



# Wind auf verschiedenen Skalen: global bis lokal

*Mag. Johanna Nemec und DI Ivonne Anders*



**ZAMG**  
Zentralanstalt für  
Meteorologie und  
Geodynamik

# Überblick



02.04.2014  
Folie 2

- Globale Zirkulation: Passatwinde, Westwindzone, polare Ostwinde
- Jetstream (Hoch und Tiefdruckgebiete)
  
- Land-See-Wind System
- Berg- und Talwind-Zirkulation
  
- Wind in bebautem Gebiet: Wirbelbildung, Kanalisierung



global

lokal

---

- Wie wird Wind gemessen?
- Welche Bedeutung hat Wind für uns?
  
- Stürme und Sturmschäden
- Stürme in Europa im Klimawandel
  
- Belastung von Bäumen durch Wind, Windschäden an Bäumen

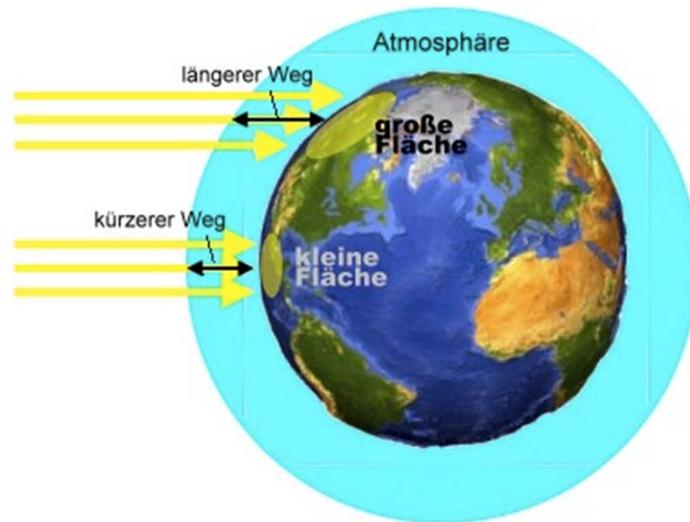
# Das globale Klimasystem – die allgemeine Zirkulation



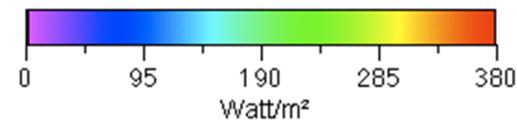
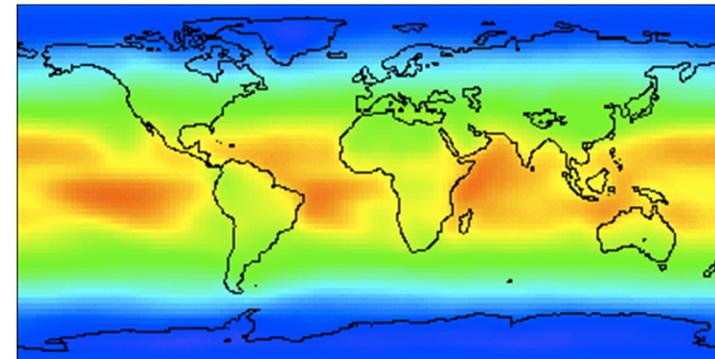
02.04.2014  
Folie 3

## Der wichtigste Antrieb für unser Klimasystem ist die Sonne

→ Es trifft nicht auf alle Teile der Erde gleich viel Strahlung:



Schnee und Eis reflektiert einen großen Teil der Strahlung



Wasser absorbiert sehr viel Strahlung

### Geographische Gründe:

**Polargebiete:** flacher Einfallswinkel, langer Weg durch die Atmosphäre, große angestrahlte Fläche

**Äquator:** steiler Einfallswinkel, kurzer Weg durch die Atmosphäre, kleine angestrahlte Fläche

Die Abbildung zeigt die von der Erdoberfläche absorbierte Strahlung.

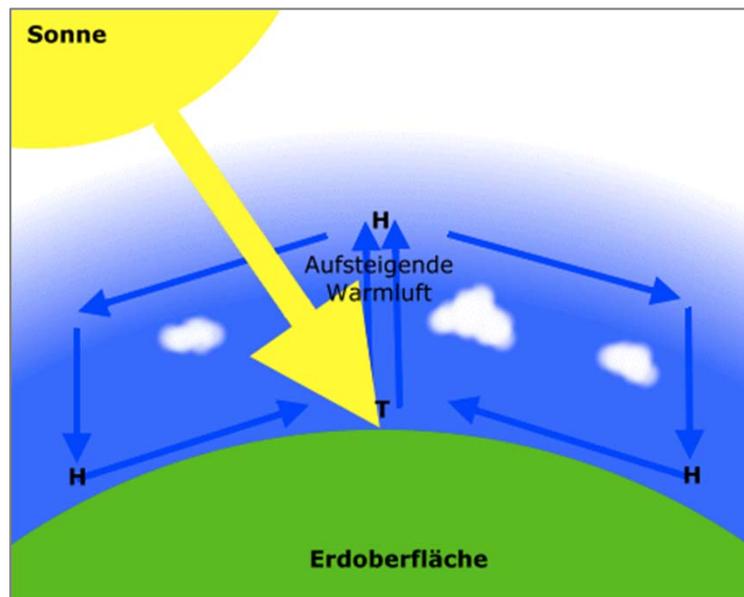
# Das globale Klimasystem – die allgemeine Zirkulation



Große regionale Unterschiede bei der einfallenden **Sonnenstrahlung**, führen zu großen **Temperaturunterschieden**, welche einen Ausgleich suchen.

02.04.2014  
Folie 4

→ **Antrieb für die globale Zirkulation:**



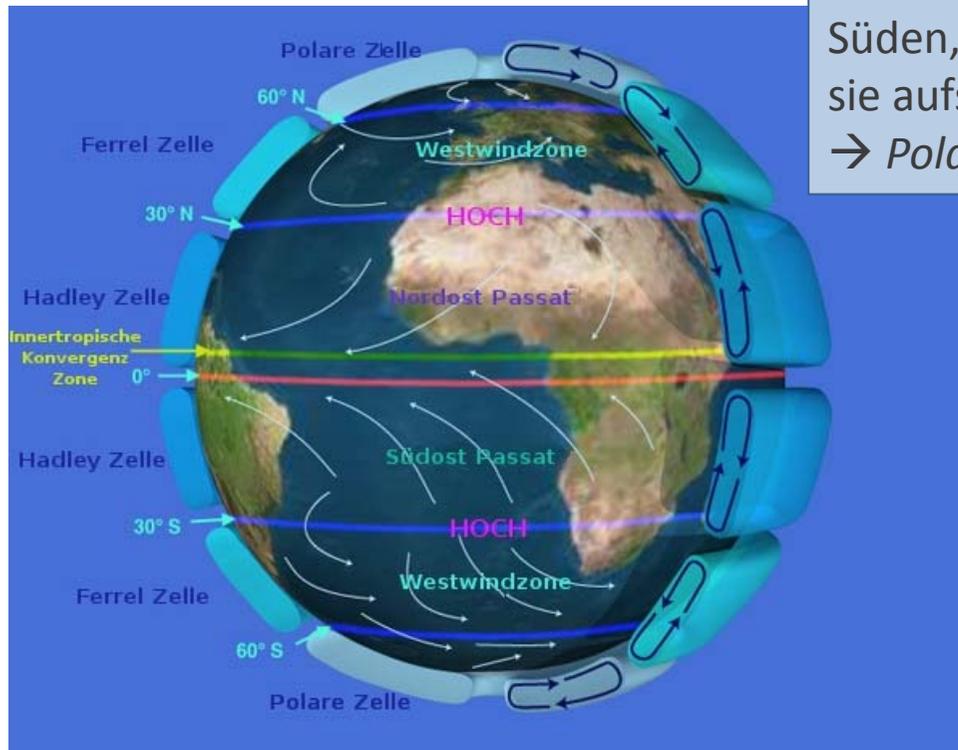
Schematische Darstellung der Entstehung Hadley Zelle

- Stark erwärmte Luft am Äquator steigt auf
- Es entsteht ein Unterdruck (*innertropische Konvergenzzone/ äquatoriale Tiefdruckrinne*).
- Luft strömt aus Norden und Süden nach.
- Die aufsteigende Luft steht an der Tropopause an und fließt weiter Richtung Norden oder Süden bis sie so weit abgekühlt ist dass sie wieder absinkt.
- Es bildet sich eine stetige Zirkulation aus.

# Das globale Klimasystem – die allgemeine Zirkulation



02.04.2014  
Folie 5



**Polare Zelle** ist das Gegenstück zur Hadley Zelle: Kalte Luft mit hoher Dichte sinkt über den Polen ab und drängt nach Süden, bis sie soweit erwärmt ist, dass sie aufsteigt.

→ *Polare Hochdruckgebiete*

## Passatwinde:

- Luftströmungen der Hadley Zelle an der Erdoberfläche
- Durch die Erdrotation werden die Winde nach rechts abgelenkt
  - Südhalbkugel: Südostpassat
  - Nordhalbkugel: Nordostpassat

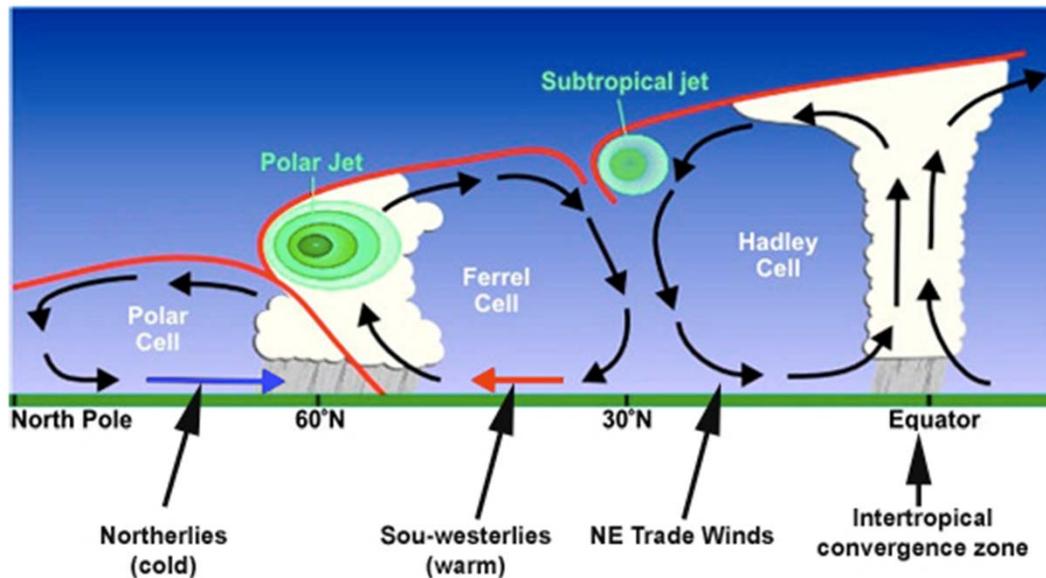
Das polare Äquivalent sind die polaren Ostwinde (viel schwächer).

# Ferrel Zelle – Westwindzone



Zwischen Polar- und Hadleyzelle entsteht eine gegenläufige Bewegung, die **Ferrel Zelle** (ähnlich dem ineinandergreifen eines Zahnrades)

02.04.2014  
Folie 6



- Bodennaher Wärmetransport vom Äquator Richtung Pol
- auf Grund der Erdrotation werden diese Strömungen abgelenkt, es entsteht eine Westströmung (**Westwindzone**)
- unbeständiger als Hadley und Polar Zelle

# Jetstream/ Strahlstrom



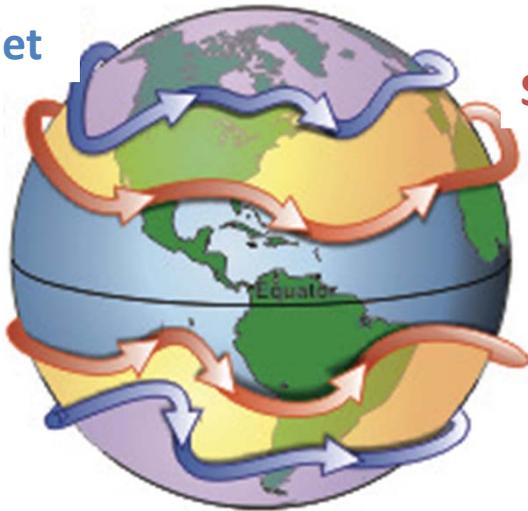
Feuchtwarmen Westwinde (Ferrel Zelle) treffen auf kalte polare Ostwinde (Polarzelle) treffen aufeinander. An der Luftmassengrenze entsteht sie sogenannten **Polarfront**.

02.04.2014  
Folie 7

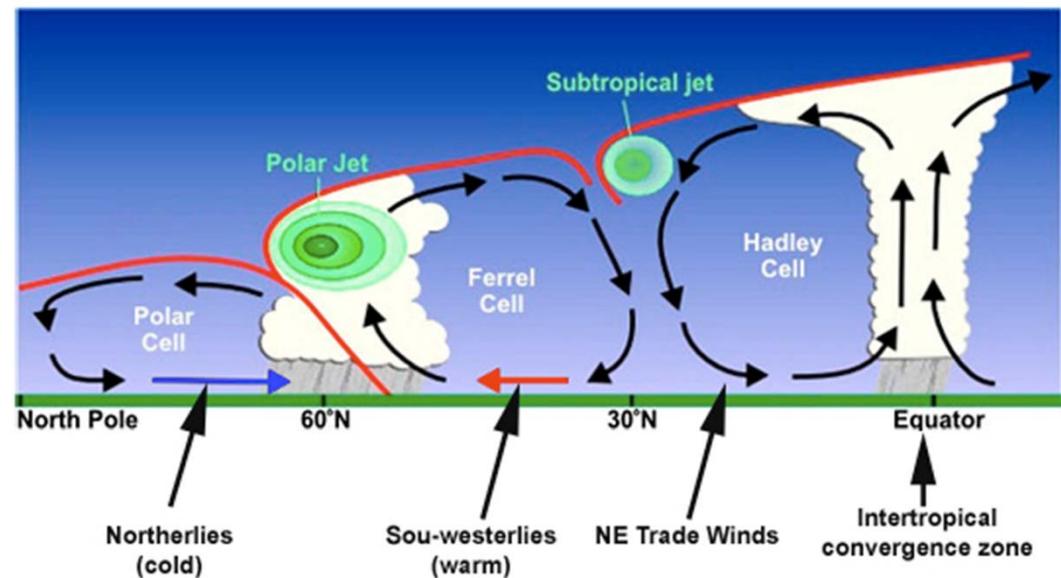
In der Höhe entstehen auf Grund des starken Temperaturgradienten und der fehlenden Reibung sehr hohe Windgeschwindigkeiten (bis zu 400km/h):

**Jetstream** oder **Strahlstrom**

## Polarjet



## Subtropenjet

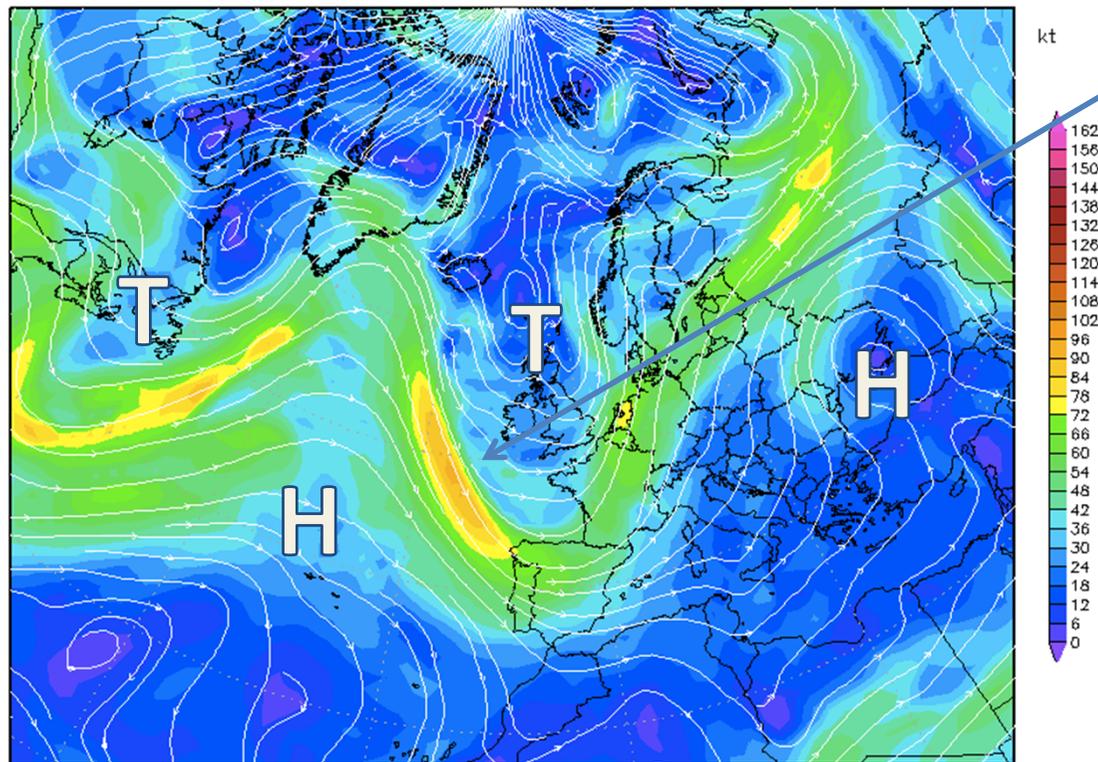


# Polarjet – Hoch und Tiefdruckgebiete



02.04.2014  
Folie 8

Init : Sat,22MAR2014 06Z Valid: Sat,22MAR2014 12Z  
*500 hPa Stromlinien und Windgeschwindigkeit (kt)*



**Polarjet:** trennt die kalten, polaren Luftmassen von den gemäßigten südlichen Luftmassen (max. 180 km/h)

Polarjet ist kein geradliniger Strom; er verweilt sich auf Grund von großen **Gebirgszügen** und der **Land-See-Verteilung**

→ So können sich Hoch und Tiefdruckgebiete ausbilden, welche unser Wetter bestimmen.

Daten: GFS-Modell des amerikanischen Wetterdienstes  
(C) Wetterzentrale  
[www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de)



02.04.2014  
Folie 9

# Lokale Skala

*Land-See-Wind System*

*Berg- und Talwind-Zirkulation*

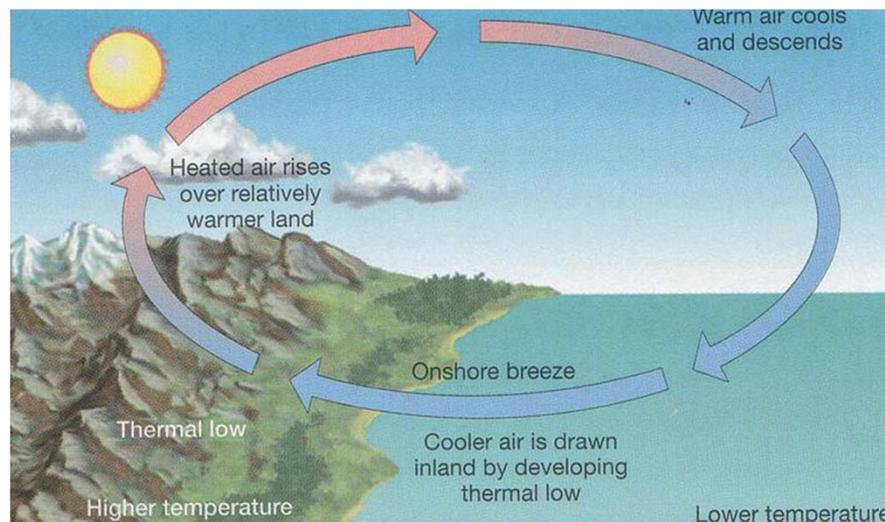
*Wind in bebautem Gebiet*

# Land-See-Wind System



Die Land-See-Wind-Zirkulation ist ein tagesperiodisches **lokales Windsystem**, welches sich an den **Meeresküsten** oder an den Ufern größerer Binnenseen bei **Schönwetterlagen** (viel Sonnenschein und eine ruhige Großwetterlage) entwickelt.

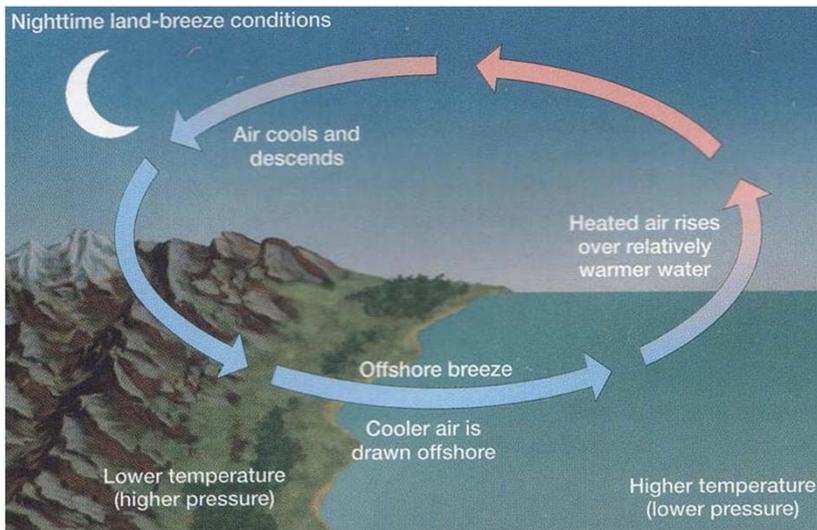
02.04.2014  
Folie 10



- Wasser und Landoberfläche heizen sich auf Grund ihrer unterschiedliche spezifischen Wärmekapazität unterschiedliche stark auf.
- Es entsteht ein Temperatur-unterschied und damit ein Druck-unterschied.
- Die aufgeheizte Luft über dem Land beginnt einige Stunden nach Sonnenaufgang aufzusteigen.
- Kühlere Luft strömt vom Wasser nach und es bildet sich eine Zirkulation aus (ähnliches System wie bei der Hadley Zelle)

# Land-See-Wind System

02.04.2014  
Folie 11



- In der Nacht dreht sich die Zirkulation um!
- Die Landoberfläche kühlt schneller aus als die Wasseroberfläche. Grund dafür ist wiederum die unterschiedliche spezifische Wärmekapazität.
- Kühlere/ dichtere Luft über dem Land beginnt abzusinken und strömt Richtung Wasser
- Dort steigt die wärmere Luft wieder auf schließt die Zirkulation.

# Berg- und Talwind-Zirkulation



Die **Berg- und Talwind-Zirkulation** ist ein im Gebirge an Schönwettertagen auftretendes tagesperiodisches Windsystem.

02.04.2014  
Folie 12

→ ähnlich der Land-See-Windzirkulation, nur auf Grund von **Überlagerungen von Talwinden und Hangwinden** wesentlich komplexer.

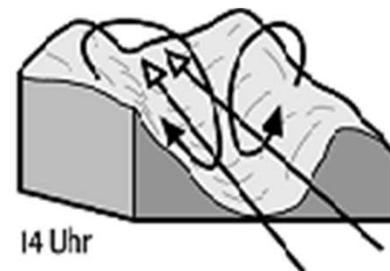
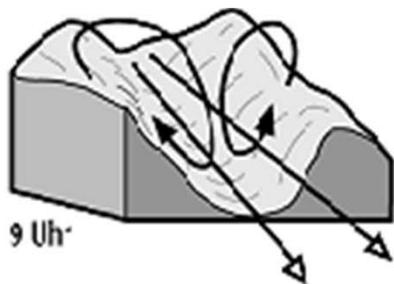
## Typischer Tagesverlauf (1):

**9 Uhr:** Nächtlicher Bergwind ist noch aktiv, Hangaufwinde bedingt durch stärkerer Aufheizen der Berghänge gegenüber dem Tag beginnen schon zu wehen.

**10 Uhr:** Hangaufwind ist dominant

**14 Uhr:** Hangaufwind wird vom stärkeren Talwind (Gebirge heizt sich stärker auf als Vorland) überlagert

**18 Uhr:** Hangwinde schlafen auf Grund fehlender Strahlung ein, nur noch Talwind





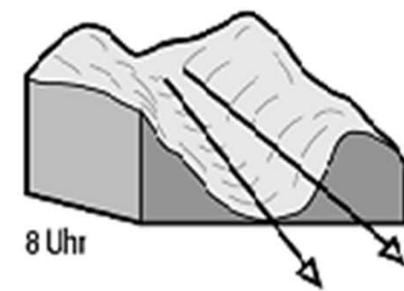
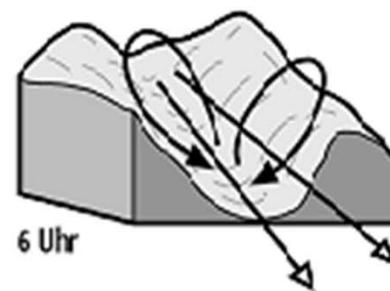
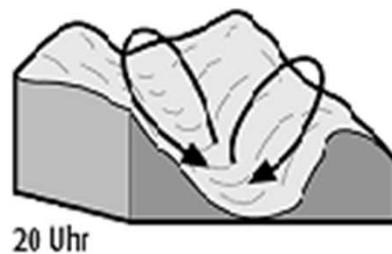
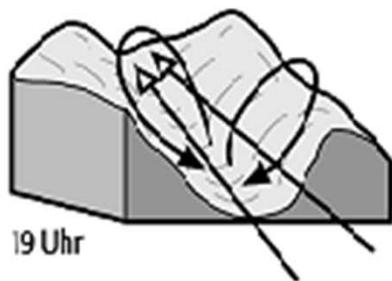
## Typischer Tagesverlauf (2):

**19 Uhr:** Hangabwinde setzen, auf Grund von schnellerer Abkühlung der Berghänge im Vergleich zum Tal, ein. Es weht noch ein beständiger Talwind.

**20 Uhr:** Tal wind schläft ein. Hangabwinde dominieren.

**6 Uhr:** Während der Nacht beginnt (umgekehrt wie untermags) ein stärkerer Bergwind.

**8 Uhr:** Die Hangwinde schlafen mit Sonnenaufgang ein; der Bergwind bleibt aber noch einige Stunden erhalten.



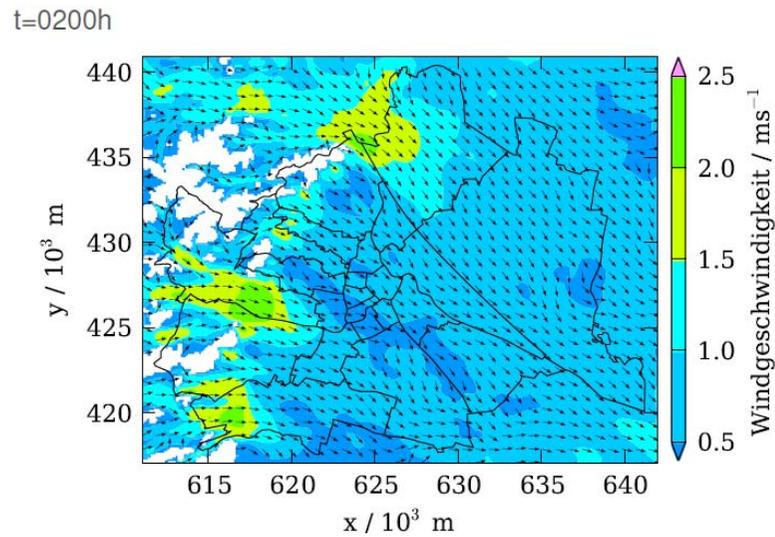
→ Dieses idealisierte Bild zeigt die prinzipiellen Entstehungsmechanismen, kann allerdings auf reale Landschaften nicht ohne Einschränkungen übertragen werden.

# Nächtliches Abfließen von Kaltluft - WIEN

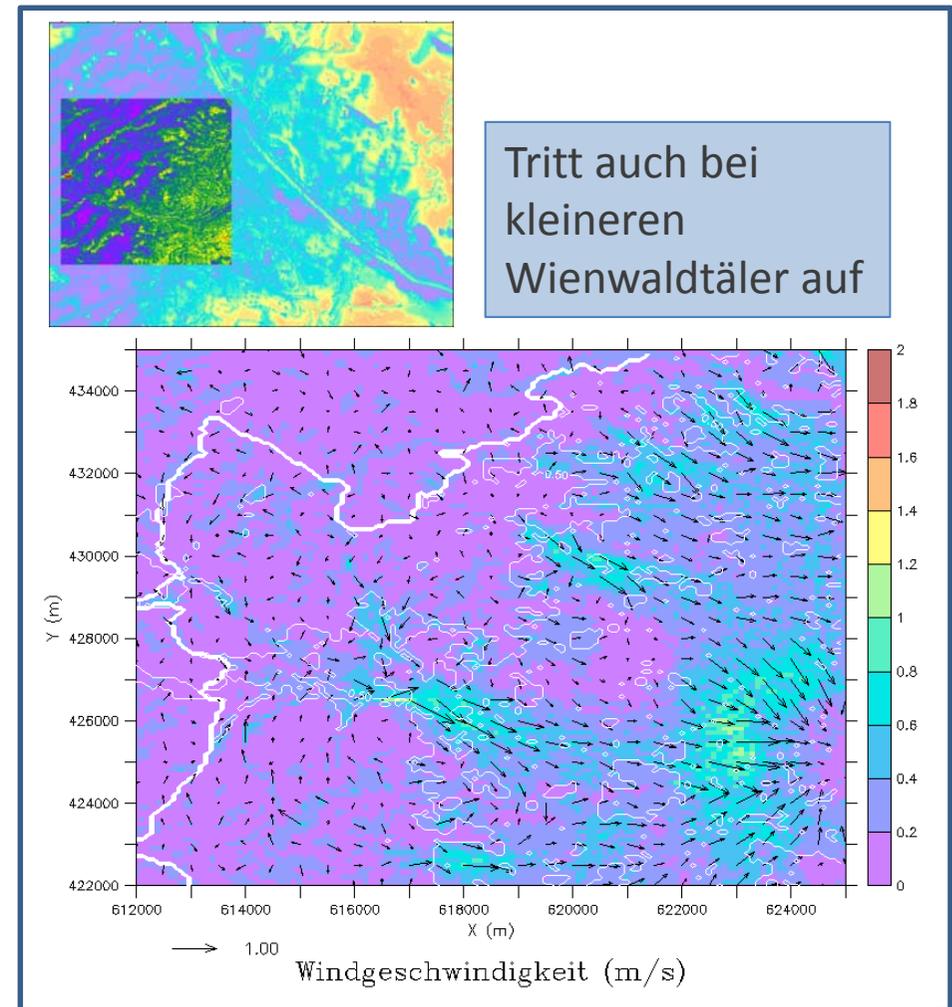


02.04.2014  
Folie 14

- Nächtliches Abfließen der Kaltluft aus dem Wienerwald
- Kanalisierung der Strömung durch Topographie (z.B. Wiental und Donau)



Weiss: Topographie  $\geq 399.5 \text{ m}$   
topographisch bedingte Kanalisierung der Strömung

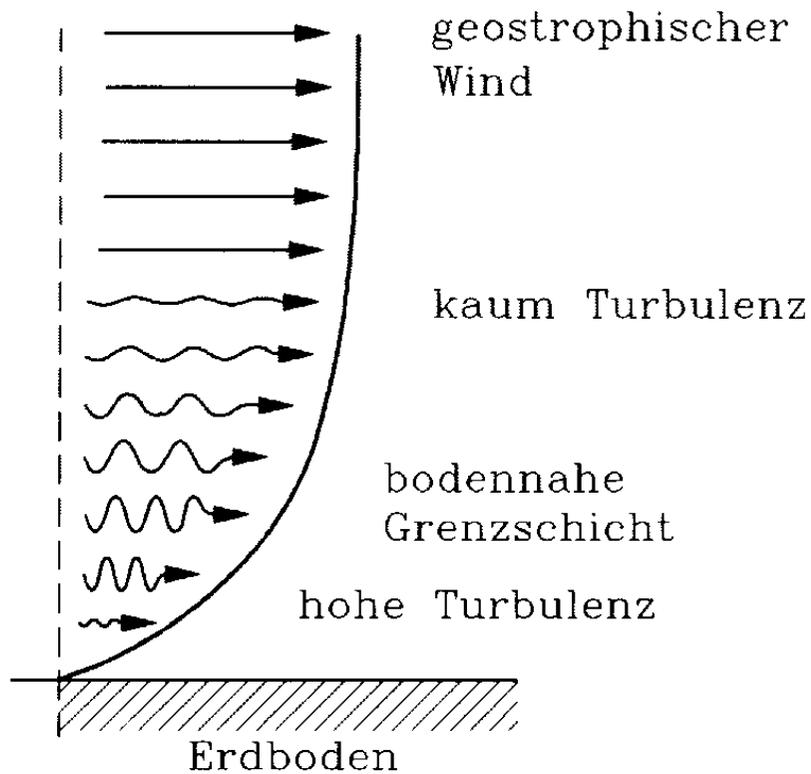


# Wind in verschiedenen Höhen über dem Boden



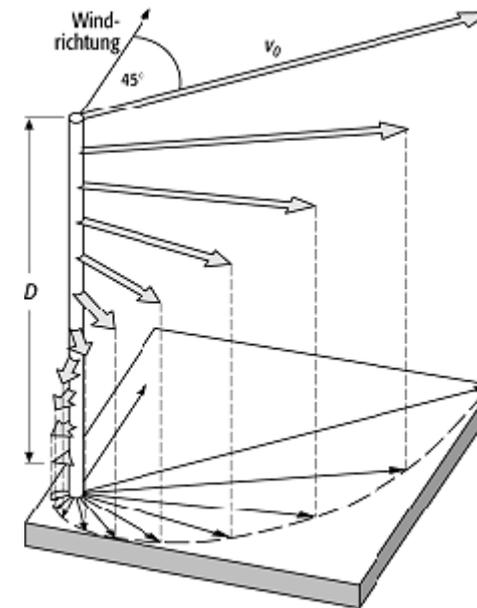
## Vertikales Windprofil

- Bodennah ist die Windgeschwindigkeit Null
- Windgeschwindigkeit nimmt mit zunehmender Höhe zu



## Ekman-Spirale

- Mit zunehmender Höhe ändert sich die Windrichtung hin zu der des geostrophischen Windes



02.04.2014  
Folie 15

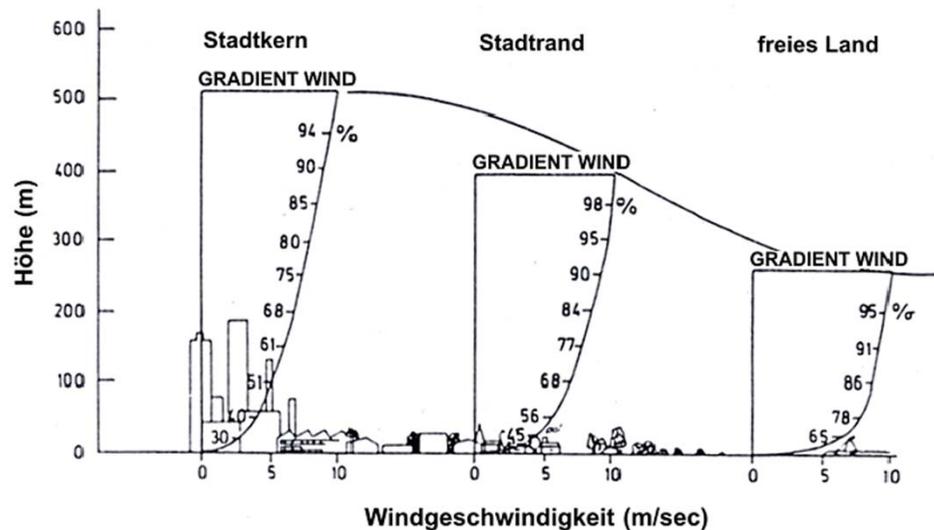
# Wind im Stadtgebiet



In einem bebauten Stadt können sich die Windverhältnisse sowohl hinsichtlich der **Windrichtung** als auch bezüglich der **Windgeschwindigkeit** stark ändern:

02.04.2014  
Folie 16

(1) Die größere Oberfläche und Rauigkeit einer städtischen Bebauung bewirkt durch die erhöhte Reibung eine Verminderung der Windgeschwindigkeit. Sie kann im Jahresmittel bis zu 30 % niedriger sein. Insbesondere nimmt die Häufigkeit von Windstillen um bis zu 20 % zu.

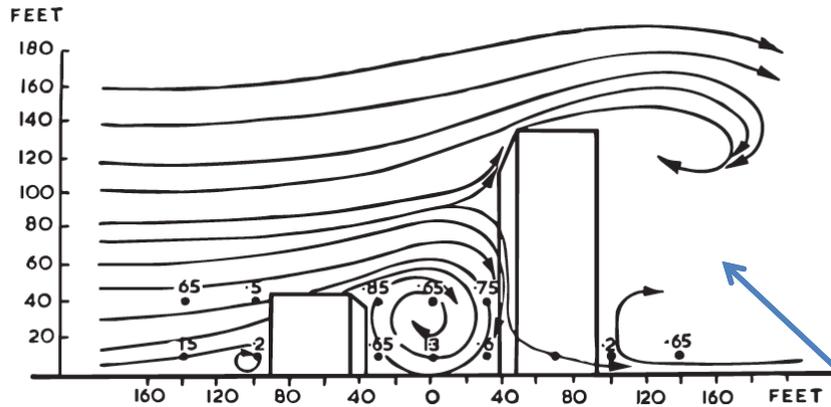


Das vertikale Windprofile über der Innenstadt, dem Stadtrand und dem Freiland unterscheiden sich stark. Neben der Abnahme der Windgeschwindigkeit zum Stadtzentrum hin erkennt man auch die im Stadtkern höher reichende Störung des Windfeldes.

# Windverwirbelung



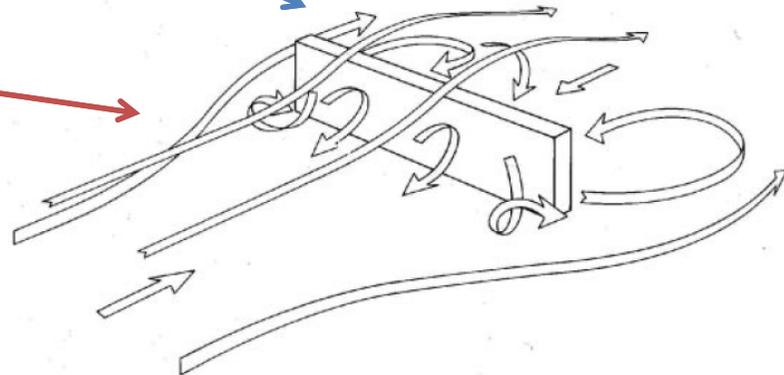
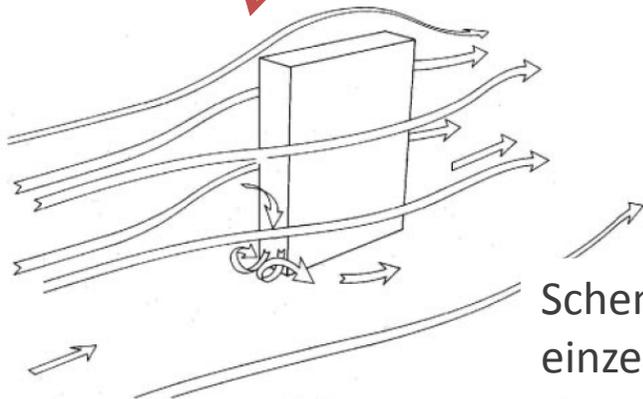
02.04.2014  
Folie 17



Ergebnisse von Windtunnelexperimente:  
Pfeile zeigen die Windrichtung, Werte geben das Verhältnis von gemessener und fiktiver (ohne Gebäude) Windgeschwindigkeit an. (B. Blocken and J. Carmeliet, 2003)

Nachwirbel

Frontwirbel

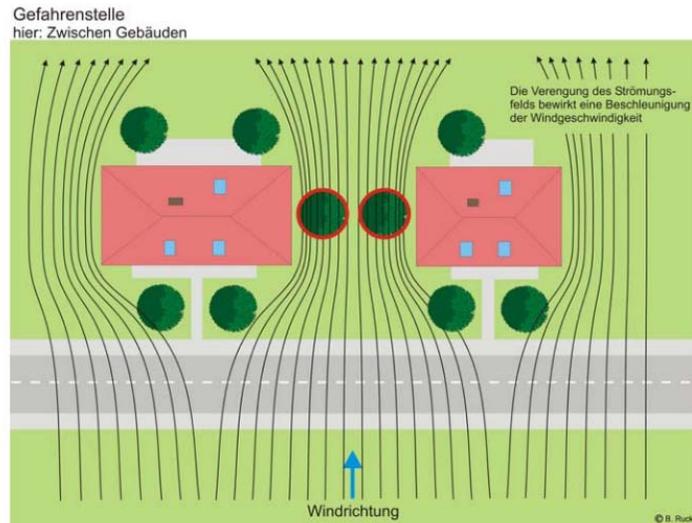
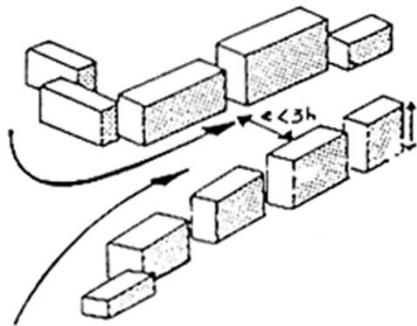


Schematische Darstellung der Windverwirbelung an einzelnen Gebäuden

# Windkanalisierung

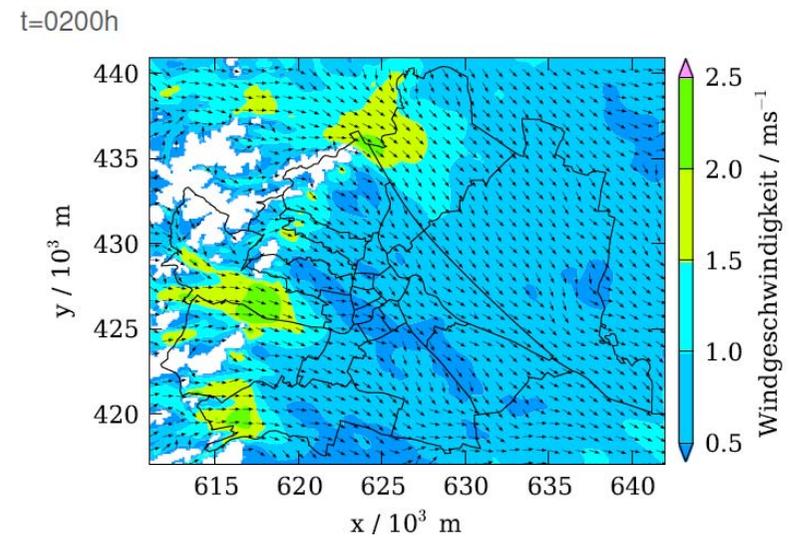


(1) durch Gebäude und Bepflanzung



(2) Durch Topographie

02.04.2014  
Folie 18



Weiss: Topographie  $\geq 399.5 \text{ m}$   
topographisch bedingte Kanalisierung der Strömung

# Wie wird Wind gemessen?

02.04.2014



**Bodennahe Windmessungen** werden in der Regel auf der **Höhe von 10 m über dem Grund** durchgeführt. Wichtig ist dabei, dass das Windfeld um das Gerät herum nicht gestört ist. Nahe stehende Häuser oder Bäume können die Messungen stark verfälschen. Das Gerät könnte so im Windschatten eines Hauses stehen und viel geringere Windstärken messen, als sie in der Tat sind. Als Faustregel gilt: im Umkreis von  $f$  Metern (dabei ist  $f = \text{Höhe des Gerätes} \times 10$ ) um das Gerät herum soll die Umgebung frei von größeren Gegenständen sein.

**Anemometer**



**Windfahnen**



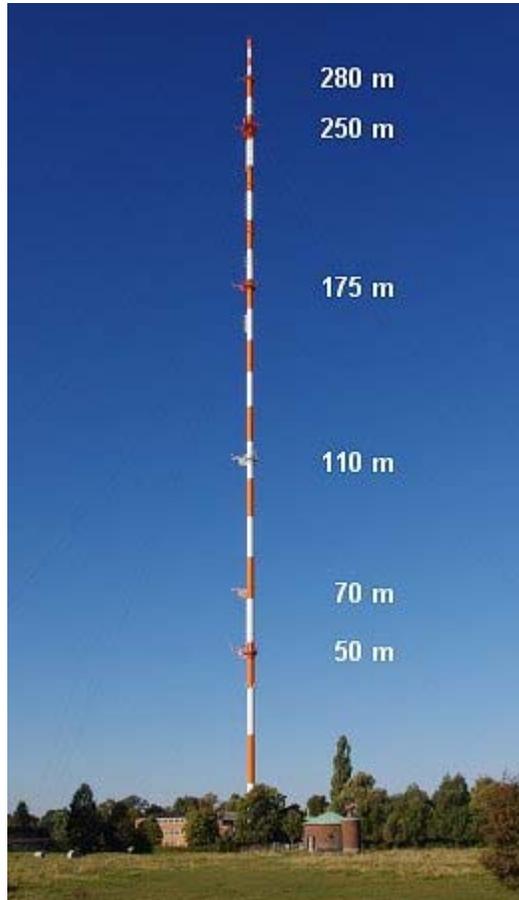
**Staurohr**



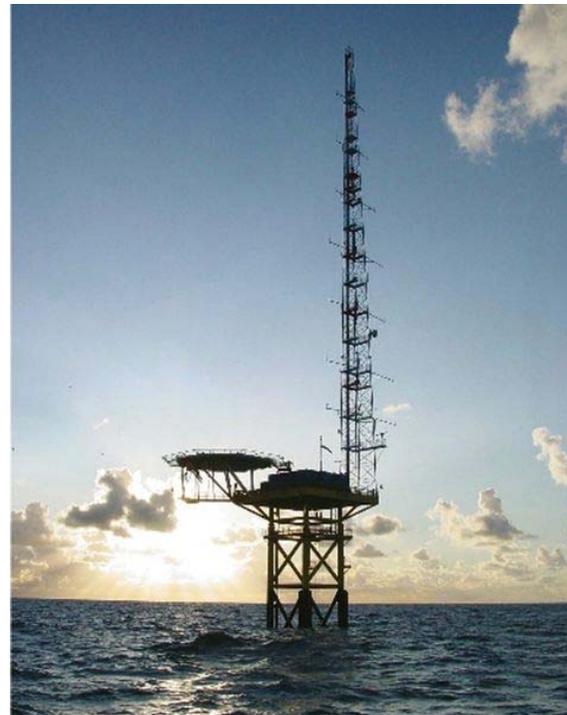
# Wie wird Wind gemessen?

02.04.2014  
Folie 20

Windmessungen **in großen Höhen** werden anhand von Radiosonden, Radaranlagen, Satelliten etc. durchgeführt.



*Wettermast Hamburg*



*FINO-I Plattform, Belgien*



*Radiosonde*

# Einheiten und Klassifikation des Windes



## Einheiten

- m/s, km/h, Beaufort, Knoten ...

02.04.2014

## Klassifikation

Stärke in Bft.	Bezeichnung Windstärke	km/h	kn	m/s	mph
0	Windstille	0 - <1	0 - <1	0 - 0,2	0 - 1,1
1	leiser Zug	1 - 5	1 - 3	0,3 - 1,5	1,2 - 4,5
2	leichte Brise	6 - 11	4 - 6	1,6 - 3,3	4,6 - 8,0
3	schwacher Wind	12 - 19	7 - 10	3,4 - 5,4	8,1 - 12,6
4	mäßiger Wind	20 - 28	11 - 15	5,5 - 7,9	12,7 - 18,3
5	frischer Wind	29 - 38	16 - 21	8,0 - 10,7	18,4 - 25,2
6	starker Wind	39 - 49	22 - 27	10,8 - 13,8	25,3 - 32,1
7	stetiger Wind	50 - 61	28 - 33	13,9 - 17,1	32,2 - 39,0
8	stürmischer Wind	62 - 74	34 - 40	17,2 - 20,7	39,1 - 47,1
9	Sturm	75 - 88	41 - 47	20,8 - 24,4	47,2 - 55,1
10	schwerer Sturm	89 - 102	48 - 55	24,5 - 28,4	55,2 - 64,3
11	orkanartiger Sturm	103 - 117	56 - 63	28,5 - 32,6	64,4 - 73,5
12	Orkan	ab 118	ab 64	ab 32,7	ab 73,6

© Meteomedia

# Welche Bedeutung hat für uns Wind?

02.04.2014

- Durchlüftung von Städten
- Stofftransport (Pollen, Vulkane, Staub, Sand, .. )
- Energiegewinnung
- Schäden durch Stürme
- Tourismus
- Verkehr (Flugverkehr, Bahnverkehr ..)
- Sturmfluten, Stauungen, Riesenwellen, ..



# Stürme und Sturmschäden?

02.04.2014

Stürme – auch im Europäischen Alpenraum - haben ein beträchtliches Schadenspotential. Infrastruktur wie Gebäude, das Stromnetz, die Bahn, usw. müssen gegebene Windlasten mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit überdauern können. Auch in der Forstwirtschaft ist die Sturmtätigkeit von zentraler Bedeutung. Den genannten Geschäftsfeldern ist gemein, dass sie für einige Dekaden im voraus geplant werden müssen. Daher ist es interessant, mögliche Entwicklungen im Sturmklima abzuschätzen und daraus Handlungsanleitungen/-empfehlungen abzuleiten.



# Stürme und Sturmschäden?



## Welche Phänomene verursachen Schäden?

02.04.2014

Gewitter\_Downburst

120 km/h



10km – 20 Minuten

Gewitter\_Derecho

Derecho wind Event  
Hudson Oaks, TX  
June 1st, 2004

140 km/h



200km – 30 Minuten

50 km/h



© NASA / J. of Michigan

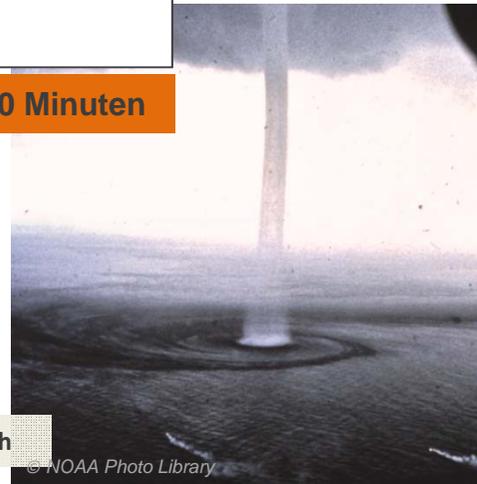
Tromben

300m – 10 Minuten



200 km/h

© Steinbach Weather



© NOAA Photo Library

3km – 10 Minuten

60 km/h



© Mike Umscheid  
www.underthemoon.com

Gewitter\_Fallwind

# Stürme und Sturmschäden?



**Sturmtief** 150 km/h

2000km – 3 Tage

200 km/h

**Hurrikane**

© NASA

700km – 4 Tage

02.04.2014

110 km/h

© Andreas Fuchs

**Föhnsturm**

**Kaltfrontdurchgang**

© Craig Schlossberg

80 km/h

300km – 6 Stunden

© Tirol Schifffahrt

100km – 12 Stunden

# Stürme und Sturmschäden?



Jahr	Monat	Tag	Name	Spitzenwert	Ort	Betroffenes Gebiet
1976	1	4		135	Wien-Hohe Warte	
1981	1	3		124	Wien-Hohe Warte	Wien umgebung
1982	11	7	JAHRHUNDERTFÖHN	176	<i>Patscherkofel</i>	Innsbruck, Achensee
1983	1	6		140		Alpennordseite
1984	11	23		140	Wien-Hohe Warte	Wien, Linz
1986	1	20		135	Wr. Neustadt	
1986	7	6		144	Langenlebarn-Flugplatz	
1990	3	1	VIVIAN & WIEBKE	162	Hörsching-Flughafen	allg. Katastrophenlage
1992	11	27		211,3	<i>Schmittenhöhe</i>	
1994	1	6		140		Vorarlberg, Tirol
1994	1	28		145	Kremsmünster	
1995	1	27	WILMA	135	Wr. Neustadt	OÖ, Nö, Wien, Wr. Becken 130km/h
1998	1	5		143		OÖ
1999	2	5	LARA	130		Großraum Wien, NÖ, OÖ
1999	6	2		139	Salzburg-Flughafen	
1999	12	26	LOTHAR	143	Wolfsegg	Salzburg 130
				217,8	<i>Feuerkogel</i>	
2000	3	9		149	Leiser Berge	
2002	10	26	JEANETTE	135	Innsbruck	Tirol- Flachgau bis Burgenland
2002	11	14	FÖHN	150		Pinzgau Katastrophe, schwerste Forstschäden
2003	8	18	UNWETTER	127	Retz-Windmühle	
2004	2	8	URSULA	130	Schärding	Vorarlberg, Tirol, OÖ.
2007	1	18	KYRILL	147	Wolfsegg	sonst 100-140
2007	6	21	HAGELUNWETTER	120		Schäden in NÖ und in Wien
2008	1	27	PAULA	145	Irdning	von Tirol bis Burgenland, Osttirol, Kärnten und Steiermark
						extreme Forstschäden, Dach- und Stromversorgungsschäden
2008	3	1	EMMA	141	Schwechat+Salzburg	100 Millionen EURO Schaden, bes in OÖ und NÖ.

# Stürme und Sturmschäden?



Jahr	Monat	Tag	Name	Spitzenwert	Ort	Betroffenes Gebiet
1976						
1981	1	3		124	Wien-Hohe Warte	Wien umgebung
1982						
1983	1	6		140		Alpennordseite
1984	1	23		140	Wien-Hohe Warte	Wien, Linz
1986	1	20		135	Wr. Neustadt Langmuckhorn	
1986	7	6		144	Flugplatz	
1990	3	1	VIVIAN & WIEBKE	162	Hörsching-Flughafen	allg. Katastrophenlage
1992	11	27		211,3	Schmittenhohe	
1994	1	6		140		Vorarlberg, Tirol
1994	1	28		145	Kremsmünster	
1995	1	27	WILMA	135	Wr. Neustadt	OÖ, Nö, Wien, Wr. Becken 130km/h
1998	1	5		143		OÖ
1999	2	5	LARA	130		Großraum Wien, NÖ, OÖ
1999	6	2		139	Salzburg-Flughafen	
1999	12	26	LOTHAR	143	Wolfsegg	Salzburg 130
				217,8	Feuerkogel	
2000	3	9		149	Leiser Berge	
2002	10	26	JEANETTE	135	Innsbruck	Tirol-Flachgau bis Burgenland
2002	11	14	FÖHN	150		Pinzgau Katastrophe, schwerste Forstschäden
2003	8	18	UNWETTER	127	Retz-Windmühle	
2004	2	8	URSULA	130	Schärding	Vorarlberg, Tirol, OÖ.
2007	1	18	KYRILL	147	Wolfsegg	sonst 100-140
2007	6	21	HAGELUNWETTER	120		Schäden in NÖ und in Wien
2008	1	27	PAULA	145	Iröding	von Tirol bis Burgenland, Osttirol, Kärnten und Steiermark
						extreme Forstschäden, Dach- und Stromversorgungsschäden
2008	3	1	EMMA	141	Schwechat+Salzburg	100 Millionen EURO Schaden, bes in OÖ und NÖ.

- Markante Sturmereignisse stets im Winter: NOV-FEB, meist Innviertel bis Seewinkel
- Großräumig schwere Schäden bei Windspitzen von 100-140+ km/h
- Große Sturmtiefs dominieren die Schadensbilanz !
- Sommerereignisse sind selten und meist sehr lokal begrenzt (Gewitter)

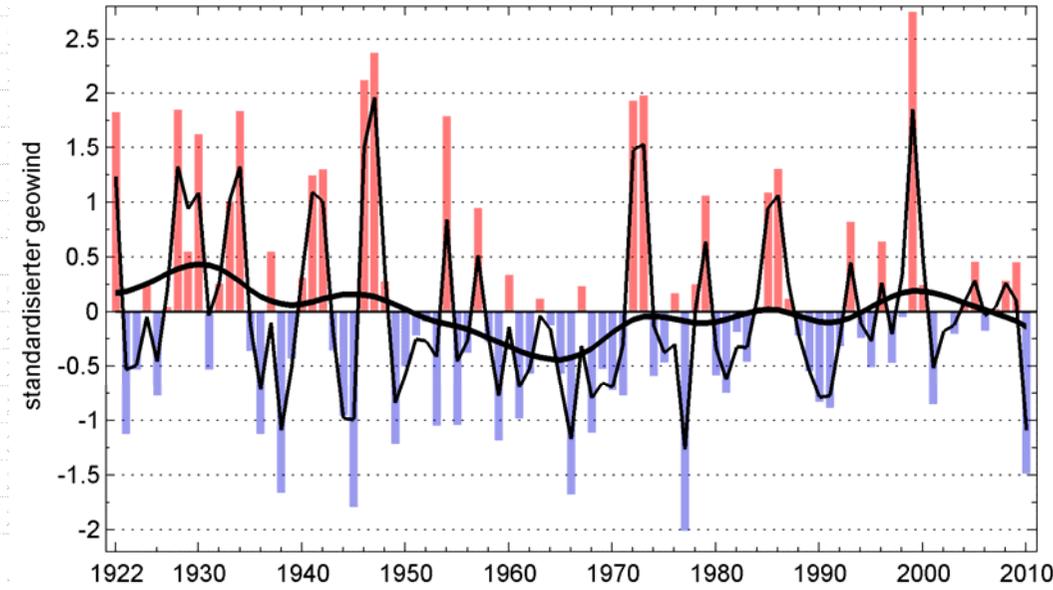
# Stürme und Sturmschäden?



Jahr	Monat	Tag	Name	Spitzenwert	Ort	Betroffenes Gebiet
1976						
1981	1	3		124	Wien-Hohe Warte	Wien umgebung
1982	1	6		140		Alpennordseite
1984	11	23		140		Wien, Linz
1986	1	20		125	Wr. Neustadt Langmühlbach	
1986	7	5		144	Flugplatz	

- Markante Sturmereignisse stets im Winter: NOV-FEB, meist Innviertel bis Seewinkel
- Großräumig schwere Schäden bei Windspitzen von 100-140+ km/h
- Große Sturmtiefs dominieren die Schadensbilanz !
- Sommerereignisse sind selten und meist sehr lokal begrenzt (Gewitter)

STURMPROXY CENTRAL EUROPE Wien/Karlov/Kremsmuenster (7j. und 21j.-Gauss Tiefpassfilter)



## Analyse ALPENNORDSEITE (OÖ,NÖ)

- Langfristig keine Zunahme
- Große Änderungen von Jahr zu Jahr
- Perioden mit starken Stürmen wechseln mit ruhigeren Perioden
- Große Stürmigkeit Winter Nov-Feb:

	Hohe Windmaxima	Starke Stürme
1.	1998	1946
2.	1946, 1945	1972
3. sonst	1972, 1971	1998
4.	1921, 27, 29, 33	1921
5.	1953	1945

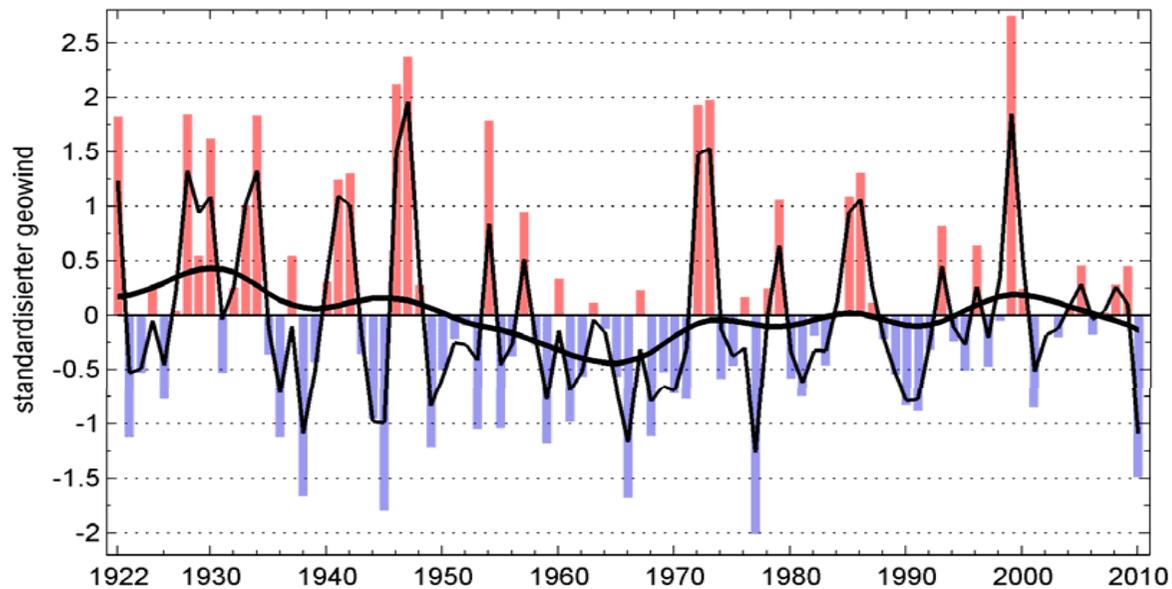
2008	3	1	EMMA	141	Schwechat+Salzburg	100 Millionen EURO Schaden, bes in OÖ und NÖ.
------	---	---	------	-----	--------------------	---



# Stürme in Europa im Klimawandel



STURMPROXY CENTRAL EUROPE Wien/Karlov/Kremsmuenster  
(7j. und 21j.-Gauss Tiefpassfilter)



Die mittlere jährliche Windgeschwindigkeit (10m, Beobachtung) hat in den letzten 30 Jahren um 10% abgenommen.

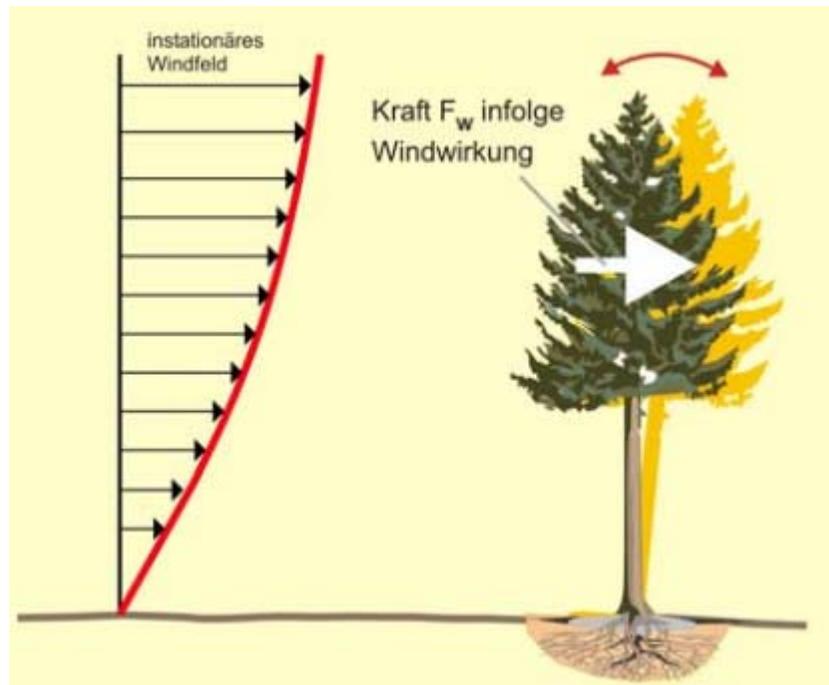
## Gründe :

- Zunahme der Oberflächenrauigkeit der Landnutzungsänderung
- Änderung der atmosphärischen Zirkulation (Druckgebilde).

(Vautard et al., 2010)

- **20 Jhdt:** Keine signifikante Änderung im Sturmklima, hohe Variabilität (dekadisch, J:J) (WASA, 1998)
- Besonders viele Stürme (Mittel- u NW-Europa) 1880-1890, danach stetige Abnahme bis 1965, dann Zunahme bis zum sekundären Maximum von 1998/1999.
- Heutzutage auf langjährigen Durchschnittswert!

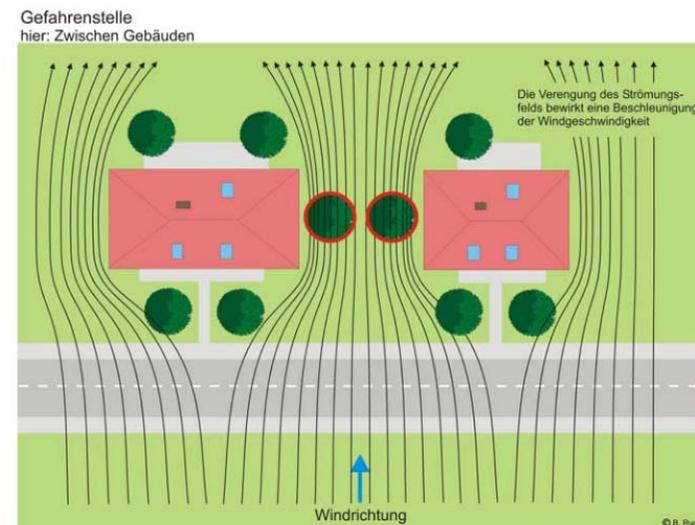
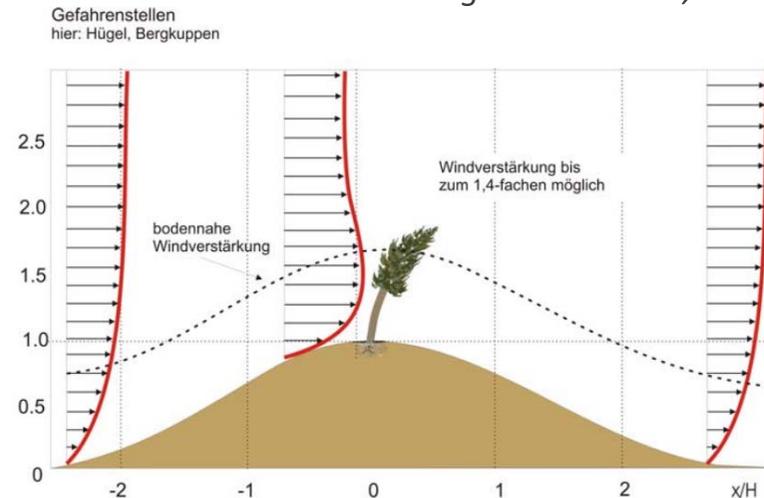
# Belastung von Bäumen durch Wind



Der Baum erfährt durch die Umströmung eine Kraftwirkung (Windlast). Diese führt zu:

- Auslenkung des Baumes
- Verformung der Krone
- Biegung des Stammes
- Hin- und Her-Schwingen den Baumes

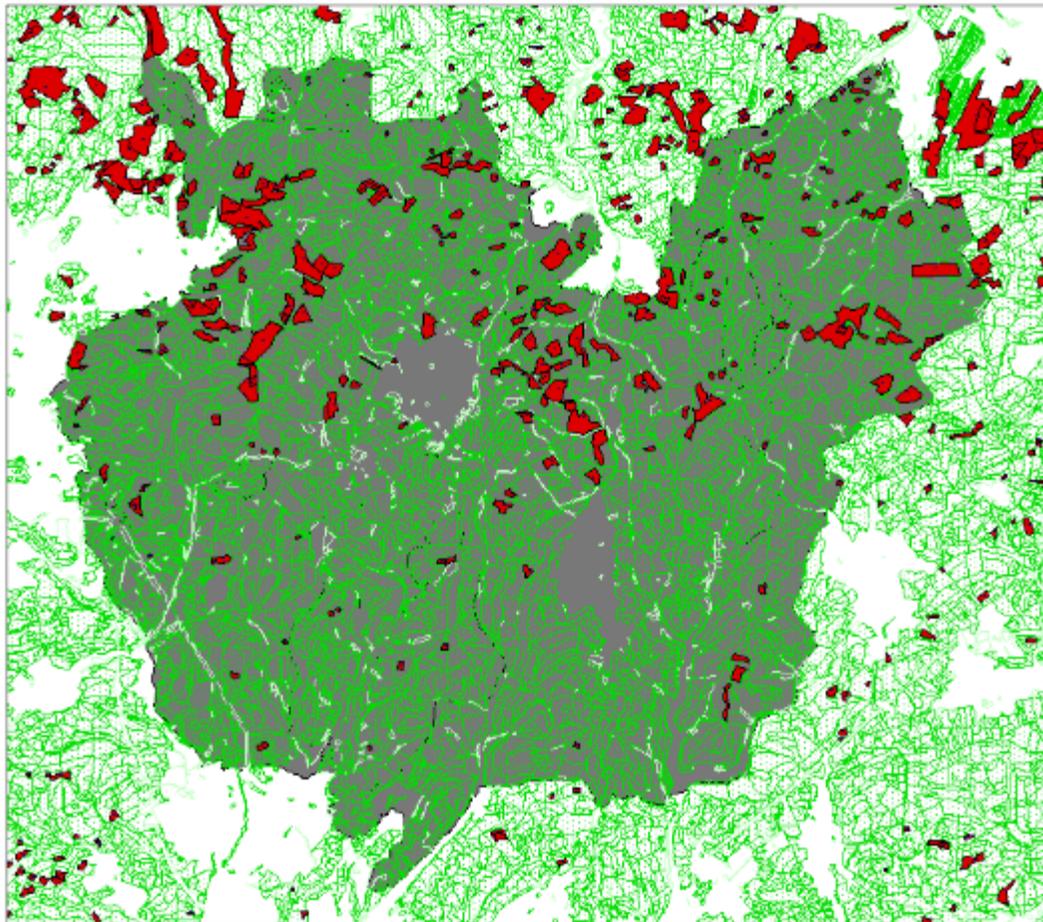
Abbildungen Bodo Ruck, KIT



## Beispiel von Windschäden an Bäumen und nützliche Maßnahmen



### Wintersturm „Kyrill“ 2007 im BR Vessertal Thüringen, Dtl.



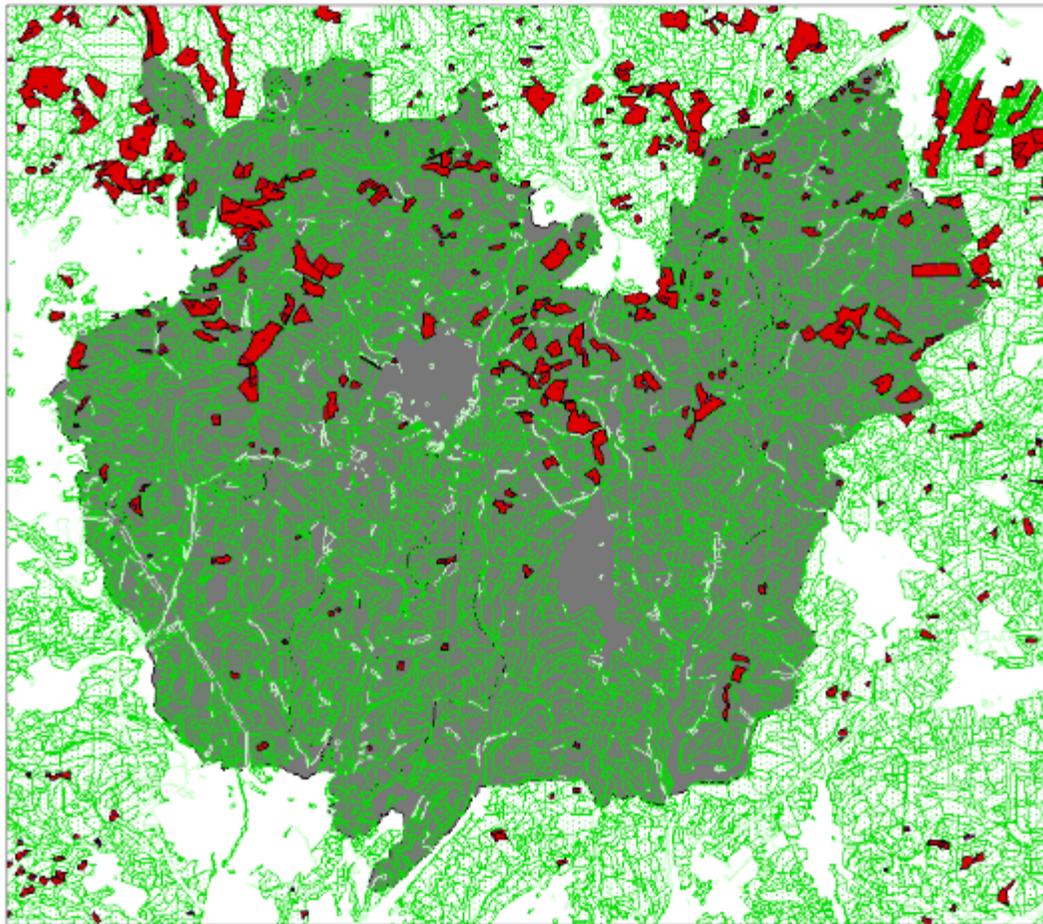
Waldfläche insgesamt:  
**15.242ha**

Waldfläche zerstört:  
**567ha**

Waldfläche schwer ausgedünnt:  
**405ha**

# Beispiel von Windschäden an Bäumen und nützliche Maßnahmen

Wintersturm „Kyrill“ 2007 im BR Vessertal Thüringen, Dtl.



# Beispiel von Windschäden an Bäumen und nützliche Maßnahmen

## Waldumbau von Monokulturen zu Mischbeständen



Waldumbau





02.04.2014  
Folie 34

**Vielen Dank  
für Ihre  
Aufmerksamkeit**