im Hörsaal

SkySails Tethered Kites for Ship Propulsion and Power Generation: Modelling and System Identification

> Dr. Michael Erhard, SkySails GmbH, Hamburg

Tuesday, January 20, 2015, 8:15-10:00, University of Freiburg, HS 00-026, Georges-Köhler-Allee 101, D-79110 Freiburg





Small–Scale Functional Model (50kW peak power)

### Makani Power: Starrflügler mit Generatoren an Bord



### Makani Power



- Kalifornisches Startup seit 2006
- ~40 Mitarbeiter
- starre Flügel mit Generatoren an Bord
- 2013 von Google X gekauft



#### Makani Power



#### Makani Power (hat 3 kW/m<sup>2</sup> Durchschnittsleistung bei Wind von 6 m/s erreicht)



# Makani Power: Turbinen an Bord, Start und Landung als Quadkopter







#### Solarimpulse + Crosswind = ?

Preisfrage (Teil I): Wieviel mehr Energie im Jahr würde ein Makani-Solarflugzeug liefern ?

50 % 10% 5% 0.5%

# DASTEAM IN FREIBURG UND LEUVEN

**European Research Council** 



# ERC Projekt HIGHWIND

- HIGHW
- Europäisches Projekt von 2011-2016
- 4 Doktoranden, ein Ingenieur, und 6 Hiwis
- Modellierung, Simulation, und Optimierung
- kleines Testkarussel für Starrflügler
- seit 2014 in Freiburg und Leuven



Unser Zugpferd Nr I: Differentialgleichungsmodelle für angeleinte Flugzeuge

Unsere weiteren Zugpferde: Softwarepakete für eingebettete Optimierung und Optimale Steuerung

unter industriefreundlicher open source Lizenz (LGPL)

- **qpOASES:** dense quadratic programming [Joachim Ferreau, ...]
- **qpDUNES:** sparse quadratic programming [Janick Frasch, ...]
- ACADO: nonlinear MPC [Boris Houska, Joachim Ferreau, Milan Vukov, Rien Quirynen, Robin Verscheuren, ...]
- **CasADi:** modelling environment for dynamic optimization [Joel Andersson, Joris Gillis, Greg Horn, ...]

# Beispiel I: Orbitoptimierung für Ampyx-Flugzeug

Optimierung des Pumpzyklus für maximale Leistung [Greg Horn] [Gianni Licitra,]

w0: 10.0 iter: 1 endTime: 25.3343874701 average power: 540.342156108 W

A BEBEE

# Beispiel 2: Optimierungsstudien für zukünftige Flugzeuge im Tandemflug



Durch Tandemflug wird der Luftwiderstand der Leinen signifikant gesenkt und die Effizienz gesteigert

#### Beispiel 3: Rotations-Start Experimente

Greg Horn]

[Kurt Geebelen, Andrew Wagner, Milan Vukov, Mario Zanon, Sebastien Gros,



# Laborexperimente mit prädiktiver Flugregelung

[mit Kurt Geebelen, Andrew Wagner, Milan Vukov, Mario Zanon, Sebastien Gros, Greg Horn, Jan Swevers]



91

Regelungs-Experimente in Leuven (Belgien), bald ähnlich in Freiburg

# Closed loop experiments with NMPC & NMHE







#### Höhenwindenergieteams in der Welt



[source: R. Schmehl, TU Delft]

### 17 Teams vereint im AWESCO EU Netzwerk

I 2 offene Doktorandenstellen in Freiburg, Delft, Leuven, Chalmers, ETHZ, EPFL, TUMünchen, Limerick, AmpyxPower, Xsens, EnerKite, SkySails.



# Be part of it Apply for a PHD to help push renewable energy to a new level

#### Herausforderungen für die Zukunft

- intelligente Mechanismen für Start und Landung
- automatische Regelung des fliegenden Systems unter allen Wind- und Wetterbedingungen
- Flügel, die leicht, langlebig, und nicht zu teuer sind
- Leinen, die viele Lastzyklen überleben (oder Hochspannungskabel, die dünn, leicht und zugstark sind)

## Der Weihnachtsmann im Freiburger Flugkarussel

gefilmt von Jonas Koenemann, Thorbjörn Jörger, Ernesto Denicia, und Lukas Klar



#### Herzlichen Dank für die gute Zusammenarbeit an:

Milan Vukov, Mario Zanon, Greg Horn, Rien Quirynen, Kurt Gerald Jan Swevers, Andrew Wagner, Sebastien Gros, Reinhart Paelinck, Hammad Ahmad, Jeroen Stuyts, Mathias Clinckemaillie, Jonas Koenemann, Gianni Licitra, Thorbjörn Jörger, Lukas Klan Ben Schleusener, Fabian Girrbach, Julian Reimer, Somu Gosw Elias Rosch, Thilo Bronnenmeyer

> und den Weihnachtsmann!

Frohes Fest!

Preisfrage:

# WIE OFT WAR DER WEIHNACHTSMANN AUF DEN FOLIEN ZU SEHEN ?



Preisgeschenk:

Hardcover Buch "Airborne Wind Energy" Springer (EUR 181,89)

#### Das Karussel beim Wasserflaschenschleudern



# Andere Konzepte



Skywindpower

Altaeros Energies

Magenn



# Simulation von Rotationstart und Übergang in Energieorbit [G. Horn]



#### Vision: ersetze Tonnen von Stahl und Beton...



Vision: ersetze Tonnen von Stahl und Beton... ...durch ein Kabel und intelligente Regelung



# Kategorisierung der Crosswind Konzepte

	bodenbasierter Generator	fliegender Generator
Starrflügler	<b>AmpyxPower (NL),</b> Univ. Freiburg (D)	Makani power (US)
Gleitschirm	<b>SkySails (D),</b> TU Delft (NL), Enerkite (D), NTS (D), KITEnergy (IT), Swiss Kite Power (CH)	(nicht effizient)

# Windenergie ?

#### Eine große 6 MW Turbine liefert rund 1,5 MW, genug für 300 Personen



Thornton Bank