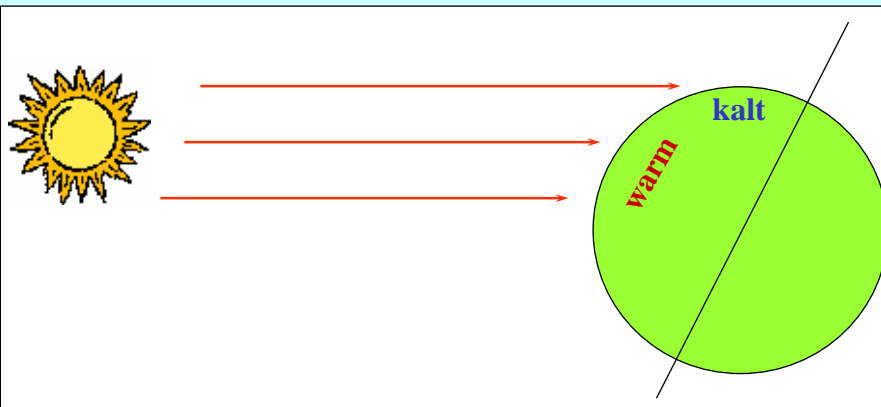


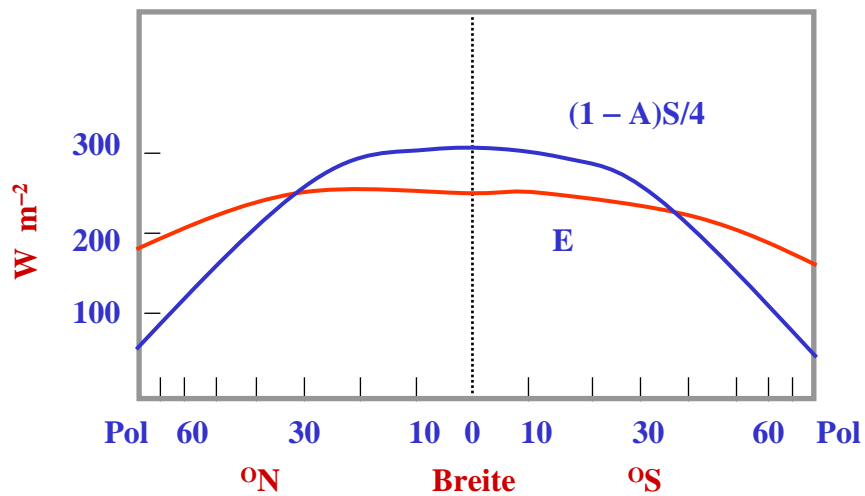
## Kapitel 12



## Die Allgemeine Zirkulation



- Die atmosphärischen Luftbewegungen werden durch die ungleiche Verteilung der diabatischen Erwärmung in der Atmosphäre verursacht.
- Es treten sowohl horizontale als auch vertikale Gradienten der Erwärmung auf.



Jahresmittelwerte für die am Oberrand der Atmosphäre einfallende solare Strahlung  $(1 - A)S/4$  und emittierte terrestrische Strahlung  $E$  in Abhängigkeit von der Breite.

### Kinetische Energie der Atmosphäre

1. Für 98% der atmosphärischen kinetischen Energie ist direkt oder indirekt der **horizontale Temperaturunterschied** zwischen den tropischen Wärmeüberschuß- und den polaren Wärmedefizitgebieten verantwortlich.
  - ❖ Das horizontale Windfeld der **synoptischen Störungen** und der **planetaren Wellen** enthält den größten Teil dieser kinetischen Energie.
2. Den restlichen Beitrag zur atmosphärischen kinetischen Energie liefern die Luftbewegungen, die durch **konvektive Instabilität** ausgelöst werden.

## Konvektion

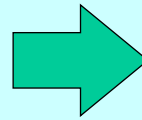
- Konvektion ist eine Folge der vertikal unterschiedlichen Erwärmung der Luft -- die von der Sonne aufgeheizte Erdoberfläche erwärmt nur die bodennahen Luftschichten, da Luft ein schlechter Wärmeleiter ist.
- Die Luftbewegungen, die dabei entstehen, haben in großen Gewittern eine räumliche Ausdehnung von 30 km, in der bodennahen Grenzschicht dagegen nur von 1 mm.
- Obwohl die konvektiv angetriebenen Luftbewegungen einen kleinen Anteil an der gesamten atmosphärischen kinetischen Energie haben, spielen sie beim Vertikaltransport von fühlbarer und latenter Wärme eine wichtige Rolle.

## Die allgemeine Zirkulation

Die **allgemeine Zirkulation** bezeichnet die Gesamtheit aller großräumigen Luftbewegungen auf der Erde.

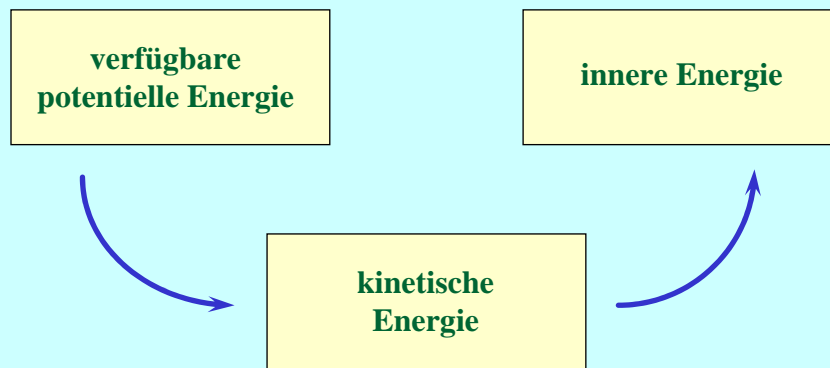
## Thermisch ausgelöste Zirkulationsbewegungen in Abwesenheit von Rotation

- Die physikalischen Prozesse, die für die Entstehung und Erhaltung der großräumigen atmosphärischen Bewegungen verantwortlich sind, lassen sich durch zwei einfache **Gedankenexperimente** veranschaulichen.

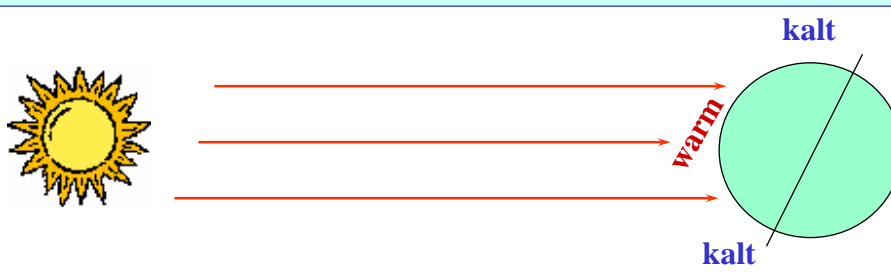


<p>1. <math>\rho_1 &lt; \rho_2</math></p> <p><b>Anfangsstadium</b> hat potentielle Energie</p> <p><b>Mittestadium</b> potentielle Energie in kinetische Energie umgewandelt</p> <p><b>Endzustand</b> hat weniger potentielle Energie kinetische Energie durch Reibungskräfte entfernt</p>	
<p>potentielle Energie Änderung =&gt; verfügbare potentielle Energie</p>	

## Diagrammatische Darstellung des Energiekreislaufs während der Zirkulationsbewegung

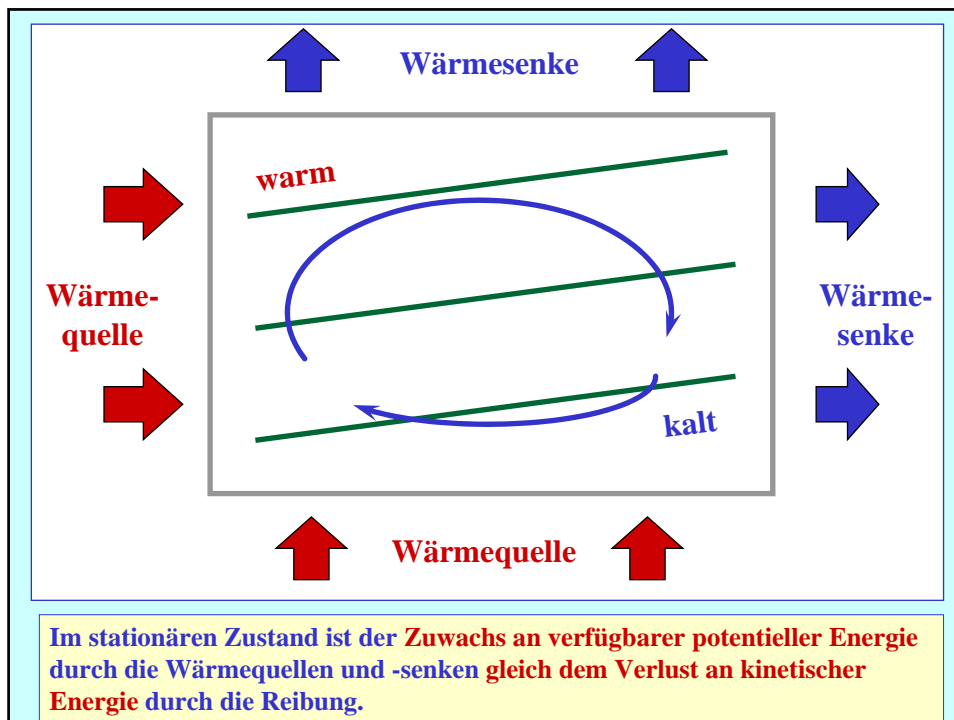


- In der Atmosphäre sorgen die diabatischen Wärmequellen für einen ständigen Nachschub an verfügbarer potentieller Energie.



- => es gibt einen ununterbrochenen Energiefluß den in den dargestellten Energiekreislauf.
- Diesen stationären Zustand soll ein zweites Experiment veranschaulichen.





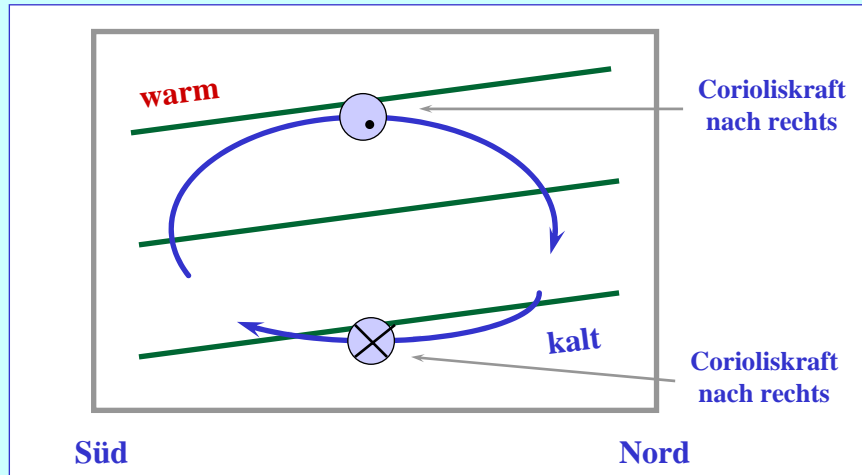
### Situation in der Atmosphäre

- Die atmosphärische Zirkulation wird auch durch diabatische Wärmequellen und -senken angetrieben.
- In der Atmosphäre muß man die Kompressibilität der Luft berücksichtigen =>
- Man betrachtet statt Temperaturänderungen die Änderungen der potentiellen Temperatur während der Zirkulationsbewegung.
- Den Isothermen entsprechen in der Atmosphäre Isentropen, wobei die Zunahme der potentiellen Temperatur mit der Höhe das Kriterium für stabile Schichtung ist.

- **In den großräumigen thermischen Zirkulationen spielt der Wasserdampf eine wichtige Rolle.**
- **Wenn Wasserdampf im aufsteigenden Ast der Zirkulation kondensiert, wird latente Wärme in fühlbare Wärme umgewandelt.**
- **Dadurch erhöht sich der horizontale Temperaturgradient, was einen zusätzlichen Antrieb für die thermische Zirkulation bedeutet.**

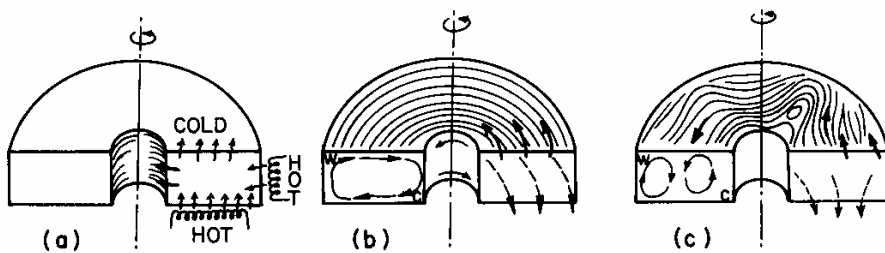
- **Für die Aufrechterhaltung der großräumigen thermischen Zirkulation sind sowohl horizontale als auch vertikale Gradienten der diabatischen Erwärmung nötig.**
- **Gäbe es keinen horizontalen Gradienten, würden die Wärmequellen und -senken am Boden bzw. in der Höhe die stabile Schichtung zerstören.**
- **Die Folge wären kleinräumige Bewegungen (aufsteigende Warmluftblasen).**
- **Gäbe es keine vertikalen Erwärmungsgradienten, würde die Stabilität der Schichtung zunehmen und die Zirkulation immer schwächer werden.**

## Die Auswirkungen von Rotation



Gültig für relativ schwache Rotation - für stärkere Rotation ist die Strömung **labil**

## Strömungsverhältnisse in einem rotierenden Flüssigkeitsbehälter bei unterschiedlichen Erwärmungsgradienten



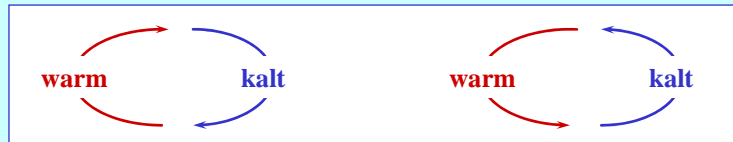
Die Verteilung der Wärmequellen und -senken

Hadley-Zirkulation (links: Vertikale und horizontale Vertikalzirkulation, rechts: Strömungen nach der Entstehung von Wellenstörungen)



## Thermisch direkte und indirekte Zirkulationen

- Eine Zirkulation, in der warme Luft gehoben wird und kalte Luft absinkt, wobei verfügbare potentielle Energie in kinetische Energie umgewandelt wird, bezeichnet man als **thermisch direkte Zirkulation**.

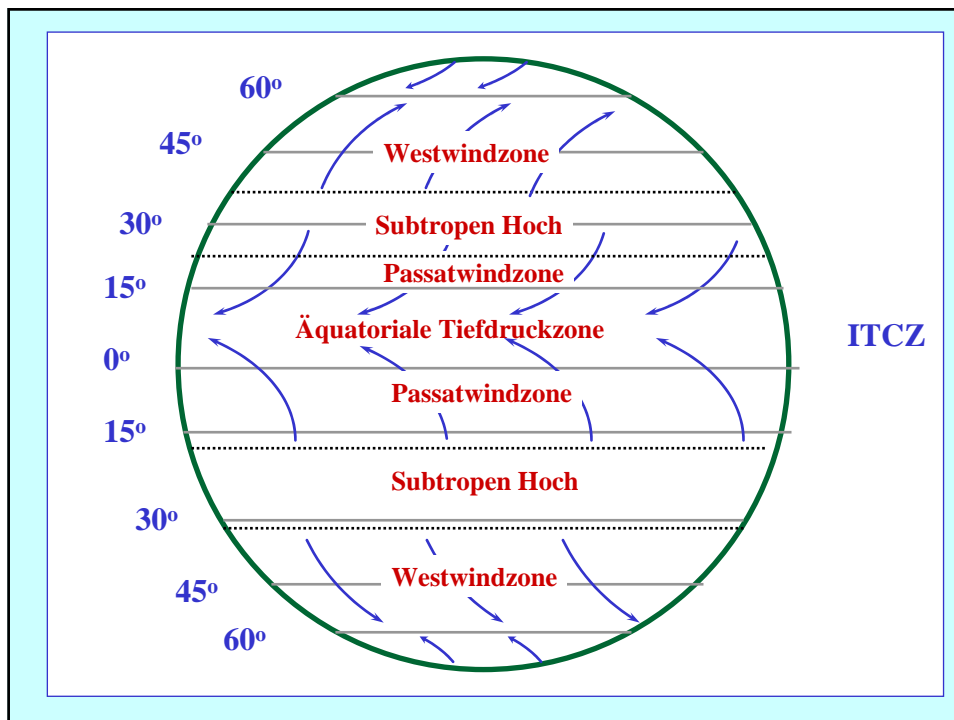


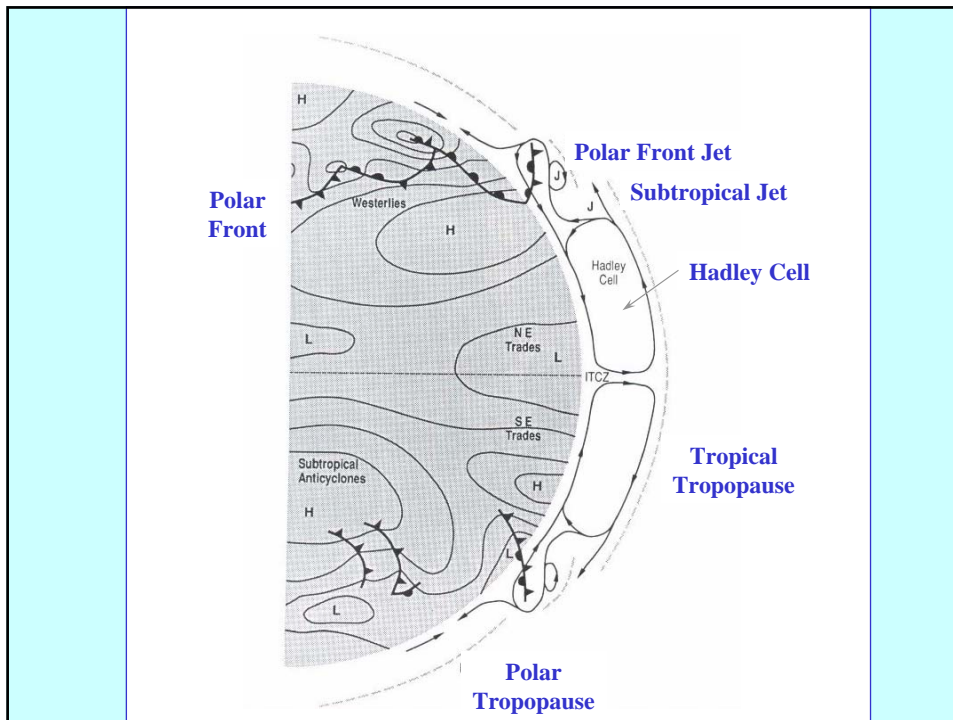
- Im umgekehrten Fall spricht man von einer **thermisch indirekten Zirkulation**.
- Die Hadley Zirkulation ist **thermisch direkt**, die Zirkulation in den mittleren Breiten ist **thermisch indirekt**.

## Thermisch ausgelöste Zirkulationsbewegungen in den Tropen

- In den Tropen gibt es viel Bewölkung und **kräftigen Regen** im Bereich der **innertropischen Konvergenzzone (ITCZ)** und **über den Landflächen der Sommerhalbkugel**.
- Die wichtigsten **Trockenzonen** sind die **subtropischen Ozeane** (äquatoriale Trockenzonen im Atlantik und Pazifik), die **Landflächen auf der Winterhalbkugel** und die **Wüsten auf der Sommerhalbkugel**.
- Größtenteils sind die feuchten Gebiete relativ warm im Vergleich zur Temperatur der Erdoberfläche in der Umgebung;
- Die trockenen Gebiete sind dagegen relativ kalt (abgesehen von den Wüsten).

- Im Bereich der **ITCZ** liegt ein Gürtel mit warmem Ozeanwasser und im Bereich der äquatorialen Trockenzone ein schmaler Streifen, in dem kaltes Auftriebswasser aus tieferen Ozeanschichten an die Oberfläche gelangt.
- Die **Landmassen sind auf der Sommerhalbkugel wärmer** als der angrenzende Ozean und im Winter kälter.
- Die klimatologische Niederschlagsverteilung und die Vertikalbewegungen stehen in einem engen Zusammenhang.
- Im großräumigen Mittel über eine längere Zeit **steigt die Luft in den feuchten Gebieten auf und sinkt in den trockenen Gebieten ab.**
- Die Zirkulationen in den Tropen sind im klimatologischen Mittel durch aufsteigende Warmluft und absinkende Kaltluft gekennzeichnet, d.h. es handelt sich vorherrschend um thermisch direkte Zirkulationen.

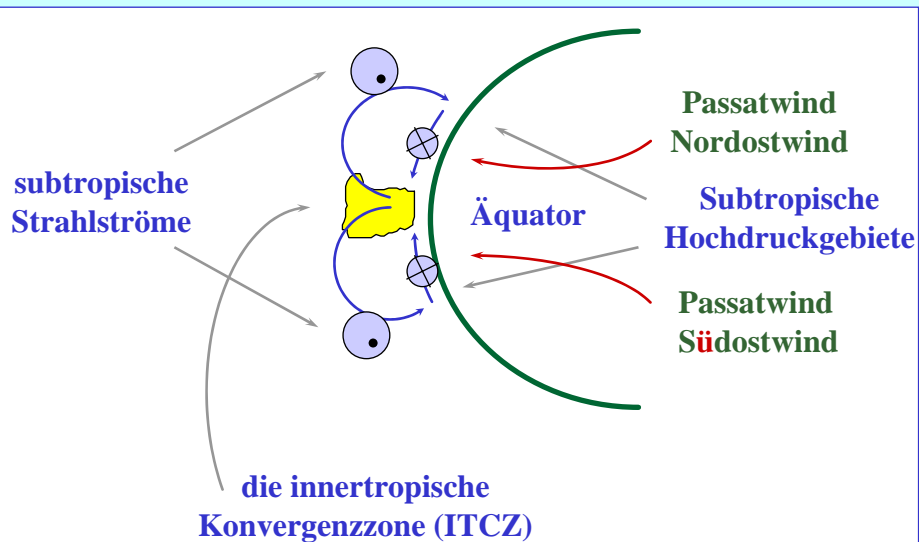




## Die Hadley-Zirkulation

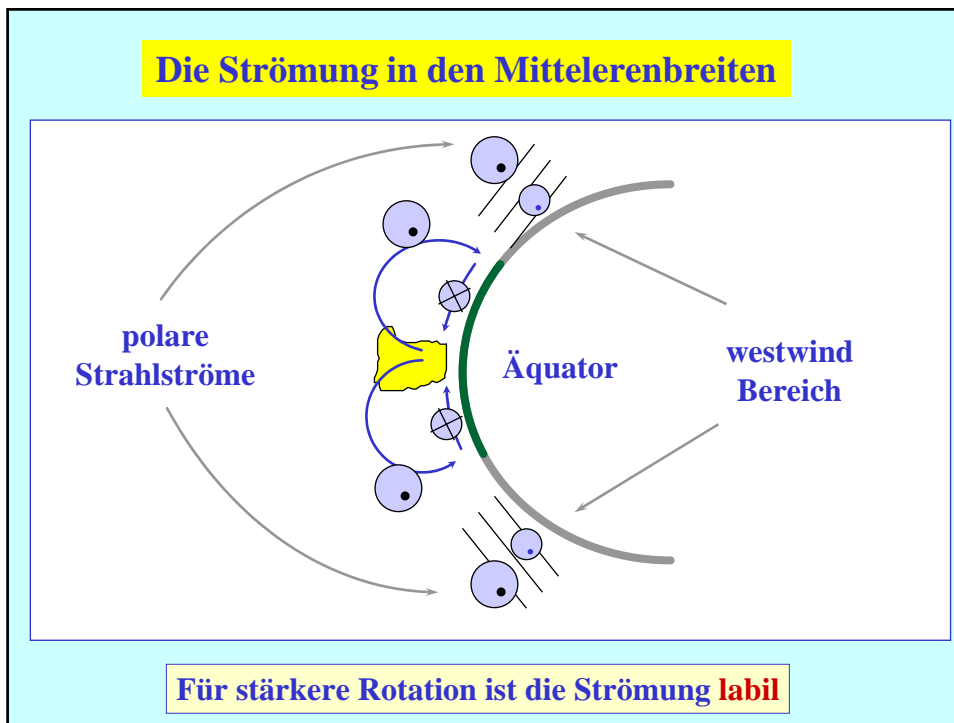
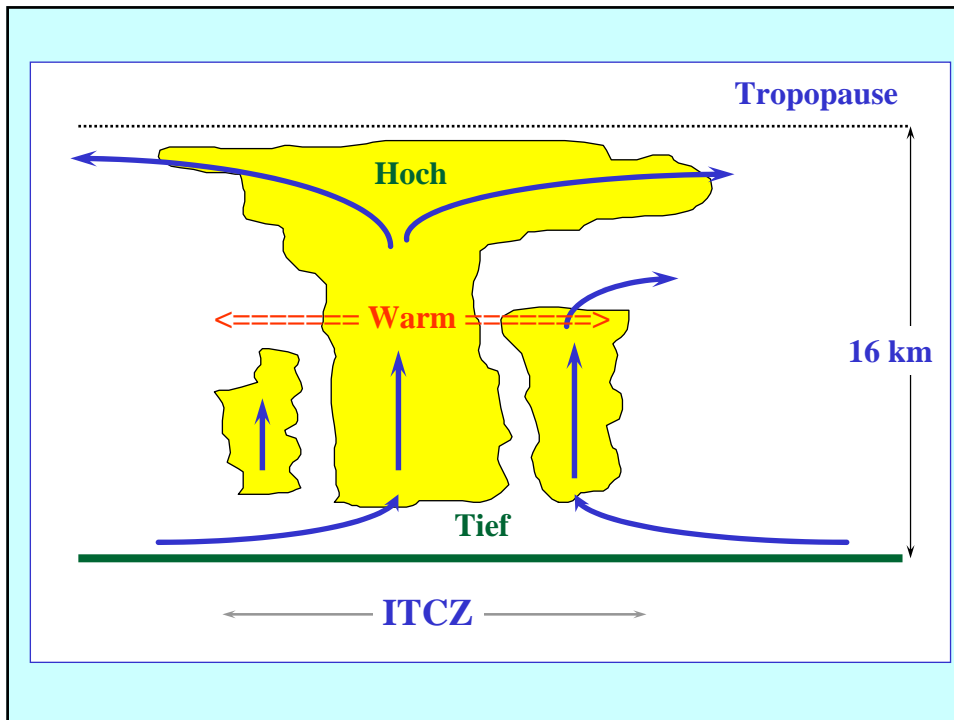
- Wenn man Wind- und Druckfelder in den Tropen entlang der Breitenkreise über ein Jahr mittelt, ergibt sich eine relativ einfache Zirkulation, die fast symmetrisch zum Äquator ist.
- Diese meridionale, thermisch direkte Zirkulation nennt man **Hadley-Zirkulation**.
- Wegen der Erdrotation haben die mit der Hadley-Zirkulation verbundenen Luftströmungen auch zonale Komponenten (Ostwinde in der unteren Troposphäre, Westwinde in der oberen Troposphäre).
- Wenn man die Luftbewegungen in den Tropen an einem bestimmten Tag betrachtet, können je nach Sonnenstand und Bodenbeschaffenheit regional große Abweichungen von der Hadley-Zirkulation auftreten.

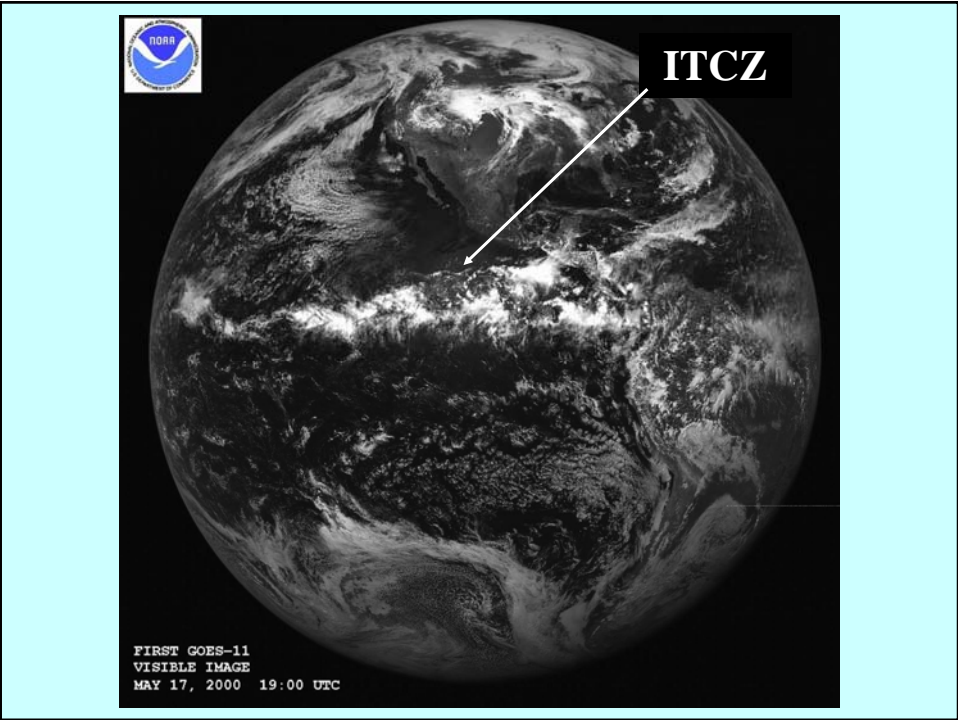
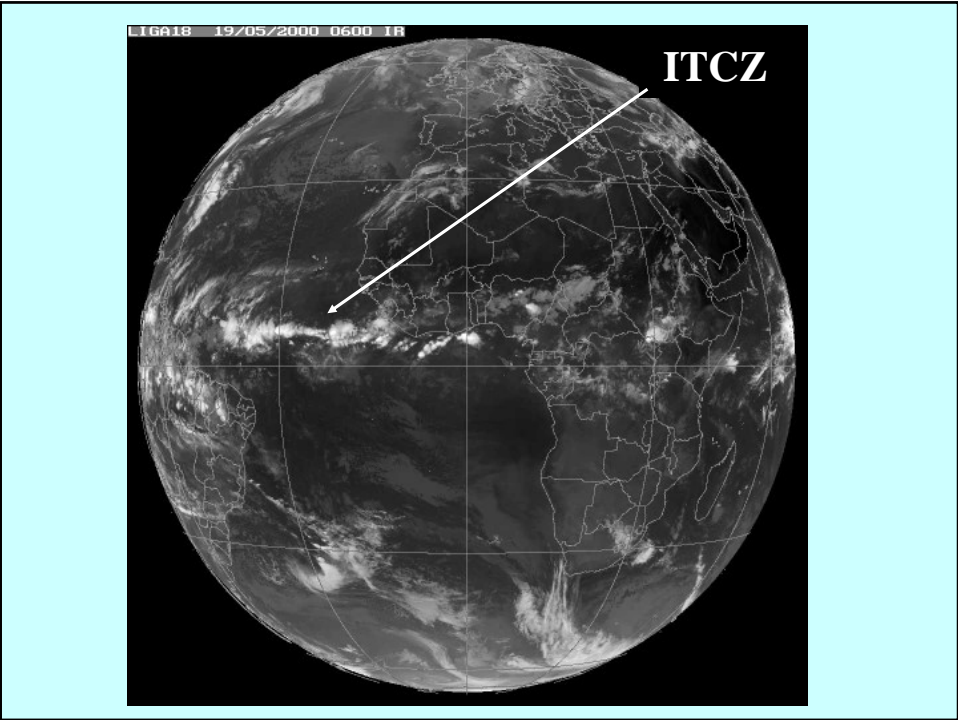
## Die Hadley-Zirkulation



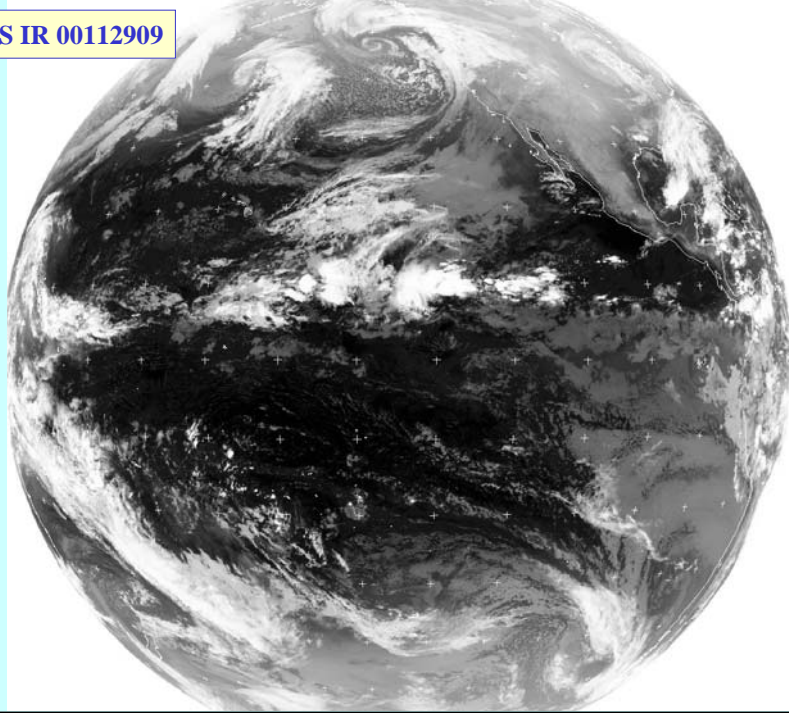
➤ Für den **aufsteigenden Ast** einer solchen Zirkulation, in dem sich Wolken und Niederschlag bilden, gilt:

1. Die Temperaturen sind fast in der gesamten Troposphäre höher als in der Umgebung.
2. In der **unteren Troposphäre** befindet sich ein **schwaches Tief** (zyklonale Strömung), in der **oberen Troposphäre** ein **schwaches Hoch** (antizyklonale Strömung).
3. Der Massenfluß ist nach oben gerichtet, mit einem Maximum in der mittleren Troposphäre.
4. In der unteren Troposphäre konvergieren die horizontalen Luftbewegungen, in der oberen Troposphäre divergieren sie.

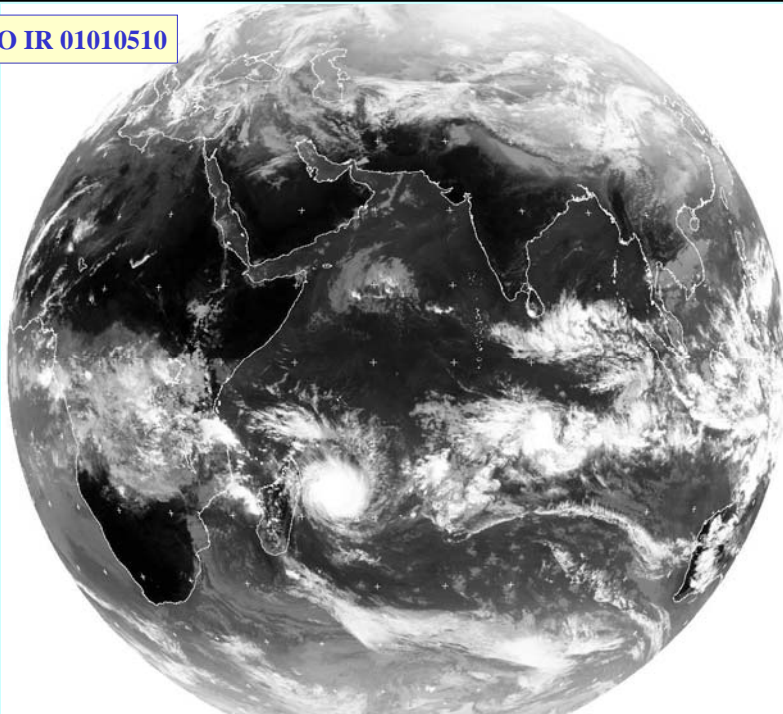




GOES IR 00112909

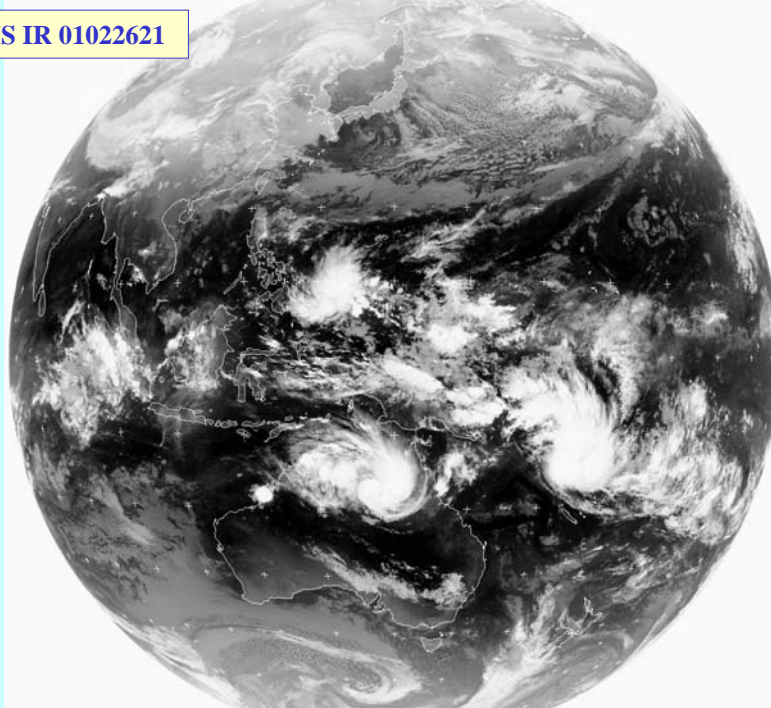


INDO IR 01010510

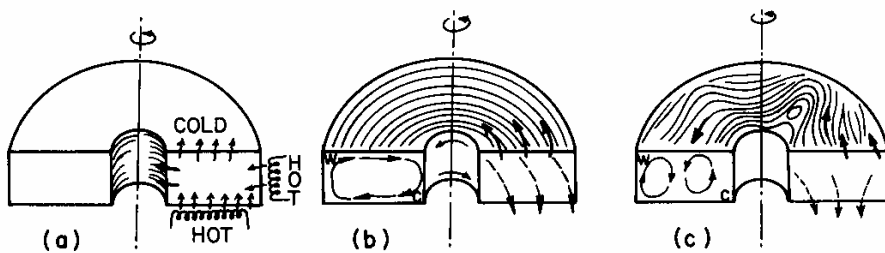




GMS IR 01022621



### Strömungsverhältnisse in einem rotierenden Flüssigkeitsbehälter bei unterschiedlichen Erwärmungsgradienten



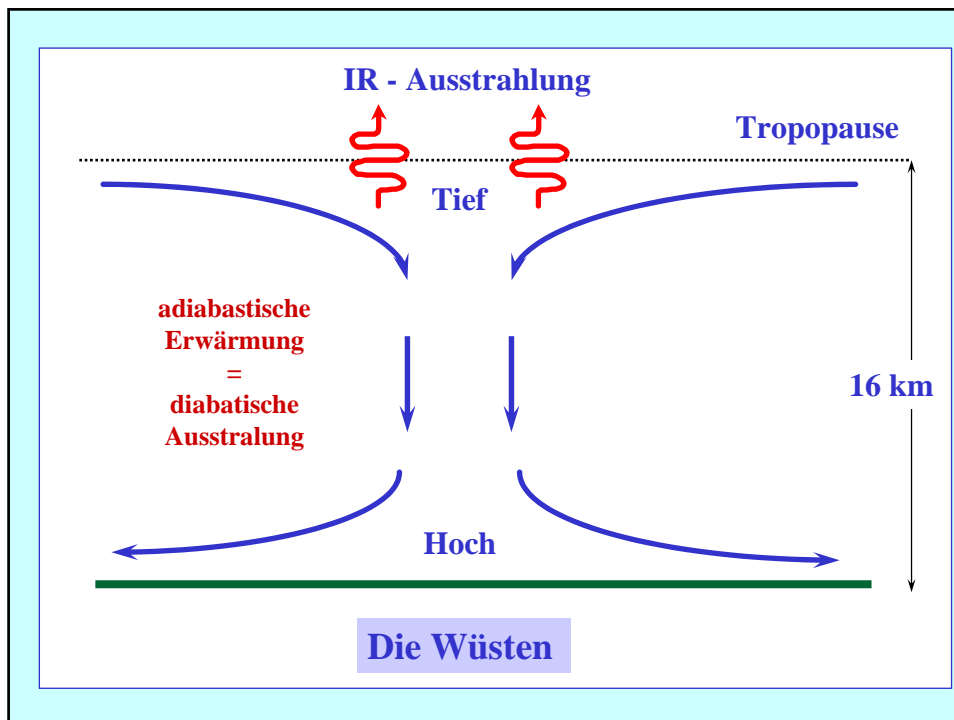
Die Verteilung der Wärmequellen und -senken

Hadley-Zirkulation (links: Vertikale und horizontale Vertikalzirkulation, rechts: Strömungen nach der Entstehung von Wellenstörungen)



## Die Wüsten

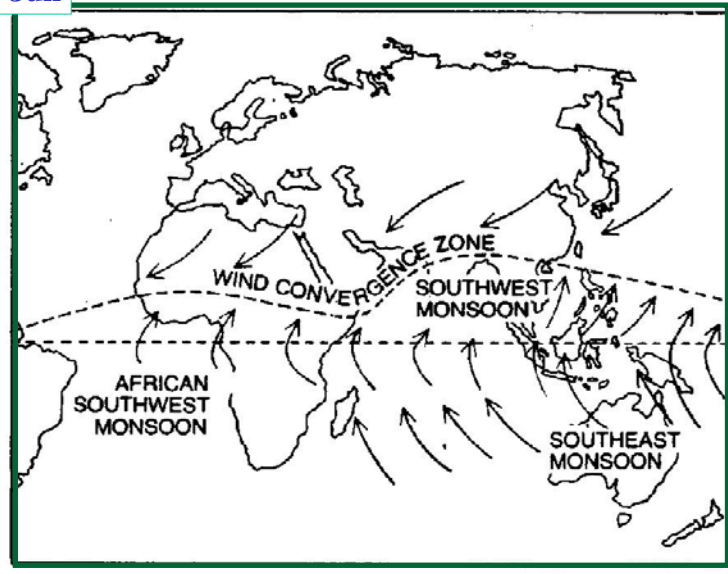
- Die extreme Hitze und Trockenheit in einigen Gebieten ist die Folge von großräumigem Absinken, wobei die Luft durch adiabatische Kompression erwärmt wird.
- Außerdem nimmt dabei die relative Feuchte so stark ab, daß die Cumulus-Konvektion fast vollständig unterdrückt wird.
- Absinkende Luftbewegungen über einem relativ warmen Gebiet können nur Teil einer thermisch indirekten Zirkulation sein.
- Die Zirkulation über den Wüsten wird also nicht durch lokale Temperaturunterschiede angetrieben, sondern durch ständige Zufuhr von kinetischer Energie aus anderen Teilen der Tropen.



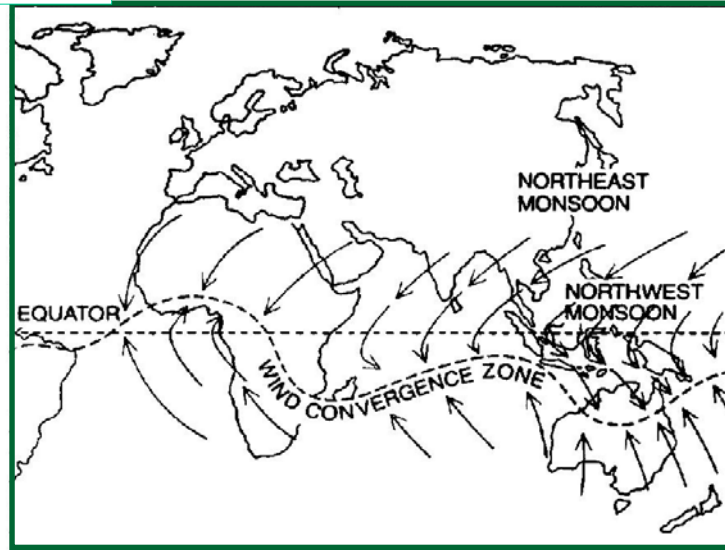
## Monsunzirkulationen

- Monsunzirkulationen "Feuchte Monsune" sind mit aufsteigenden Luftbewegungen über den warmen Landmassen verbunden.
- Die durch die unterschiedliche Erwärmung von Land und Meer erzeugte verfügbare potentielle Energie wird freigesetzt durch das Aufsteigen von warmer (leichter) Luft und das Absinken von kalter (schwerer) Luft.
- Diese Vertikalbewegungen werden von Horizontalbewegungen begleitet, die in allen Höhen quer zu den Isobaren vom hohen zum tiefen Druck gerichtet sind, d.h. in der unteren Troposphäre Richtung Land und in der oberen Troposphäre Richtung Meer.

Juli

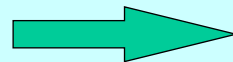


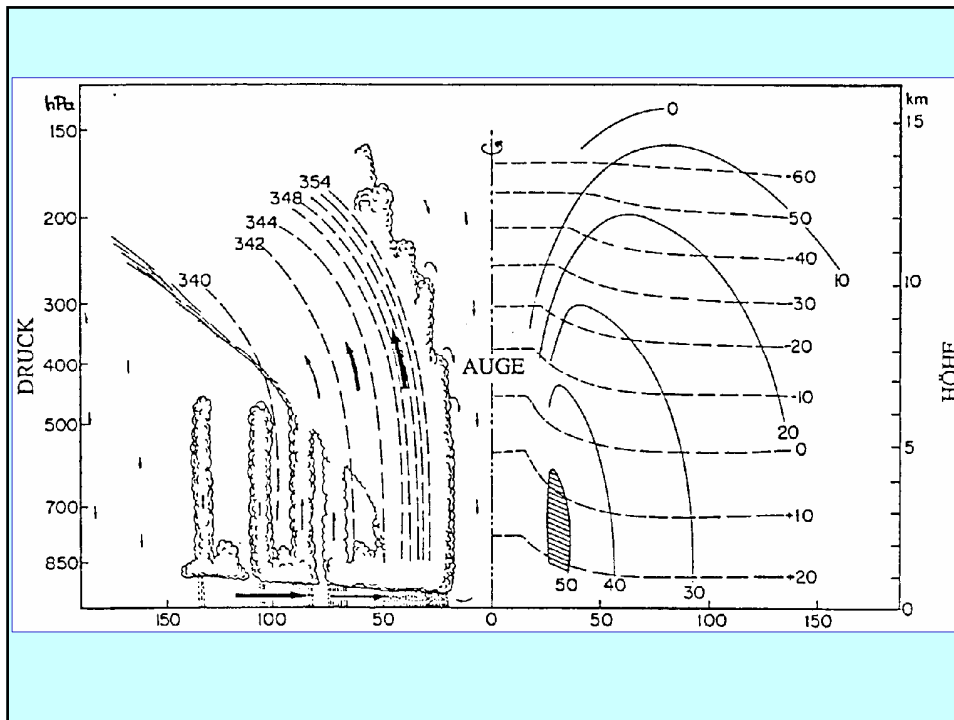
Januar



## Hurrikane

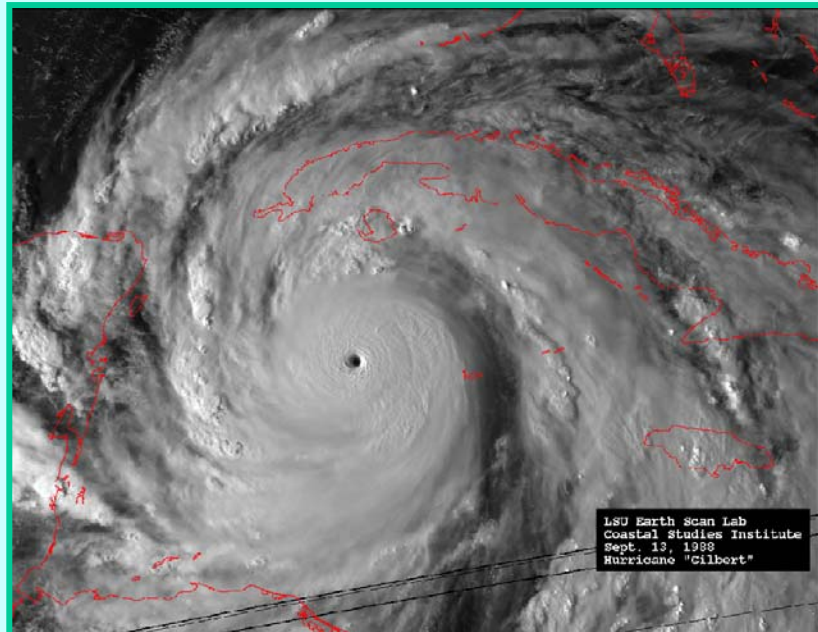
- **Hurrikane** (auch tropische Zyklone, Taifune) sind gekennzeichnet durch eine starke thermisch direkte Zirkulation (Aufsteigen von warmer Luft in der Nähe des Zentrums, Absinken von kalter Luft am Rande des Hurrikans; s. Abb. 12.10)

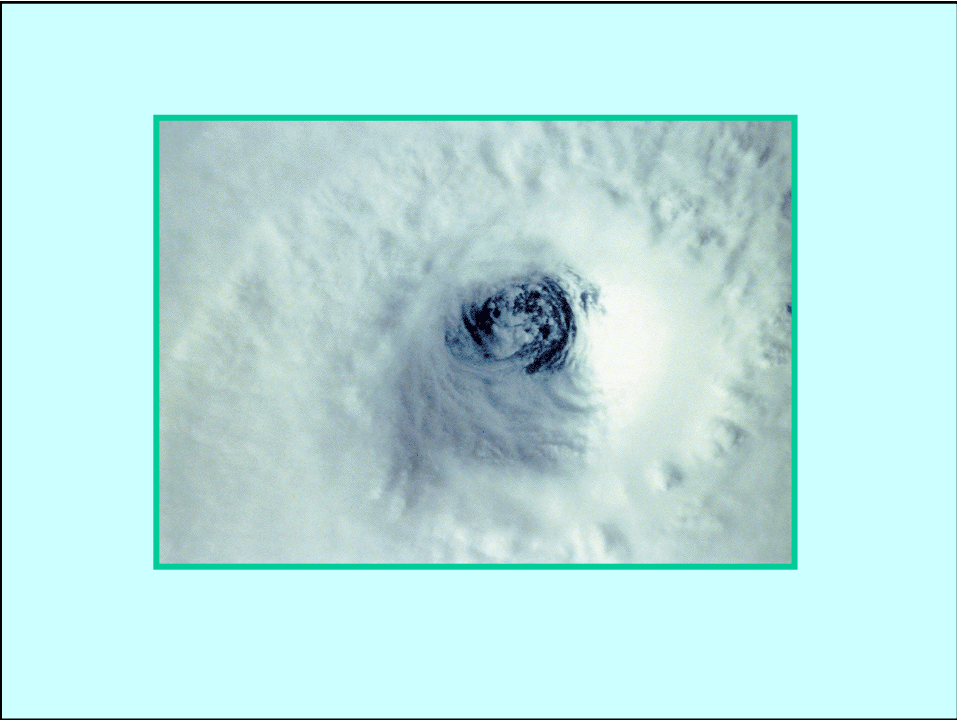
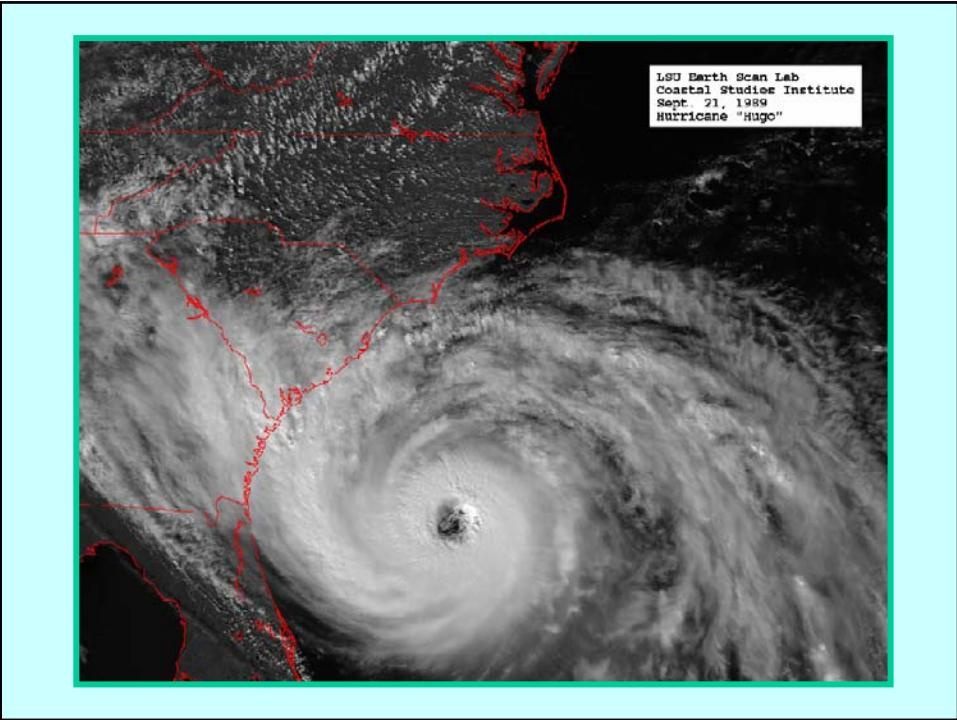




- Das Einströmen in den unteren Schichten ist vom hohen zum tiefen Druck gerichtet; das Ausströmen geschieht in höheren Schichten, wo der Druckgradient sehr schwach ist.
- Charakteristisch für Hurrikane ist das warme Zentrum, das sich unabhängig von der Temperaturverteilung in der Umgebungsluft ausbildet.
- Verursacht wird es durch die in den unteren Schichten einströmende Luft, die über der Meeresoberfläche Wärme und Feuchte aufnimmt und die dann in den hochreichenden Cumuluswolken am Rande des Auges aufsteigt, wobei zusätzlich latente Wärme frei wird.

- **Der warme Kern dient als Vorrat für die potentielle Energie, die durch die thermisch direkte Zirkulation in kinetische Energie umgewandelt wird.**
- **Diese Energieumwandlung ist für die Entstehung der hohen tangentialen Windgeschwindigkeit und für den Ausgleich der "Energieverluste" infolge der Reibung verantwortlich.**







**Ende**