

# **J. Wirths Aktuelle Astronomie - Einführungskurs**

# **J. Wirths Aktuelle Astronomie - Einführungskurs**

- Modul 1:** Sonne - Stern unter Sternen  
2015 April 15, 29, Mai 13
- Modul 2:** Aufbau und Entstehung des Sonnensystems,  
Heliosphäre  
2015 Mai 27, Juni 10, 24
- Modul 3:** Planetoide, Kometen, Kleine Körper  
2015 September 23, Oktober 7, 21
- Modul 4:** Innere Planeten: Merkur und Erde  
2015 November 18, Dezember 2, 16
- Modul 5:** Unsere Heimat: Erde und Mond
- Modul 6:** Roter Planet Mars – Zeit und Kalender
- Modul 7:** Jupiter und seine Monde
- Modul 8:** Saturn und die Faszination planetarer Monde
- Modul 9:** Gasriesen (Uranus, Neptun) und Zwergplaneten

# **J. Wirths Aktuelle Astronomie - Einführungskurs**

**Modul 5: Unsere Heimat: Erde und Mond  
2016 Februar 17, März 9, 16**

**Sondervortrag: „Bemannte Raumfahrt und die Erforschung des  
Mondes“ 2016 April 6**

**Modul 6: Roter Planet Mars – Zeit und Kalender  
2016 Juni 1, 8, 15, 22**

**Modul 7: Jupiter und seine Monde  
2016 September 7, 21, Oktober 5**

**Modul 8: Saturn und die Faszination planetarer Monde  
2016 Oktober 26, November 9, 23**

**Modul 9: Gasriesen (Uranus, Neptun) und Zwergplaneten  
2017**

# **J. Wirths Aktuelle Astronomie - Einführungskurs**

- Modul 10:** Kuipergürtel und der Rand des Sonnensystems
- Modul 11:** Interstellare Materie  
und die Entstehung von Sternen
- Modul 12:** Aufbau und Entwicklung der Sterne  
und ihre Strahlung
- Modul 13:** Weiße Zwerge – Rote Riesen – Schwarze Löcher –  
Endstadien der Sternentwicklung
- Modul 14:** Die Sonne als Stern in der Milchstraße  
und Sonderfälle der Sternentwicklung
- Modul 15:** Milchstraße
- Modul 16:** Galaxien, Galaxienhaufen und die  
großräumige Struktur des Kosmos
- Modul 17:** Radiogalaxien, Quasare und supermassive  
Schwarze Löcher

# **J. Wirths Aktuelle Astronomie - Einführungskurs**

- Modul 18: Dimensionen des Weltalls**
- Modul 19: Raum-Zeit-Kontinuum,  
Dunkle Materie und Teilchen**
- Modul 20: Modelle des Kosmos**
- Modul 21: Entwicklungsphasen des Weltalls, Gesamtschau**

# **J. Wirths Aktuelle Astronomie - Einführungskurs**

## **Modul 6:**

### **Der rote Planet: Mars - Zeit und Kalender**

*(Themen 1.11 und 1.9.3)*

# 1.11 Der rote Planet: Mars

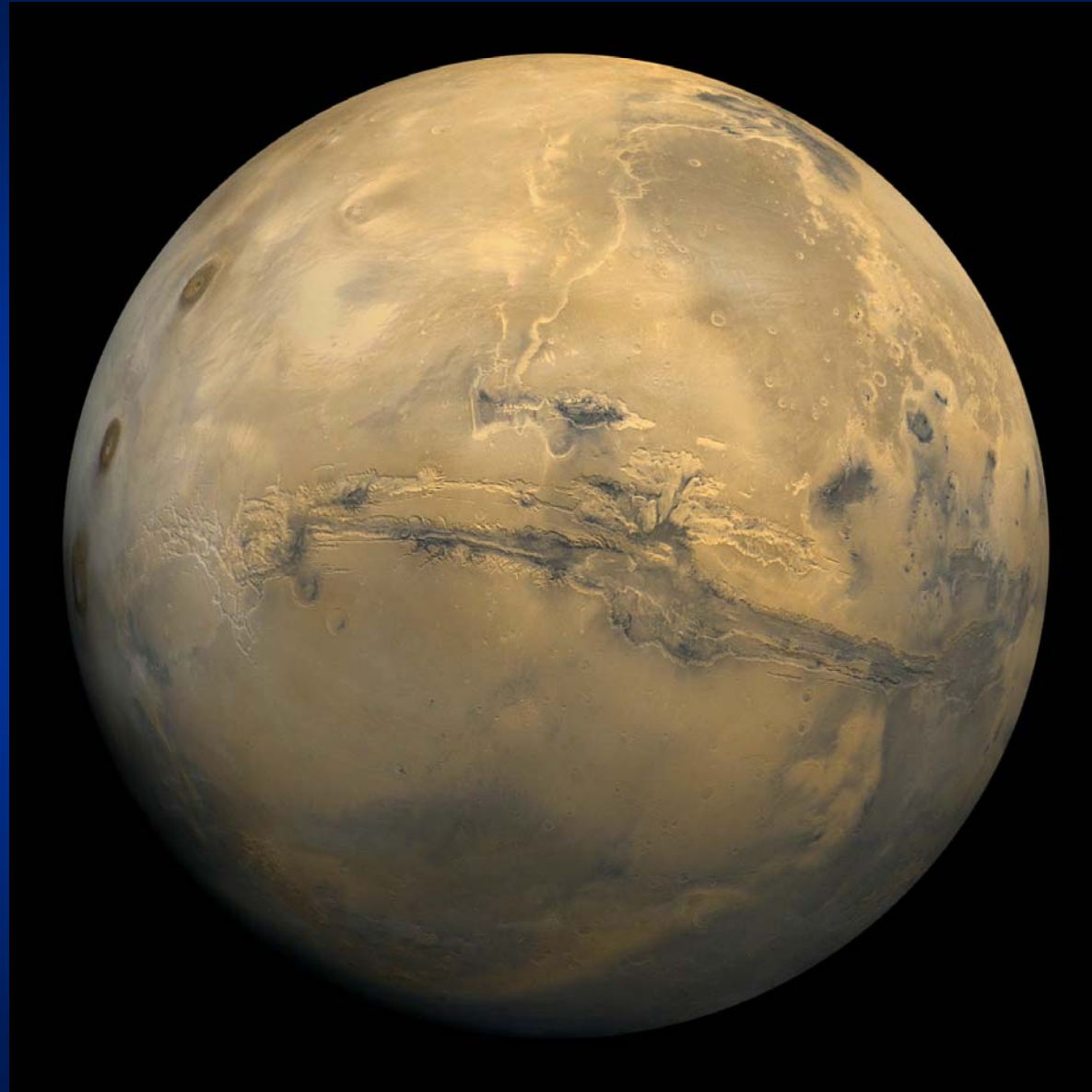
## 1.11 Mars



*[Mt. Palomar 1956]*

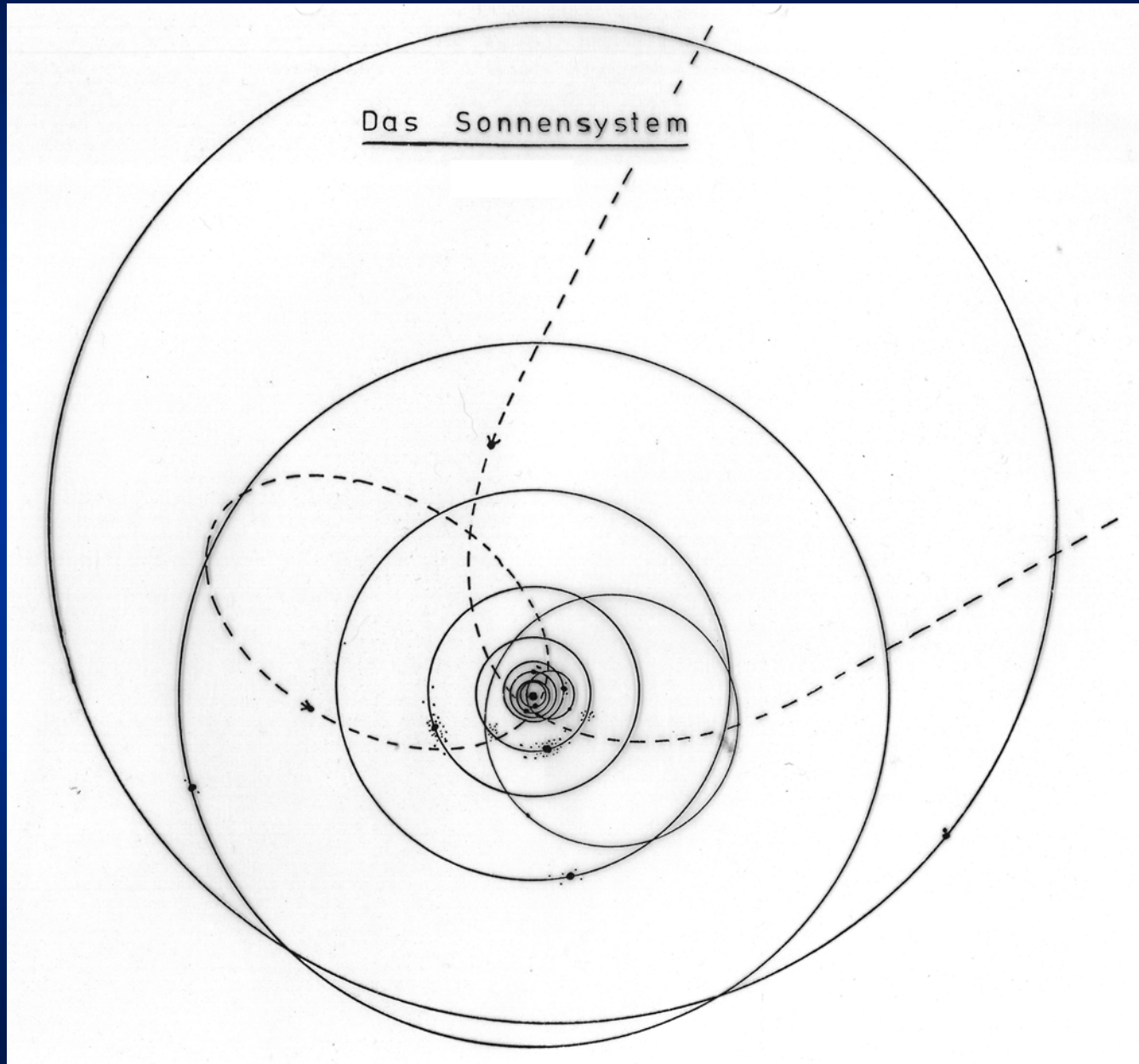


## 1.11 Mars



*[Viking 1 Orbiter 1980-02-22]*

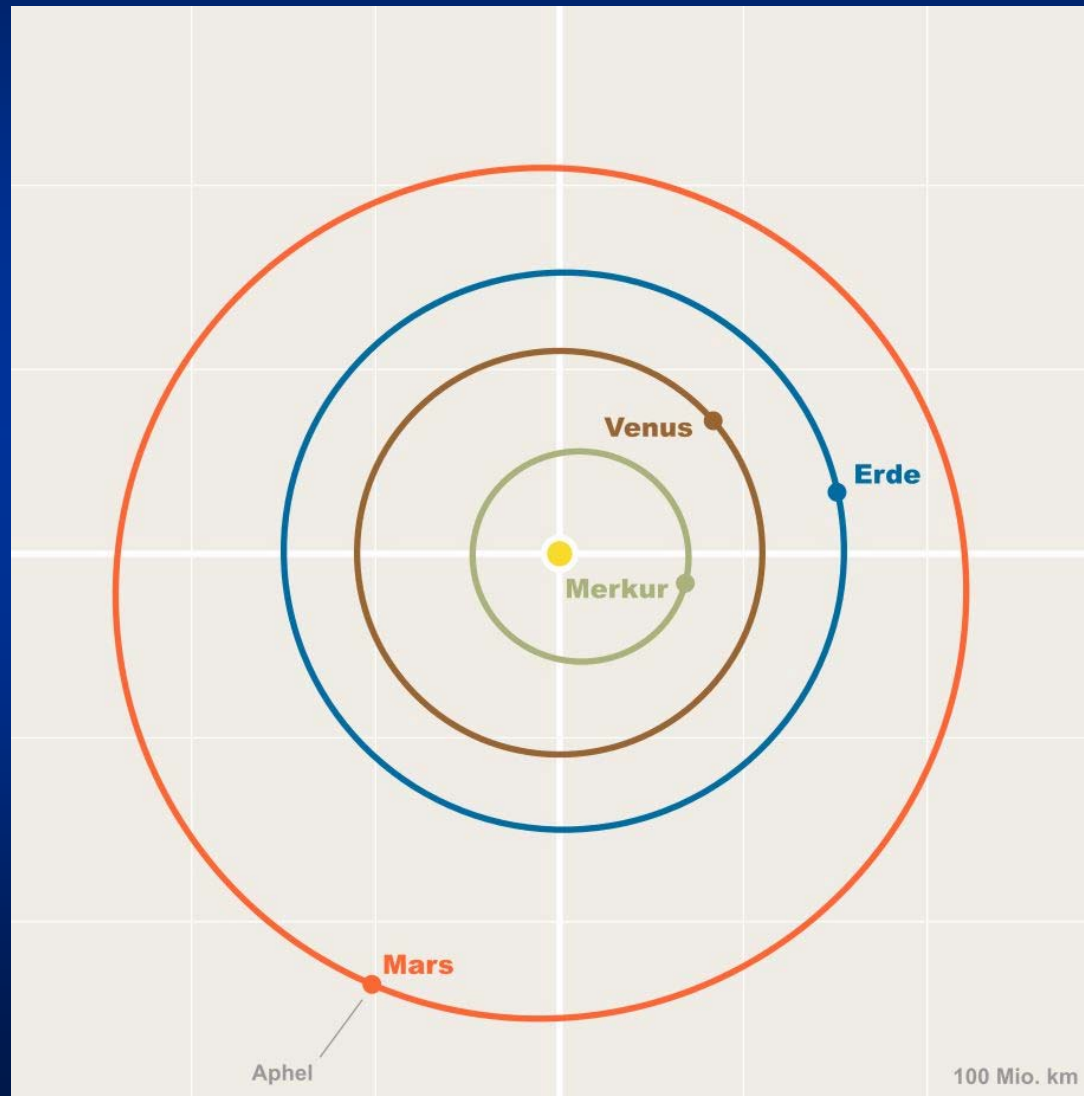
# 1.11 Mars



# 1.11 Mars

## 1.11.1 Allgemeines und physische Daten

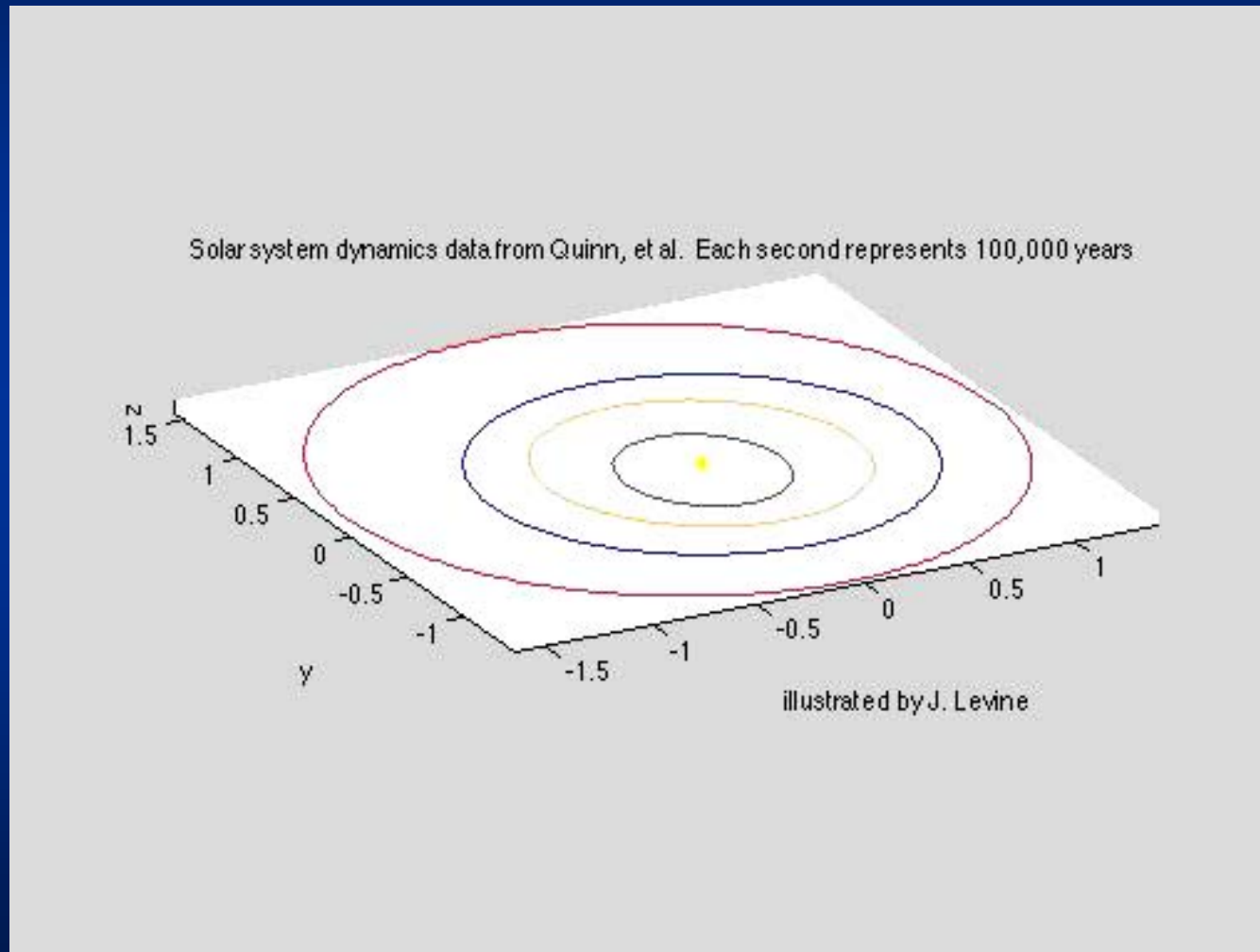
### 1.11.1.1 Bahn



# 1.11 Mars

## 1.11.1 Allgemeines und physische Daten

### 1.11.1.1 Bahn



**Laufzeit der Simulation: 3 Mio. Jahre**

# 1.11 Mars

## 1.11.1 Allgemeines und physische Daten

### 1.11.1.1 Bahn

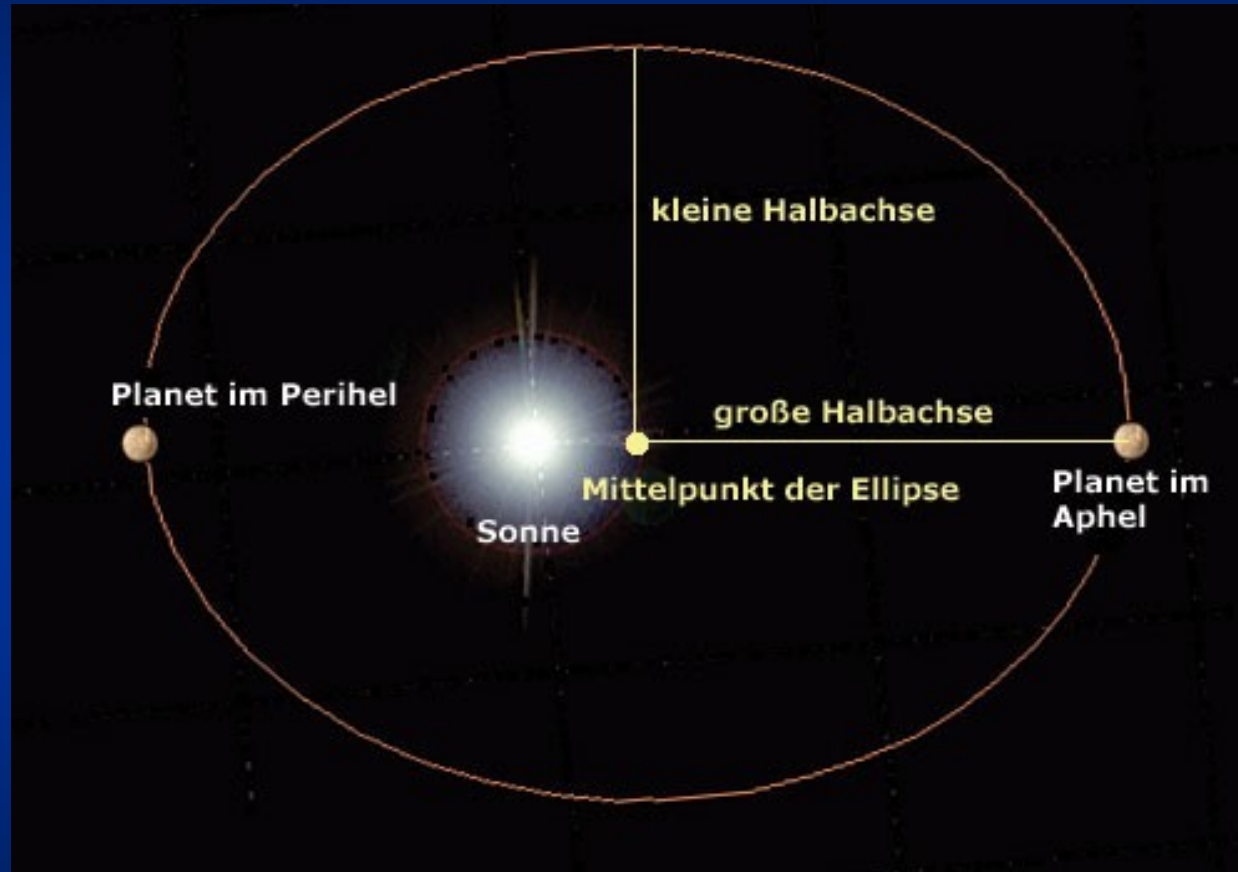
#### Bahndaten:

Große Halbachse:	a	$227.94 \cdot 10^6$ km	1.524 AE
Exzentrizität:	$\varepsilon$	0.0934	(Erde: 0.0167)
Periheldistanz:	q	$206.65 \cdot 10^6$ km	1.381 AE
Apheldistanz:	Q	$249.23 \cdot 10^6$ km	1.666 AE
siderische Umlaufperiode:	$P_{\text{sid}}$	686.98 d	1.881 a
synodische Umlaufperiode:	$P_{\text{syn}}$	797.94 d	2.185 a
Bahnneigung ./.. Ekliptik:	i	$1.850^\circ$	
Bahngeschwindigkeit:	$v_u$	$24.13 \text{ km s}^{-1}$ (21.97...26.5)	(Erde: 29.78)
Einstrahlung (Irradianz):	S	$0.589 \text{ kW m}^{-2}$ (0.48...0.705)	0.431 Solarkonst.

# 1.11 Mars

## 1.11.1 Allgemeines und physische Daten

### 1.11.1.1 Bahn





# 1.11 Mars

## 1.11.1 Allgemeines und physische Daten

### 1.11.1.1 Bahn



**Große Halbachse, Apsiden und (numerische) Exzentrizität:**

$$Q + q = 2a$$

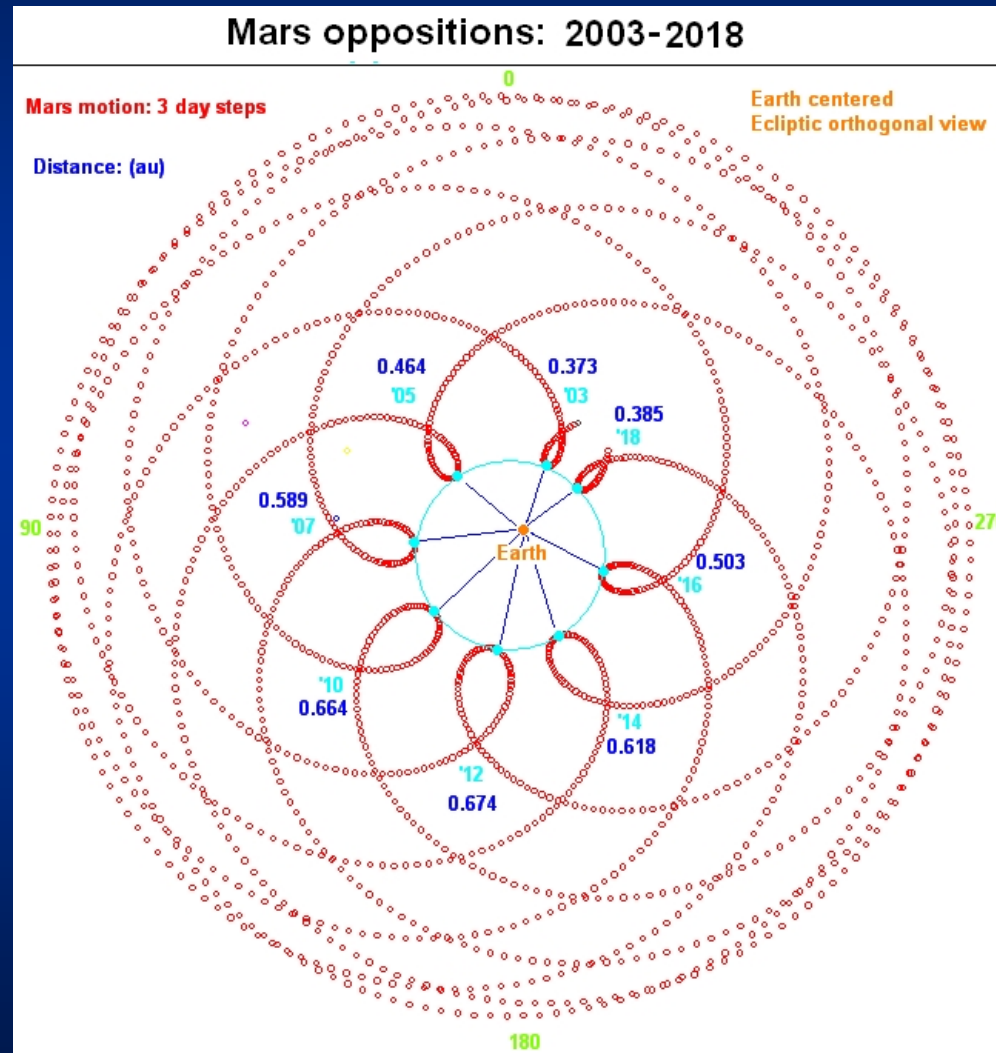
$$e = (Q - q) / (Q + q) = (Q - q) / 2a$$

$$Q = a(1 + e) \quad q = a(1 - e)$$

# 1.11 Mars

## 1.11.1 Allgemeines und physische Daten

### 1.11.1.1 Bahn



Mars-Oppositionen bezogen auf die (festgehaltene) Erde



# 1.11 Mars

## 1.11.1 Allgemeines und physische Daten

### 1.11.1.2 Beobachtung



Erde vom Mars aus gesehen (nur als „Morgen-“ oder „Abendstern“)

# 1.11 Mars

## 1.11.1 Allgemeines und physische Daten

### 1.11.1.2 Beobachtung



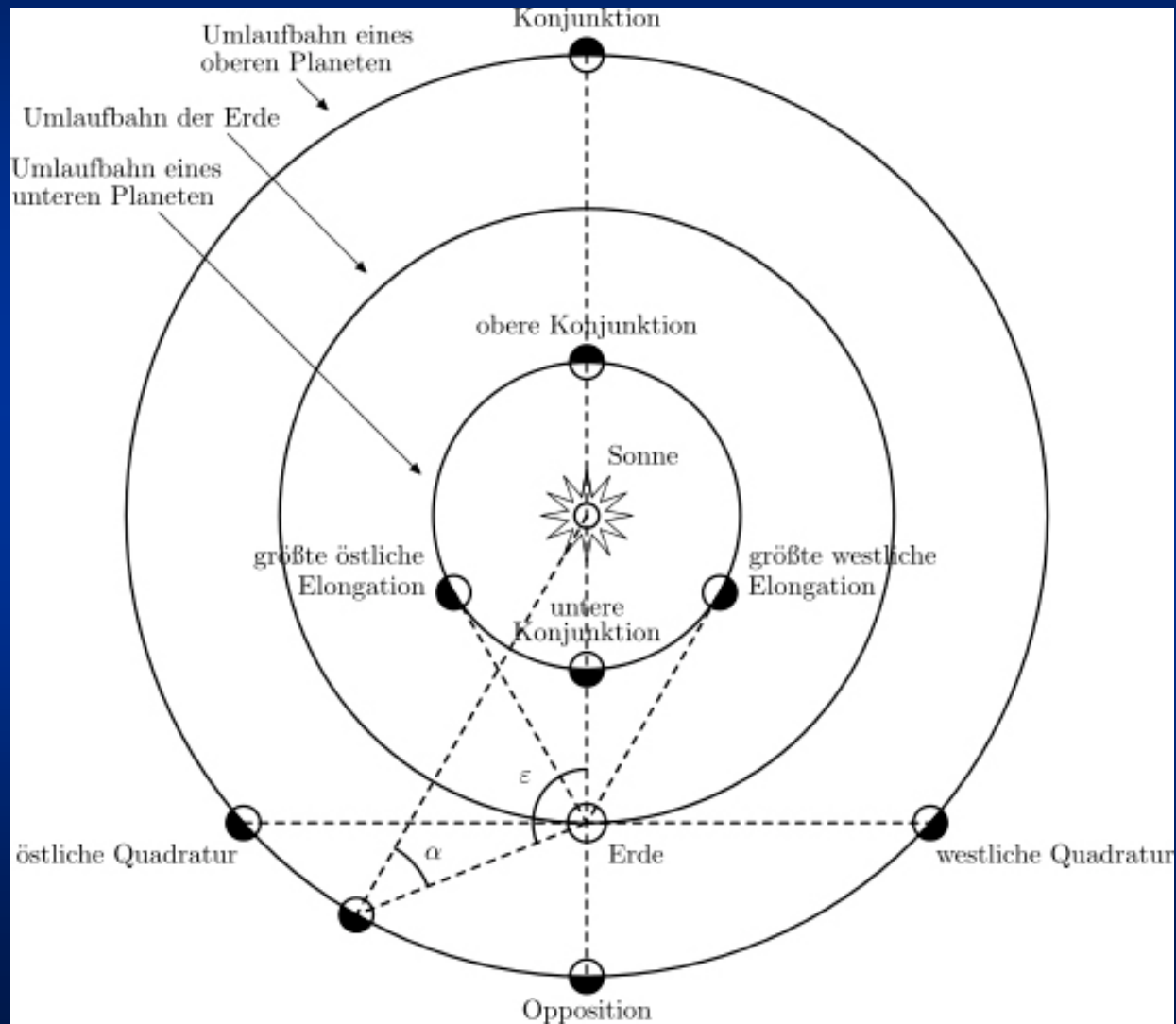
Erde und Mond vom Mars aus gesehen (Phasen nur teleskopisch sichtbar)

# 1.11 Mars

## 1.11.1 Allgemeines und physische Daten

### 1.11.1.2

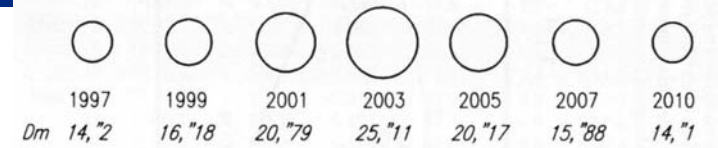
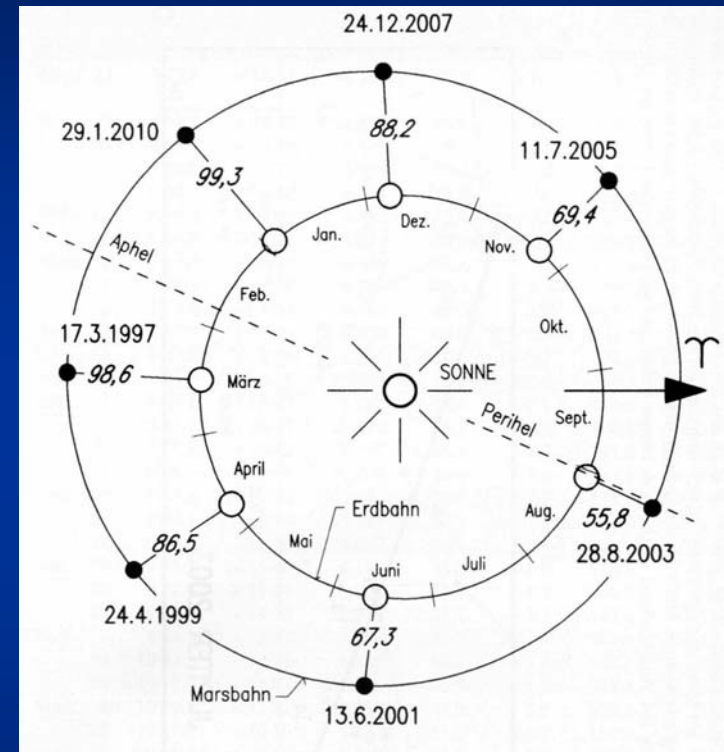
### Beobachtung: Aspekte



# 1.11 Mars

## 1.11.1 Allgemeines und physische Daten

### 1.11.1.2 Beobachtung



bei Entfernung:	55.5 · 10 <sup>6</sup> km
	101.3 · 10 <sup>6</sup> km
	347.6 · 10 <sup>6</sup> km
	400.4 · 10 <sup>6</sup> km

### Mars am Himmel:

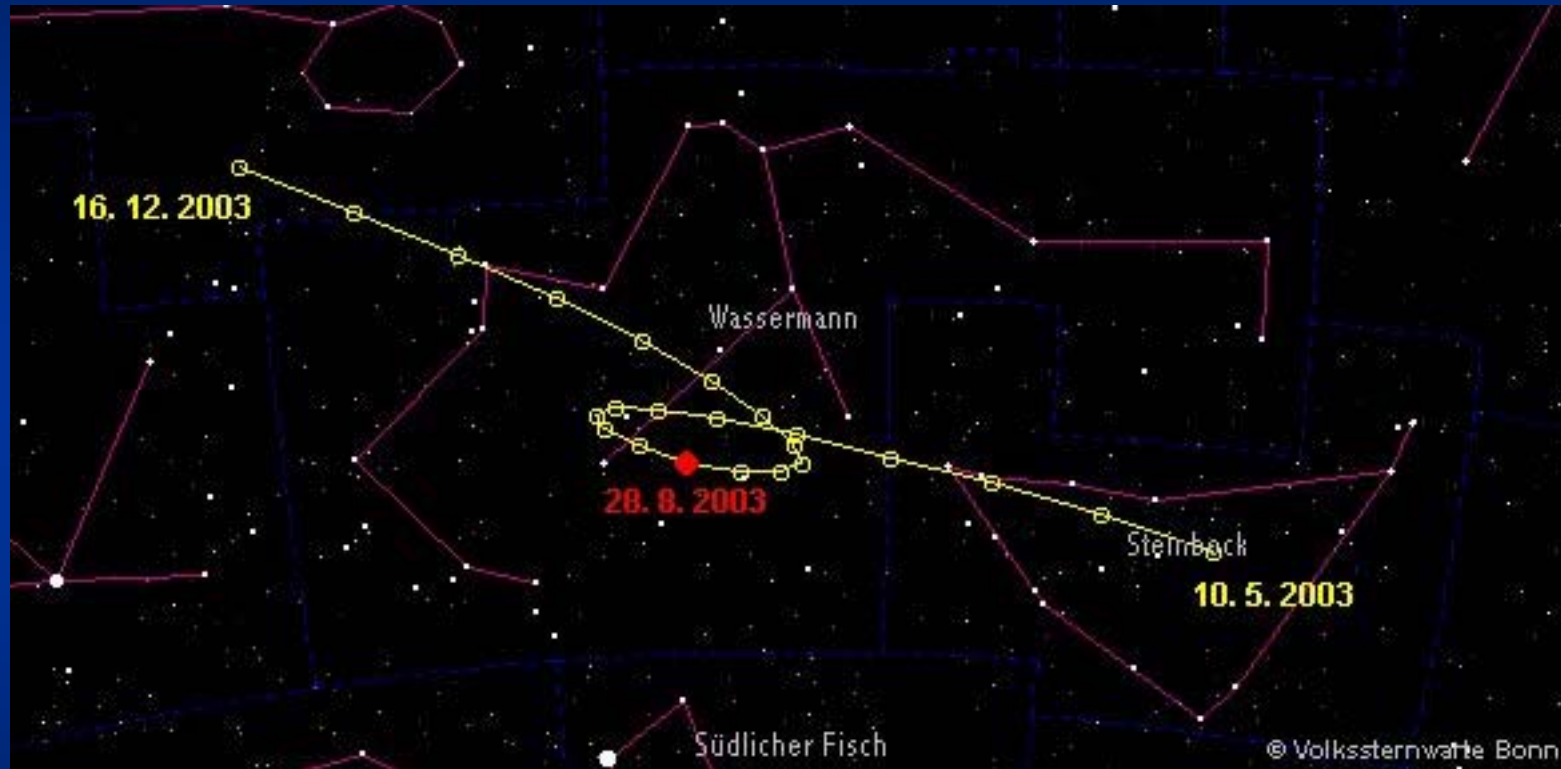
scheinbare Helligkeit:	Maximum	$m_v$	-2.9 <sup>m</sup>
	Minimum	$m_v$	+1.4 <sup>m</sup>
Opposition:	Maximum	$\angle$	25.2"
	Minimum	$\angle$	13.8"
Konjunktion:	Maximum	$\angle$	4.0"
	Minimum	$\angle$	3.5"

# 1.11 Mars

## 1.11.1 Allgemeines und physische Daten

1.11.1.2

Beobachtung: Oppositionsschleife

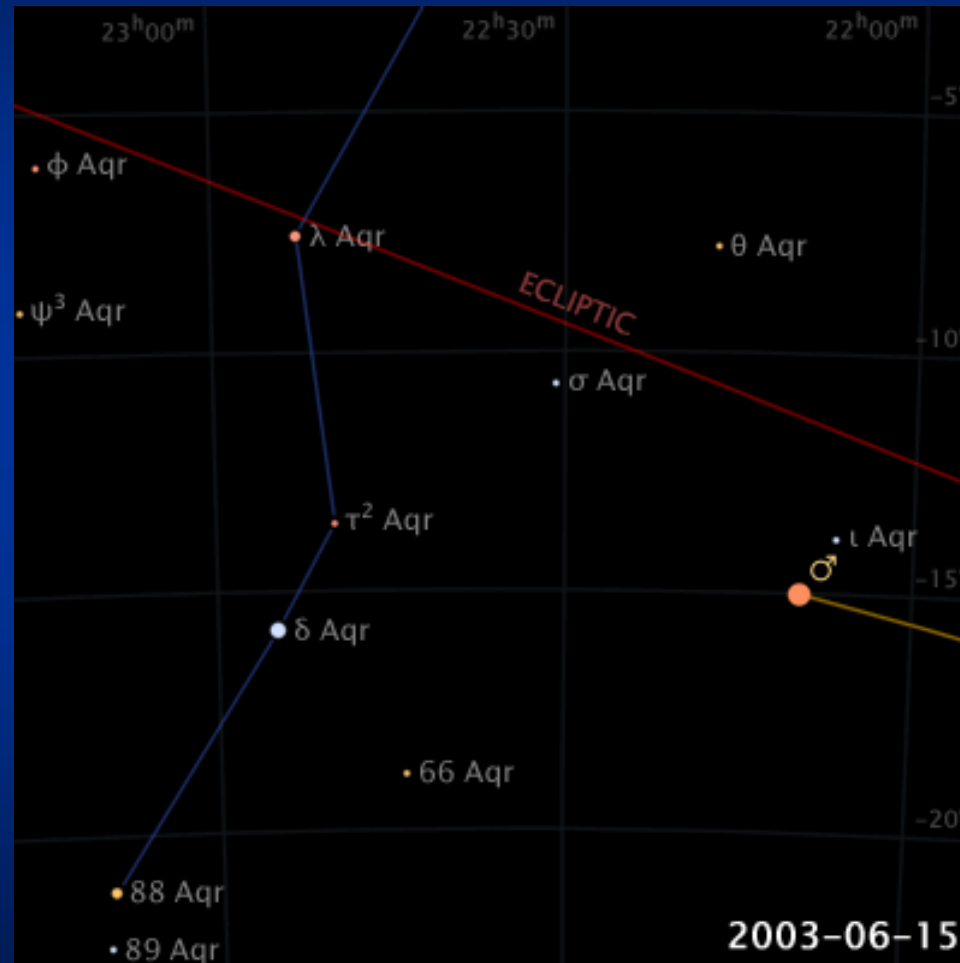


2003

# 1.11 Mars

## 1.11.1 Allgemeines und physische Daten

### 1.11.1.2 Beobachtung: Oppositionsschleife



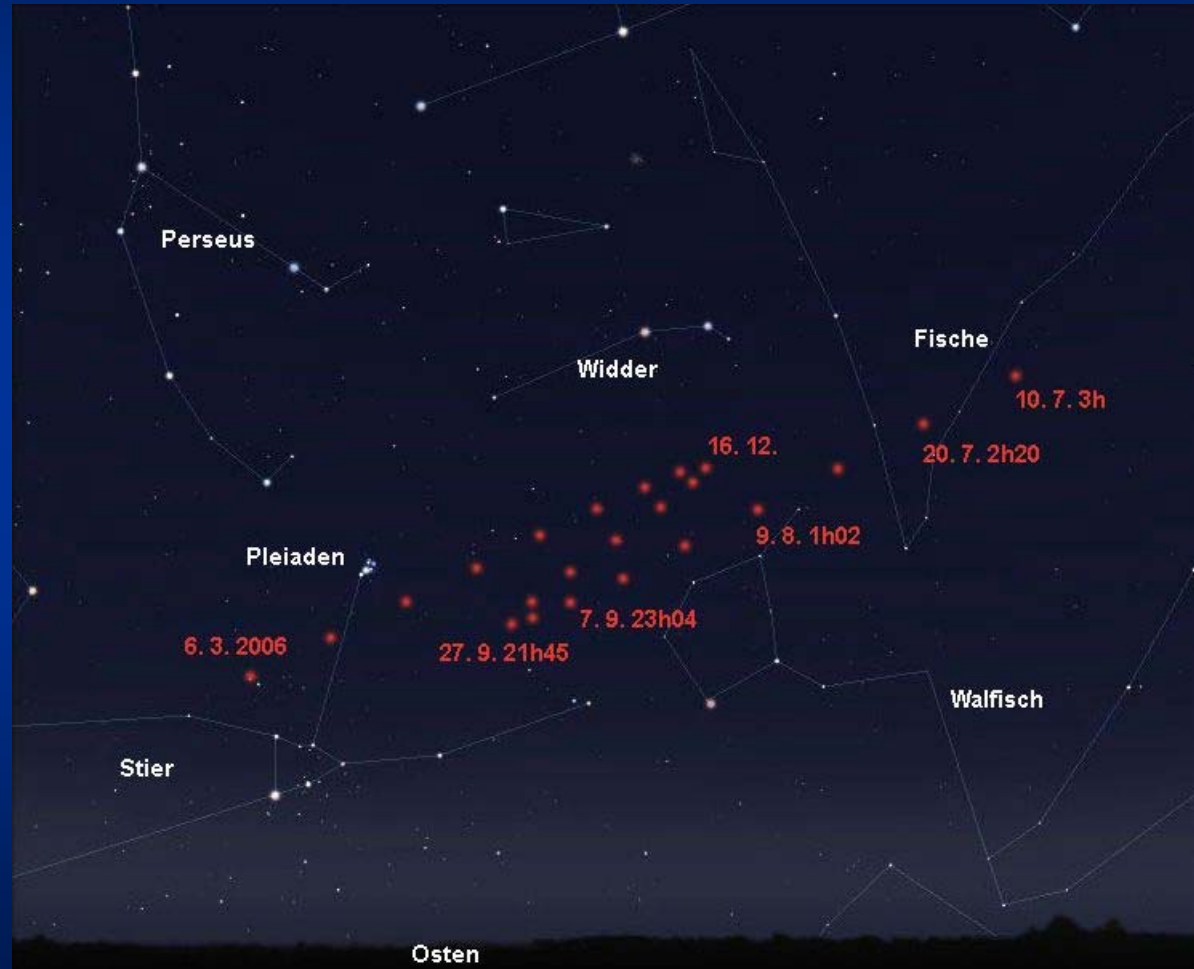
2003 [Eugene Alvin Villar]

# 1.11 Mars

## 1.11.1 Allgemeines und physische Daten

1.11.1.2

Beobachtung: Oppositionsschleife

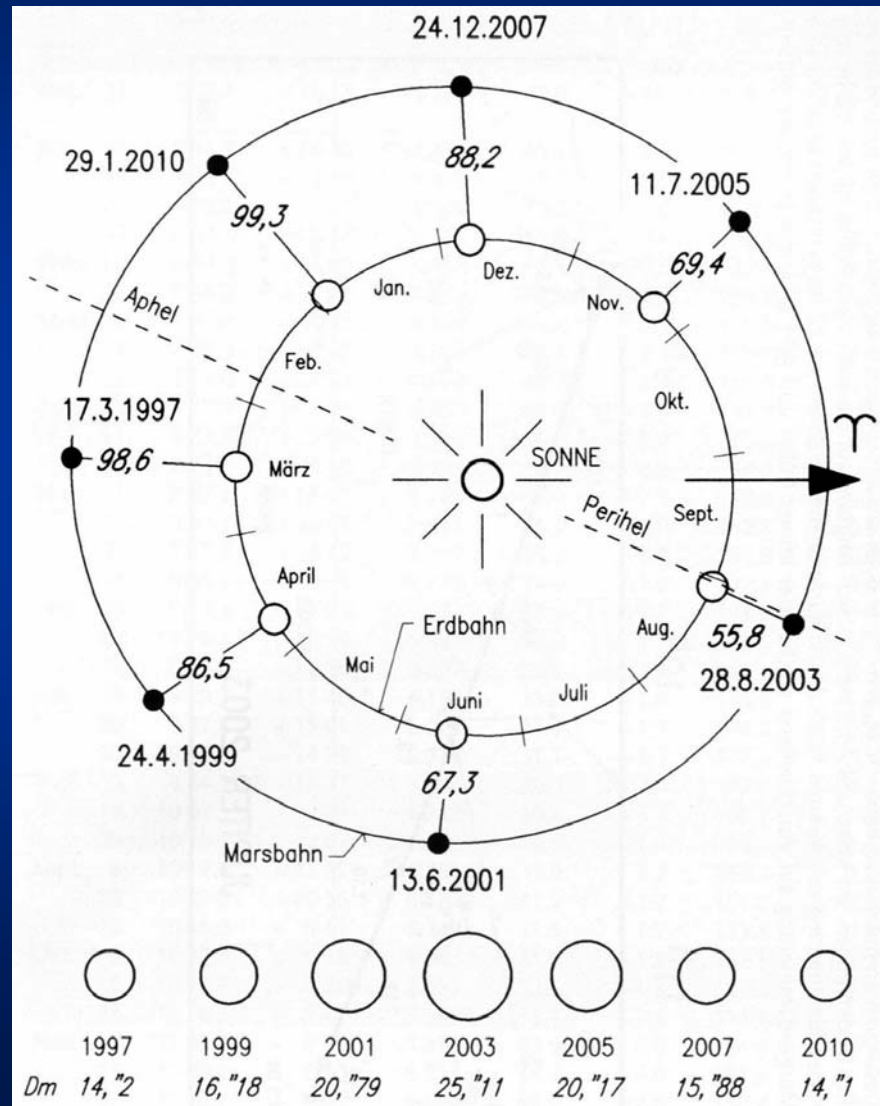


2005-2006

# 1.11 Mars

## 1.11.1 Allgemeines und physische Daten

### 1.11.1.2 Beobachtung: Oppositionen

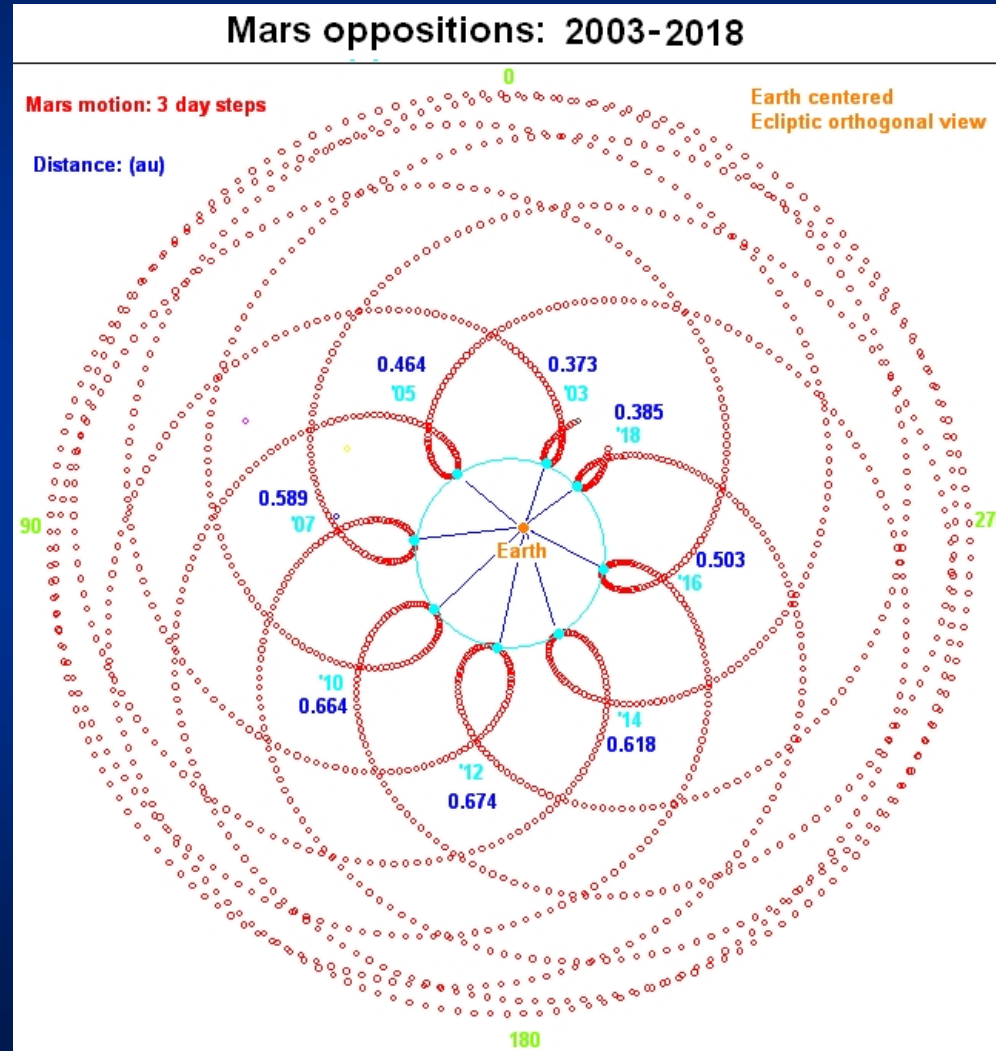




# 1.11 Mars

## 1.11.1 Allgemeines und physische Daten

### 1.11.1.2 Beobachtung: Oppositionen

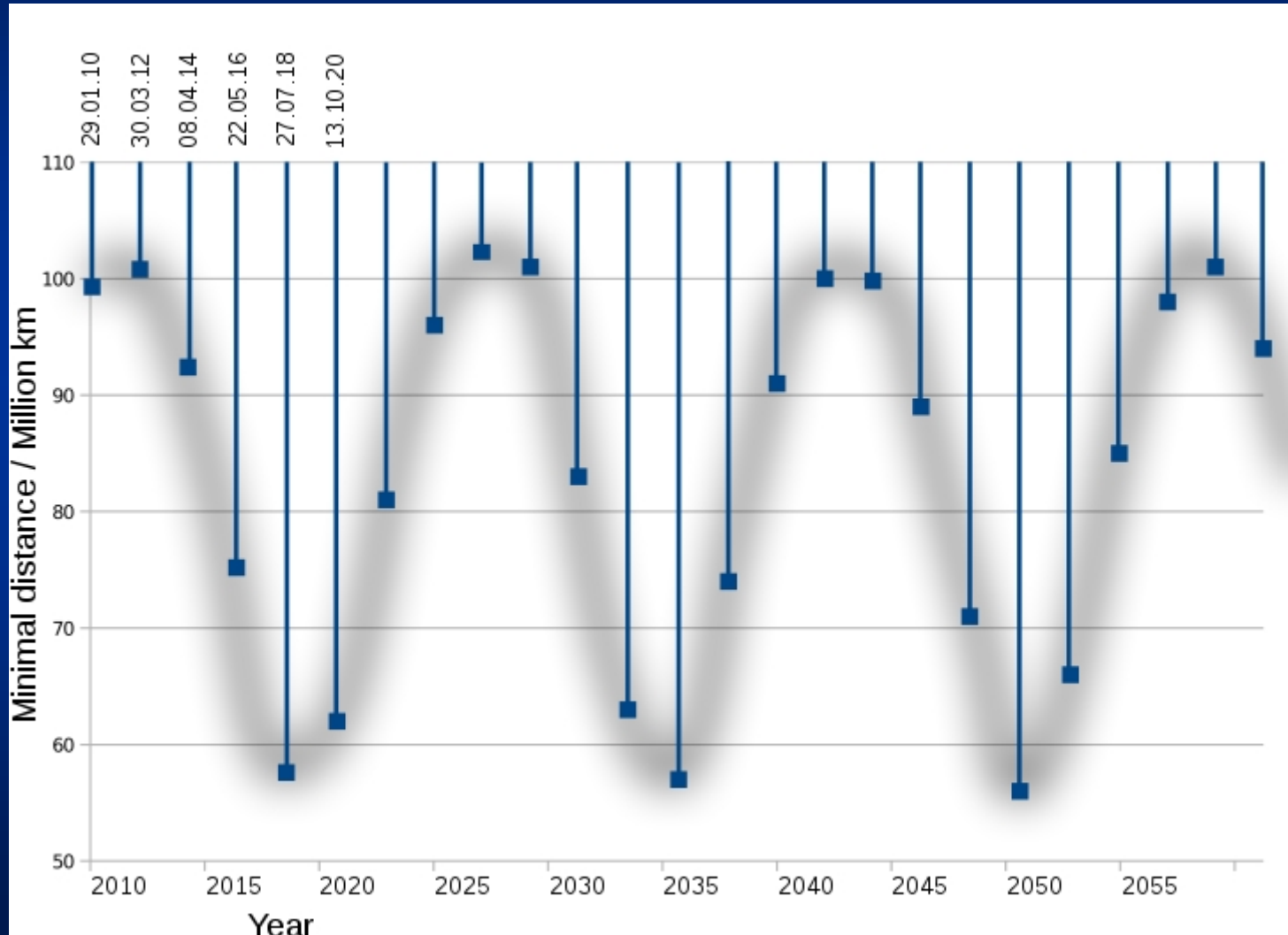


# 1.11 Mars

## 1.11.1 Allgemeines und physische Daten

### 1.11.1.2

### Beobachtung: Oppositionen



# 1.11 Mars

## 1.11.1 Allgemeines und physische Daten

1.11.1.3

Physische Daten



Größenvergleich

# 1.11 Mars

## 1.11.1 Allgemeines und physische Daten

### 1.11.1.3 Physische Daten

#### Physische Daten:

Masse:	M	$6.419 \cdot 10^{24} \text{ kg}$	0.107 Erdmassen	
Volumen:	V	$1.632 \cdot 10^{11} \text{ km}^3$	0.151 Erdvolumina	
mittlere Dichte:	$\rho$	$3.933 \text{ g cm}^{-3}$	0.713 mittl. Erddichte	
Schwerebeschleunigung:	g	$3.71 \text{ m s}^{-2}$	0.379 Erdbeschleunigung	
Äquatorradius:	$R_{\text{Ä}}$	3'397 km	0.533 Erdradius	
Polradius:	$R_{\text{P}}$	3'390 km	0.531 Erdradius	
Abplattung:	E	0.0065 (= 1/154)	1.93 Erdabplattung	
Fluchtgeschwindigkeit:	$v_{\text{F}}$	5.03 km/s	0.450 2. kosm. Geschw.	
siderische Rotationsperiode:	$P_{\text{rot}}$	24.623 h	(= 24 <sup>h</sup> 37 <sup>m</sup> 23 <sup>s</sup> )	(„Mars-Sterntag“)
synodische " :	$P_{\text{rot}}$	24.660 h	(=24 <sup>h</sup> 39 <sup>m</sup> 35 <sup>s</sup> )	(„Marstag“)
Äquatorneigung ./ . Bahn:	$i_{\text{Ä}}$	25.14°	(Erde: 23.45°)	

**Der Marstag wird auch „Sol“ genannt.**

# 1.11 Mars

## 1.11.2 Planetares Umfeld

### 1.11.2.1

### Atmosphäre

#### Oberfläche / Atmosphäre:

Druck:	$p_0$	6.36 hPa	(4.0 ... 8.7 hPa)	(Erde: 1'013 hPa $\approx$ 1 bar)
Gesamtmasse:	$M_{\text{Atm}}$	$\sim 2.5 \cdot 10^{16}$ kg		
mittlere Temperatur:	$T_0$	$\sim 210$ K	(= -63°C)	(184 ... 272 K)
Albedo:	$A$	0.250		(Erde: 0.306)

**Die starken Druckveränderungen in der Marsatmosphäre werden durch das jahreszeitliche Ausfrieren von hauptsächlich Kohlendioxid an den Polen im Nord- bzw. Südwinter ausgelöst. Dann herrscht der niedrigste Druck. Der Druck steigt in den Auftau-Phasen wieder an.**

# 1.11 Mars

## 1.11.2 Planetares Umfeld

### 1.11.2.1 Atmosphäre

#### Oberfläche / Atmosphäre:

Druck:	$p_0$	6.36 hPa	(4.0 ... 8.7 hPa)	(Erde: 1'013 hPa $\approx$ 1 bar)
Gesamtmasse:	$M_{\text{Atm}}$	$\sim 2.5 \cdot 10^{16}$ kg		
mittlere Temperatur:	$T_0$	$\sim 210$ K	(= -63°C)	(184 ... 272 K)
Albedo:	A	0.250		(Erde: 0.306)

#### Zusammensetzung der Atmosphäre / %:

Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	95.3
Stickstoff (N <sub>2</sub> )	2.7
Argon (Ar)	1.6
Sauerstoff (O <sub>2</sub> )	0.13
Kohlenmonoxid (CO)	0.08
Wasser (H <sub>2</sub> O)	0.021
Stickstoffmonoxid (NO)	0.010
Neon (Ne)	0.00025
Spuren von:	
Schwerem Wasser (HDO), Krypton (Kr), Xenon (Xe)	

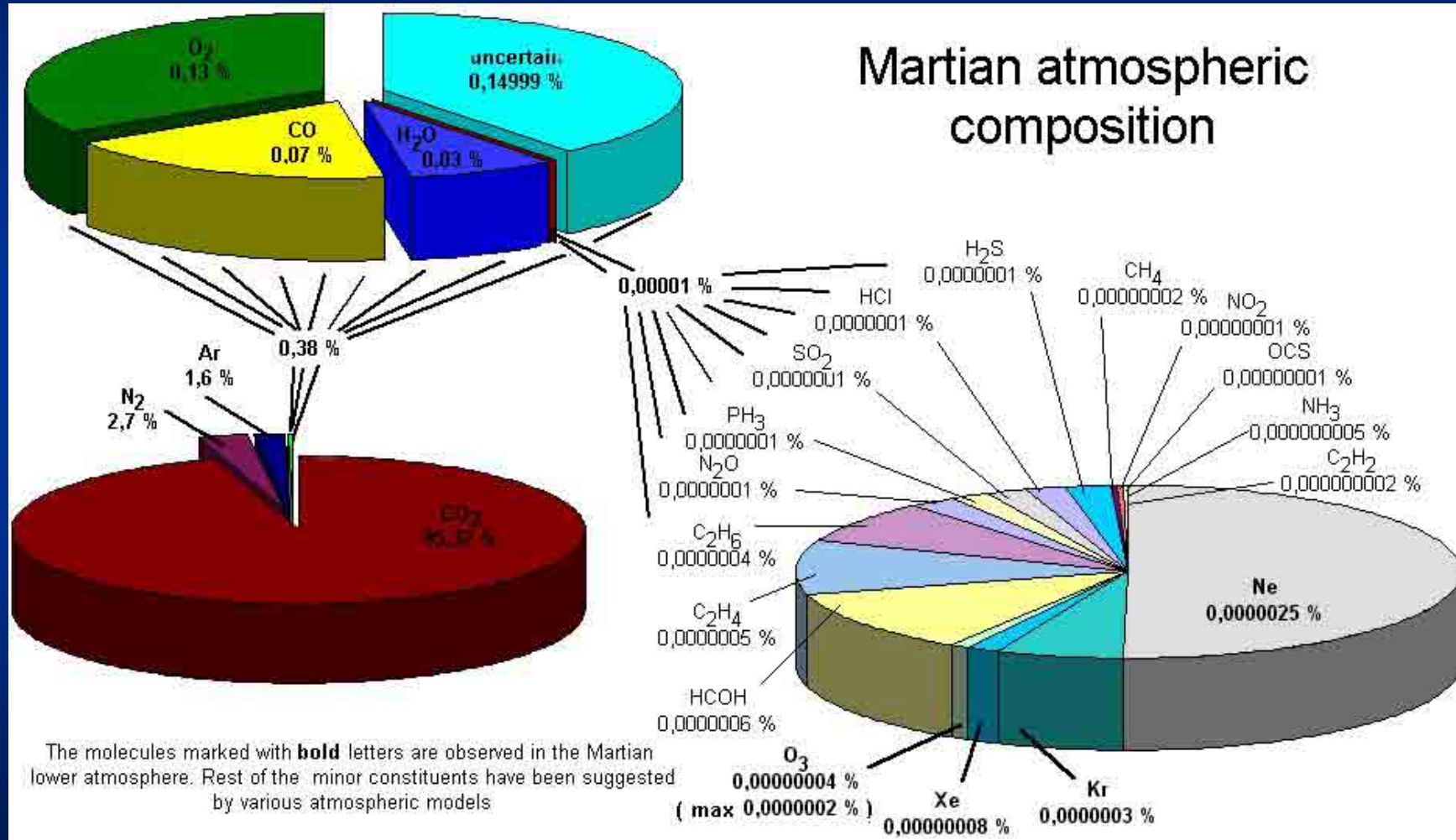


# 1.11 Mars

## 1.11.2 Planetares Umfeld

### 1.11.2.1

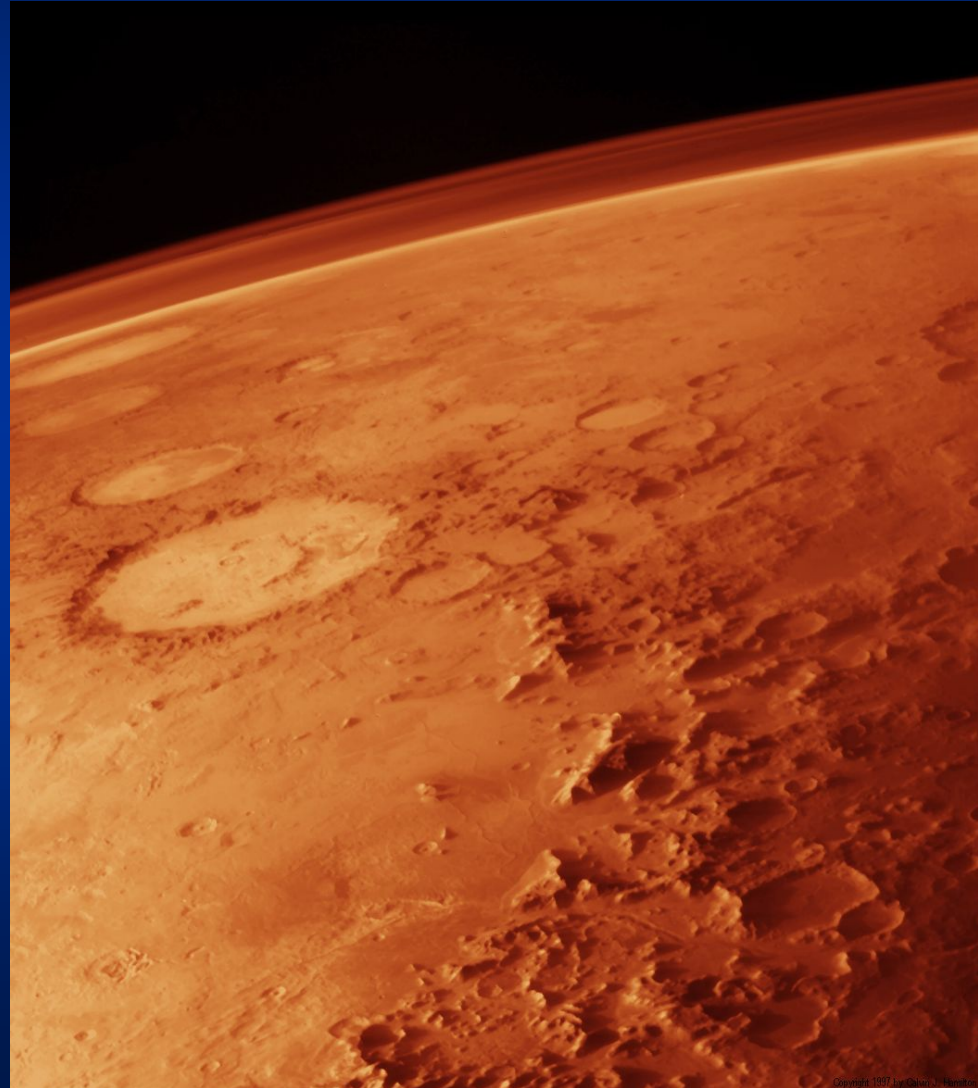
### Atmosphäre



# 1.11 Mars

## 1.11.2 Planetares Umfeld

### 1.11.2.1 Atmosphäre



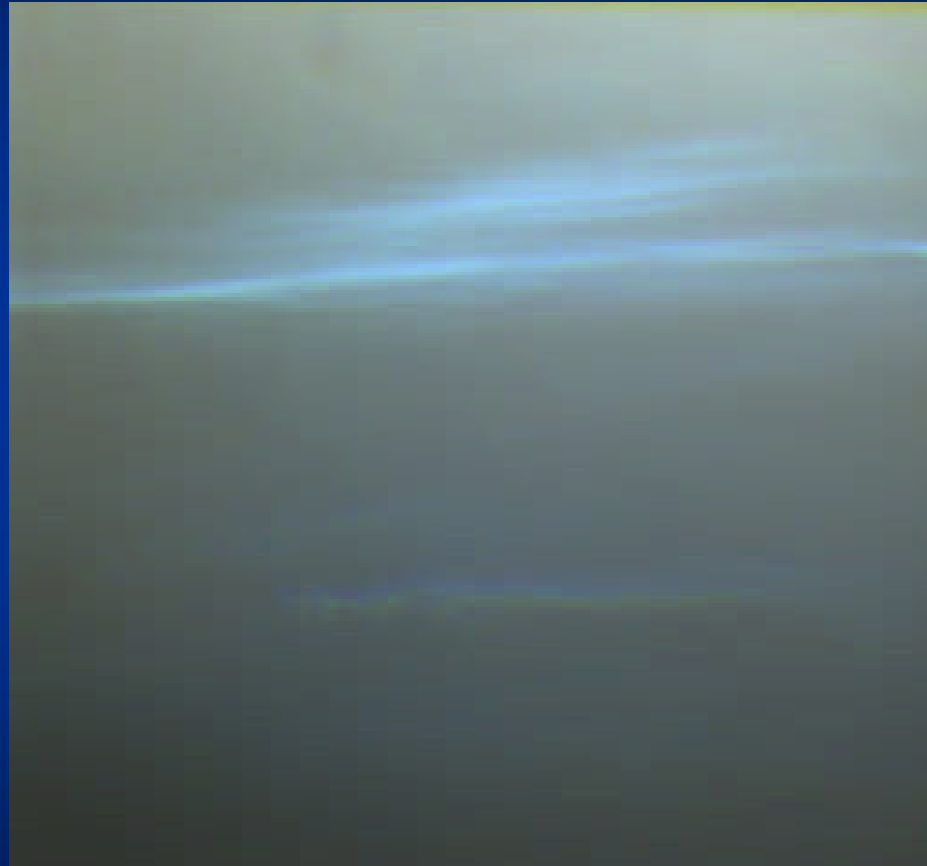
Argyre Planitia und Krater Galle  
[NASA Viking 1 Orbiter]



# 1.11 Mars

## 1.11.2 Planetares Umfeld

### 1.11.2.1 Atmosphäre



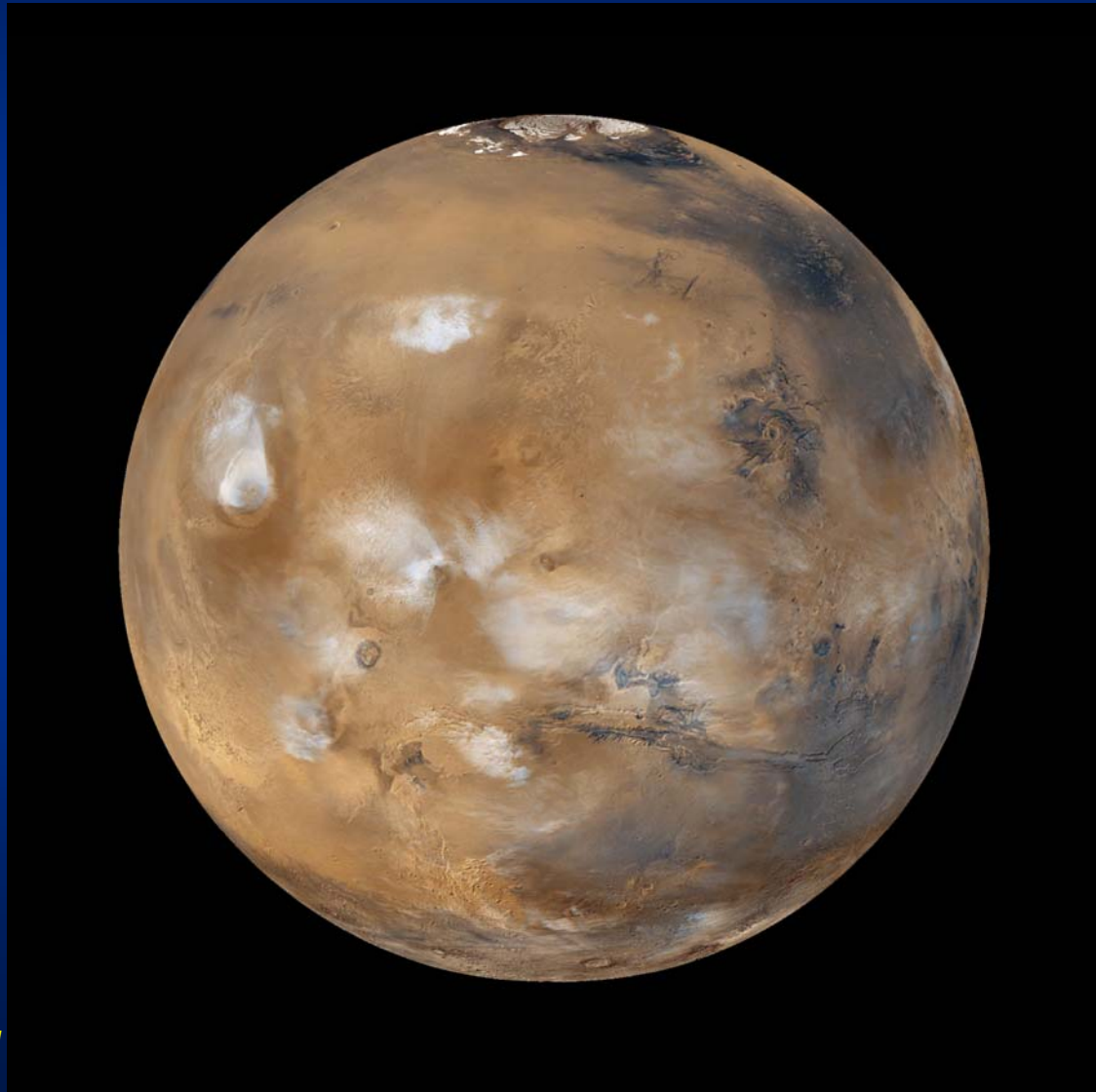
Eiswolken  
[NASA Pathfinder]

# 1.11 Mars

## 1.11.2 Planetares Umfeld

### 1.11.2.1

### Atmosphäre



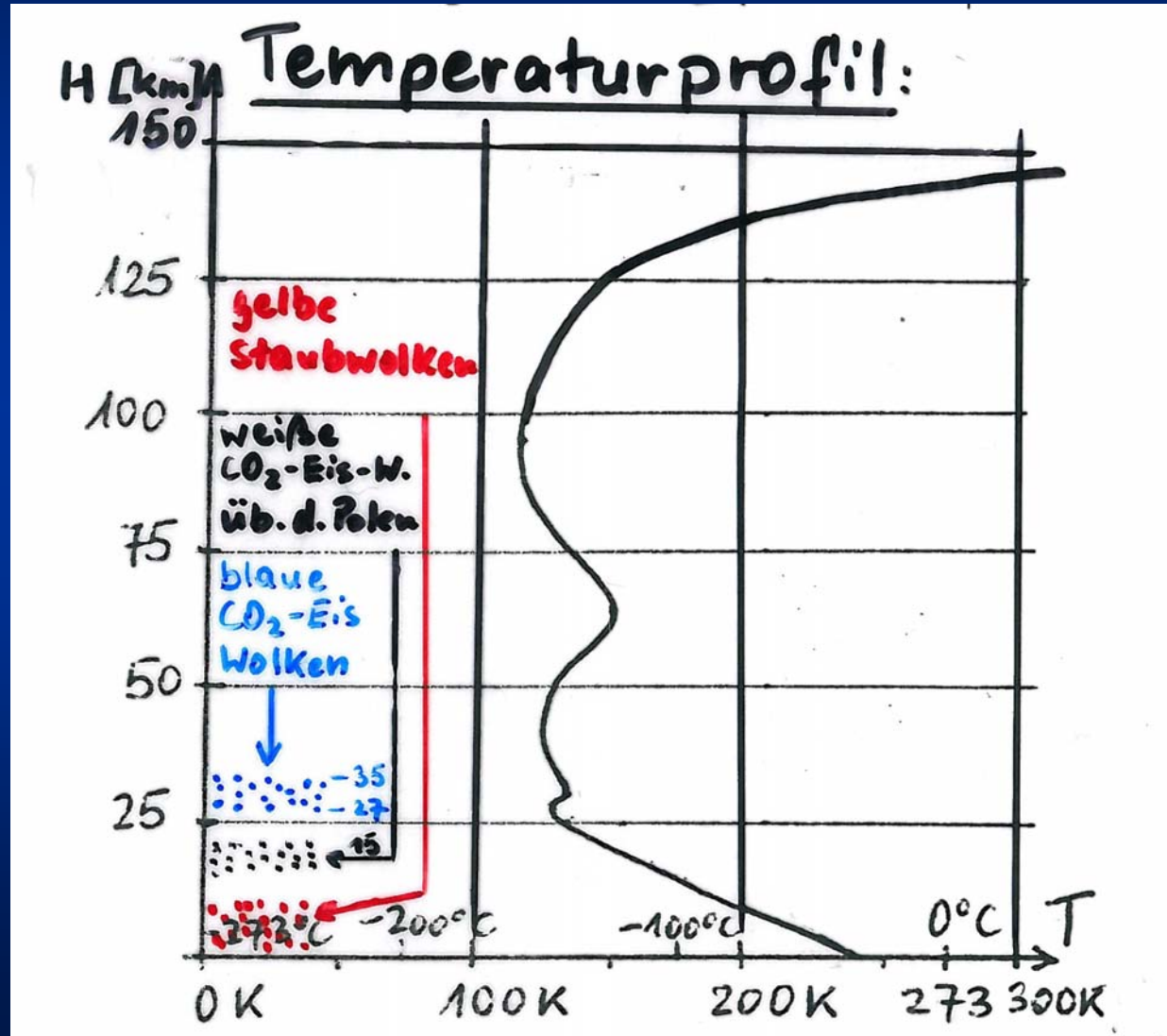
Wassereiswolken

[NASA Mars Global Surveyor 1999-04]

# 1.11 Mars

## 1.11.2 Planetares Umfeld

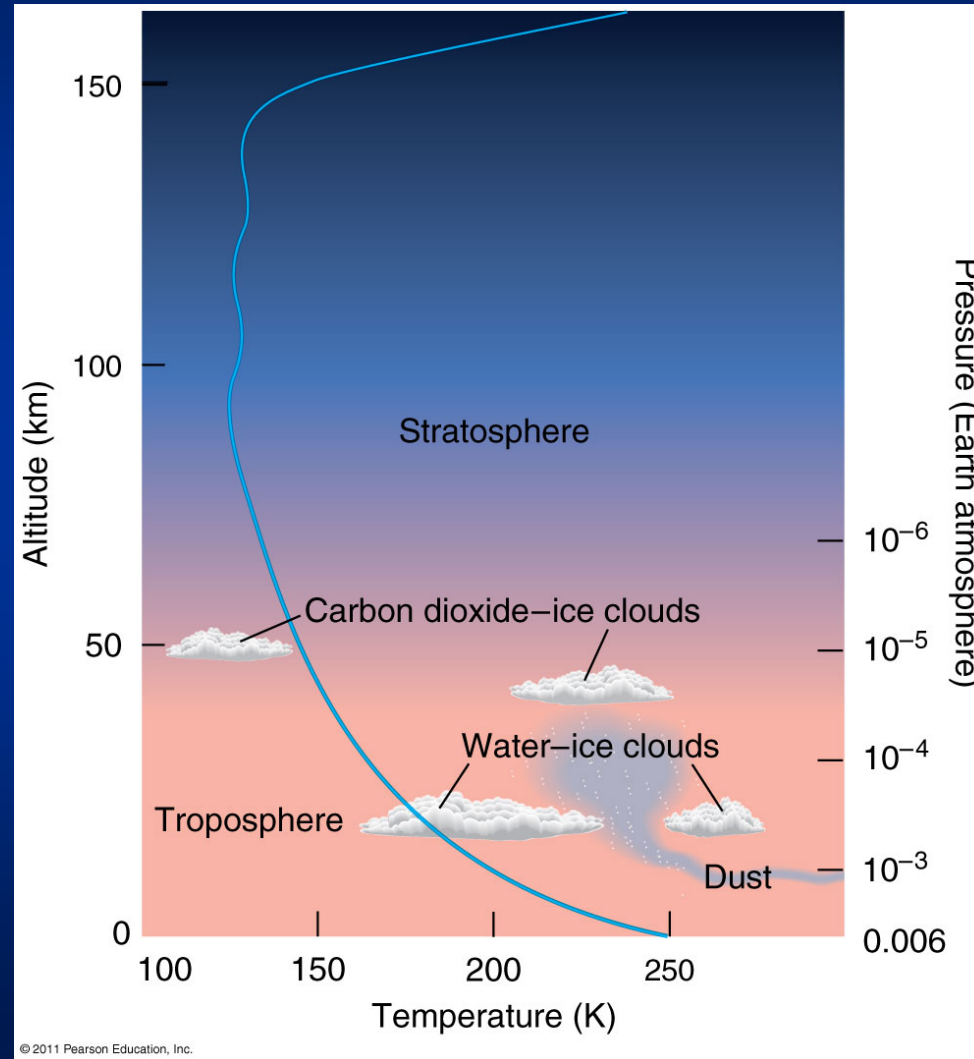
### 1.11.2.1 Atmosphäre



# 1.11 Mars

## 1.11.2 Planetares Umfeld

### 1.11.2.1 Atmosphäre

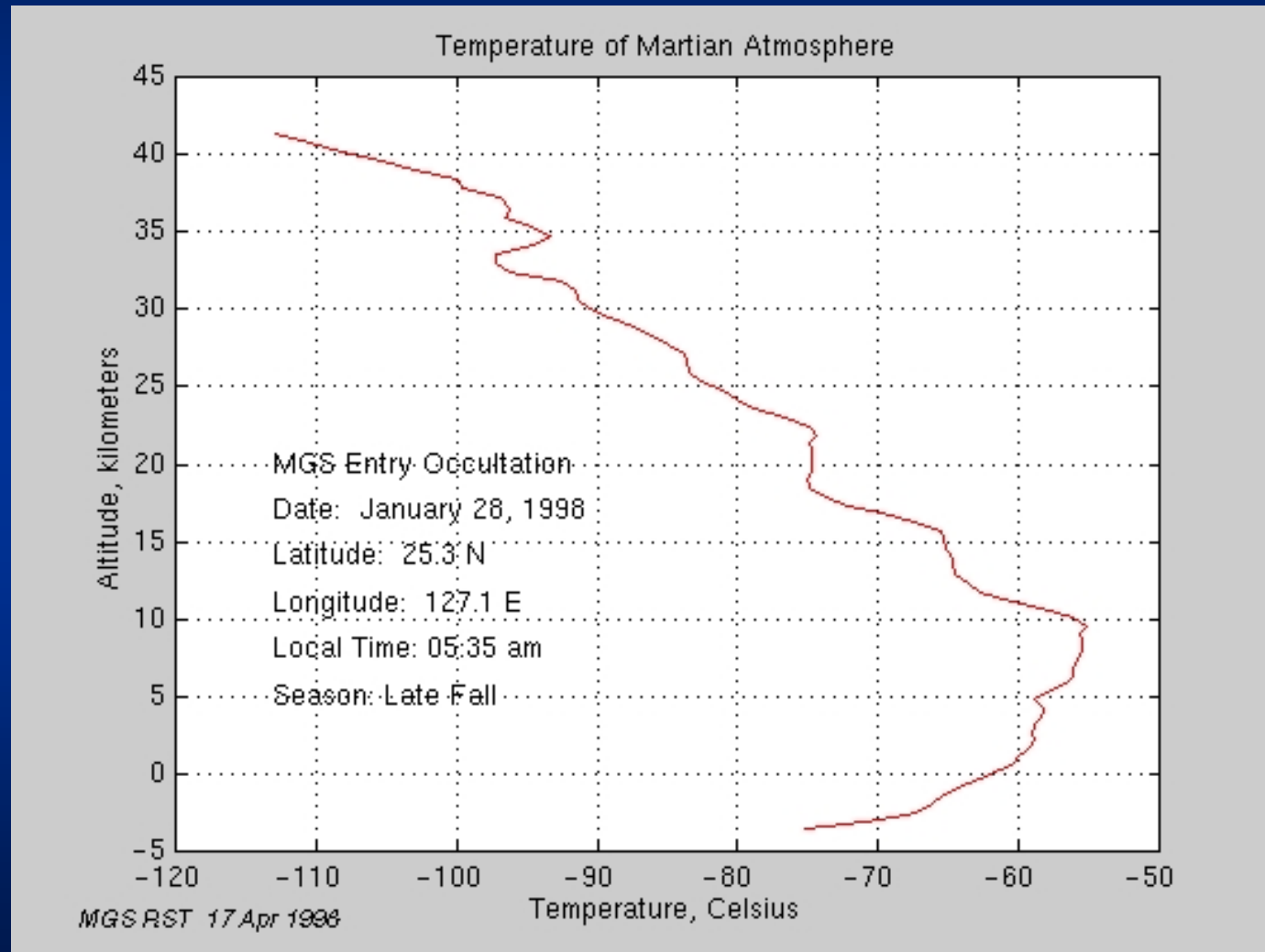


© 2011 Pearson Education, Inc.

# 1.11 Mars

## 1.11.2 Planetares Umfeld

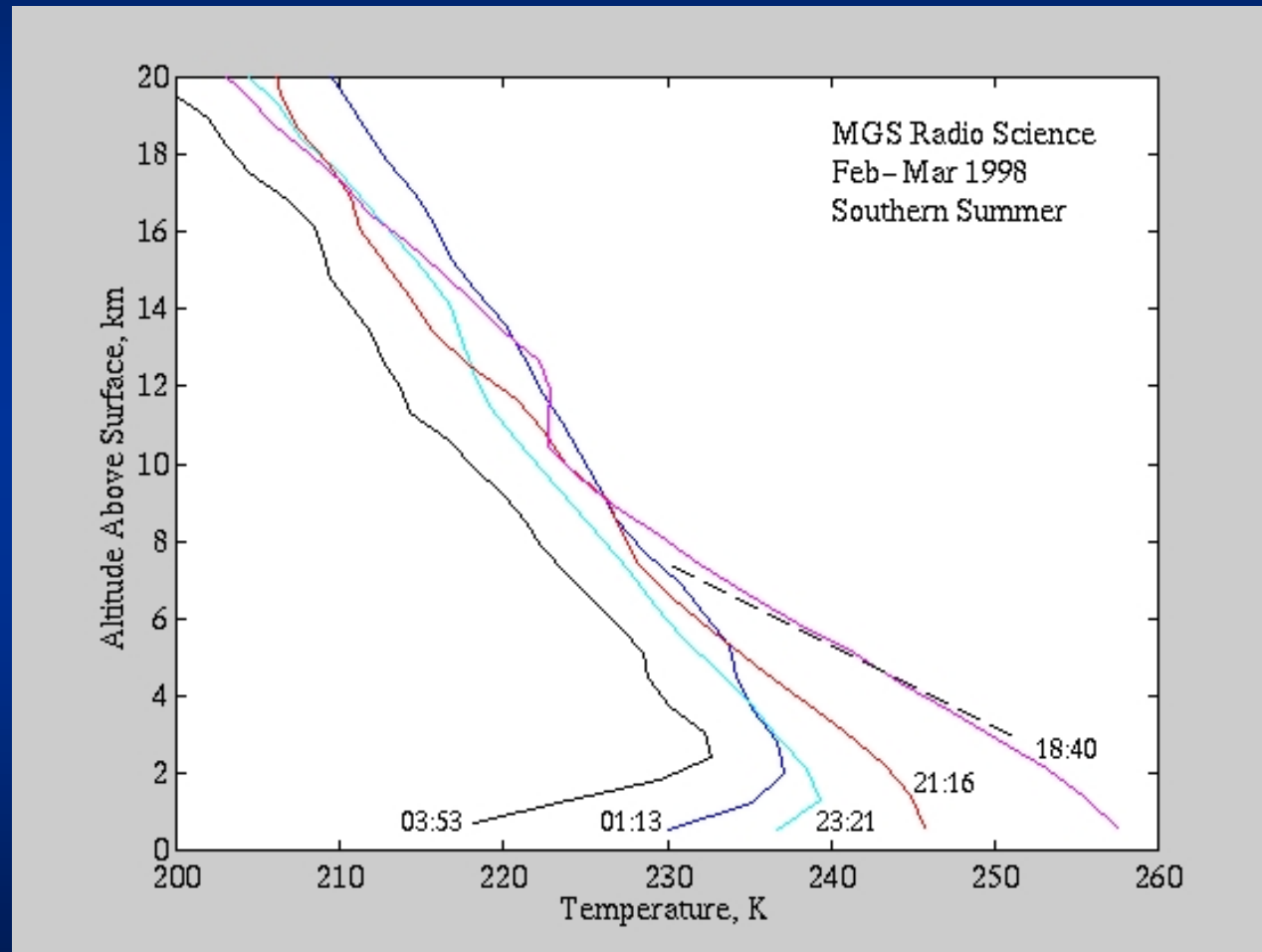
### 1.11.2.1 Atmosphäre



# 1.11 Mars

## 1.11.2 Planetares Umfeld

### 1.11.2.1 Atmosphäre

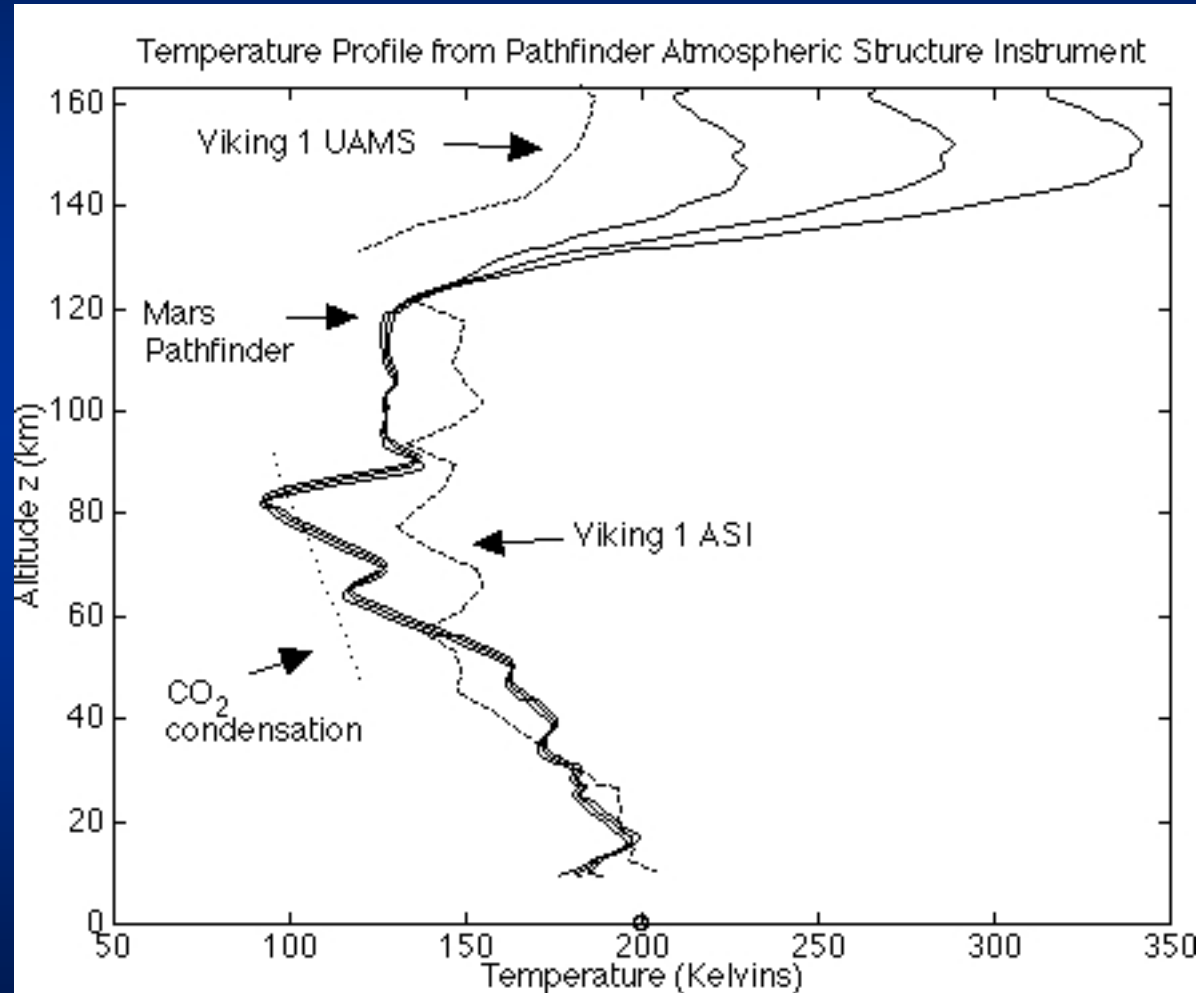


**Tägliche Temperatur-Entwicklung der Grenzschicht im Südsommer.**

# 1.11 Mars

## 1.11.2 Planetares Umfeld

### 1.11.2.1 Atmosphäre



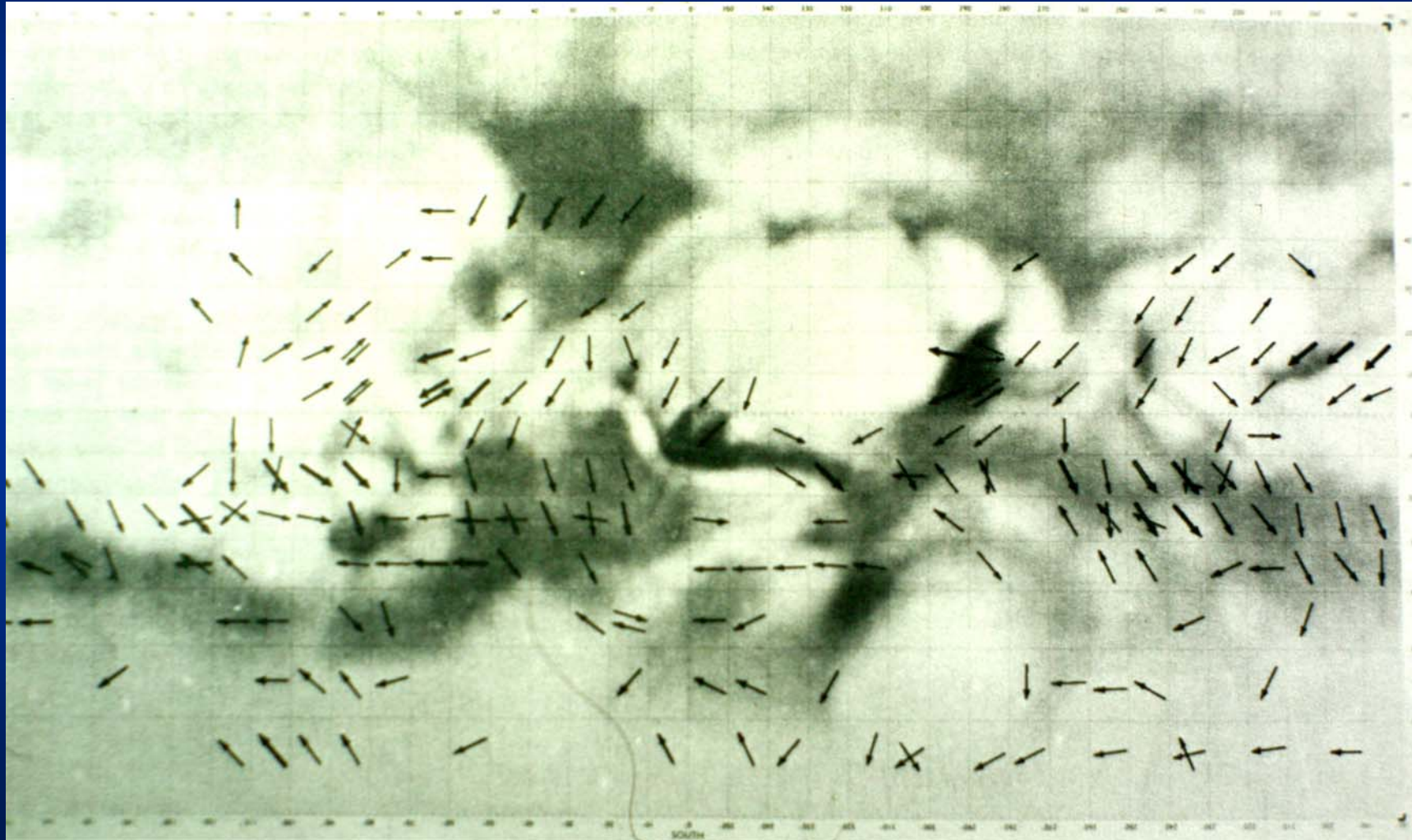
Temperatur-Profil nach Sonden-Messungen



# 1.11 Mars

## 1.11.2 Planetares Umfeld

### 1.11.2.1 Atmosphäre - Winde



Windkarte [NASA Mariner 9]

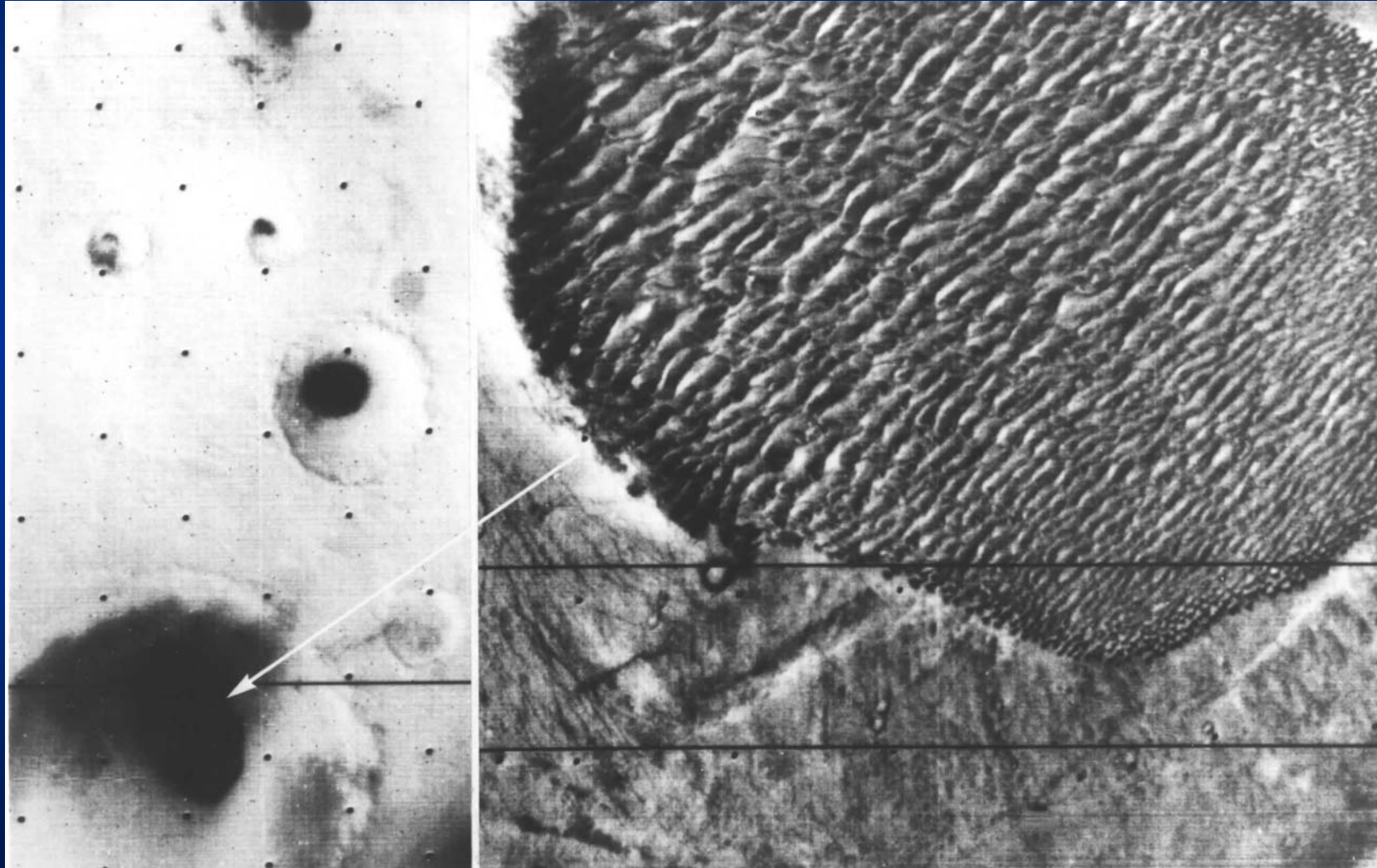


# 1.11 Mars

## 1.11.2 Planetares Umfeld

### 1.11.2.1

### Atmosphäre - Winde



[NASA Mariner 9]

# 1.11 Mars

## 1.11.2 Planetares Umfeld

1.11.2.1

Atmosphäre - Winde



# 1.11 Mars

## 1.11.2 Planetares Umfeld

### 1.11.2.1 Atmosphäre - Trübung



„Aktuelle Astronomie – Einführungskurs“ von Dr. Jürgen Wirth © 2016

### Sonnenaufgang

[NASA Viking 2 Lander 1978-06-14]

# 1.11 Mars

## 1.11.2 Planetares Umfeld

### 1.11.2.1 Atmosphäre - Trübung



### Sonnenuntergang

[NASA Mars Exploration Rover Spirit 2005-05-19 am Krater Gusev]

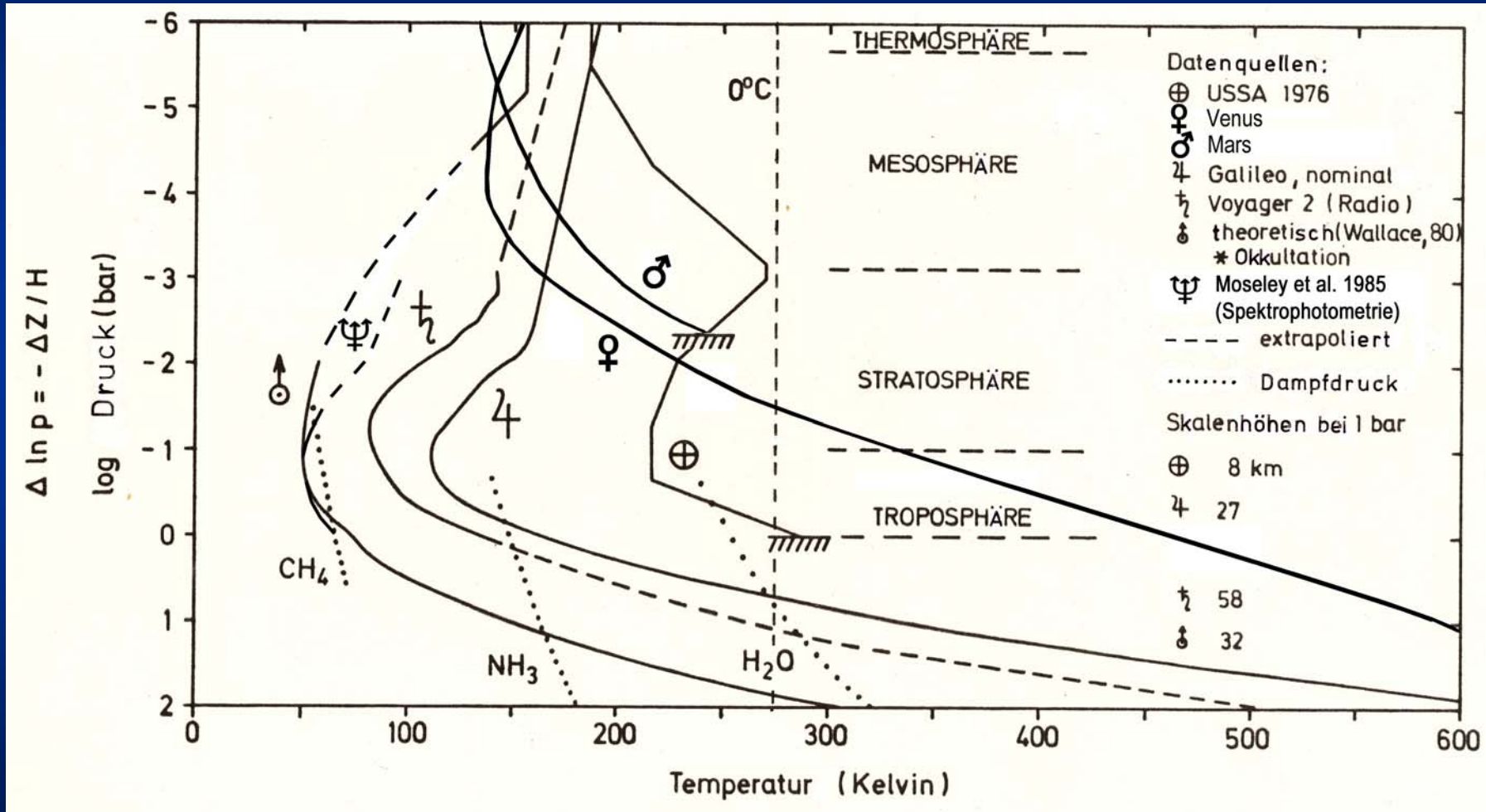


# 1.11 Mars

## 1.11.2 Planetares Umfeld

### 1.11.2.2

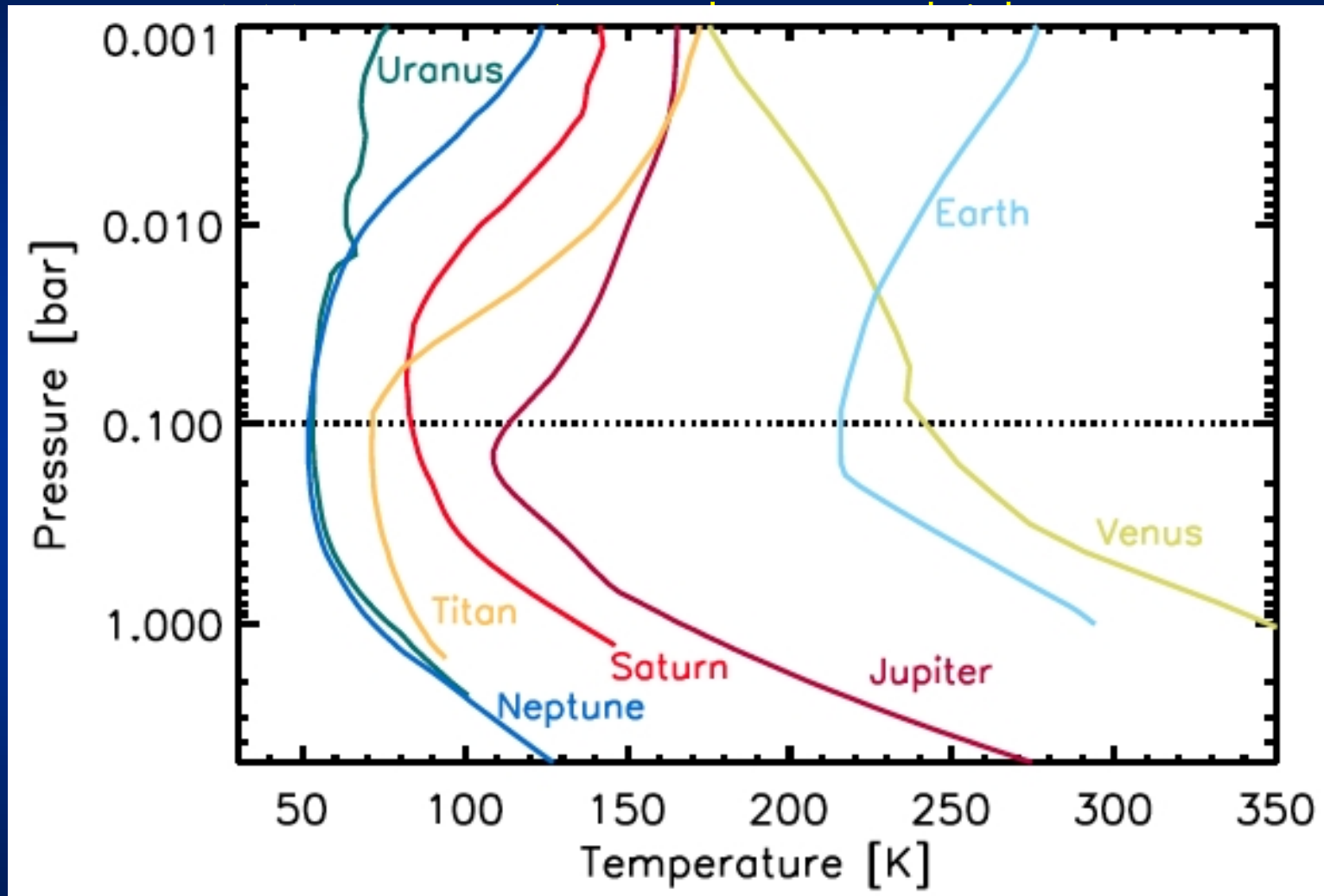
### Atmosphärenvergleich



Temperatur- und Druckverlauf der Planetenatmosphären im Vergleich

# 1.11 Mars

## 1.11.2 Planetares Umfeld



**Temperatur- und Druckverlauf der Planetenatmosphären im Vergleich**

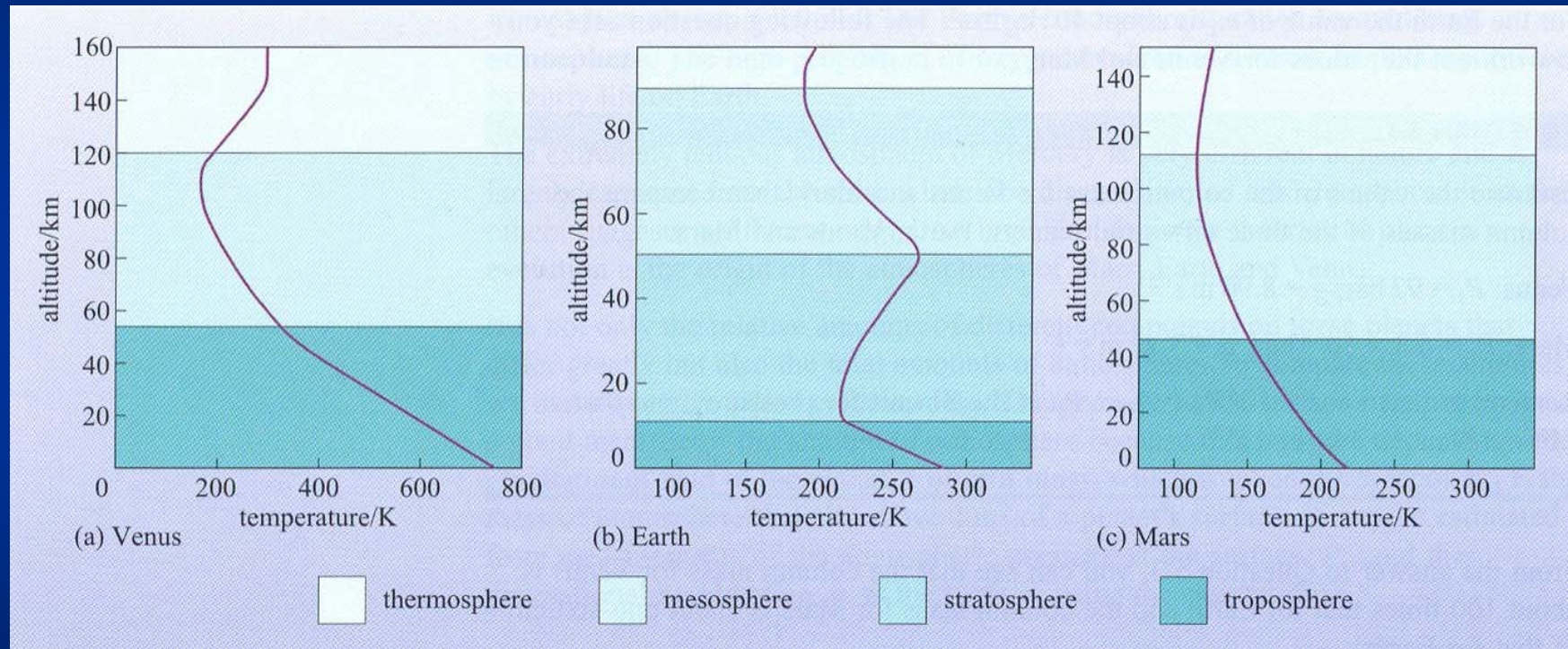
*[[Robinson Catling 2013]*

# 1.11 Mars

## 1.11.2 Planetares Umfeld

### 1.11.2.2

### Atmosphärenvergleich



**Temperatur- und Druckverlauf der Atmosphären von Venus, Erde und Mars im Vergleich**  
(Achtung: die Höhenskalen sind unterschiedlich!)

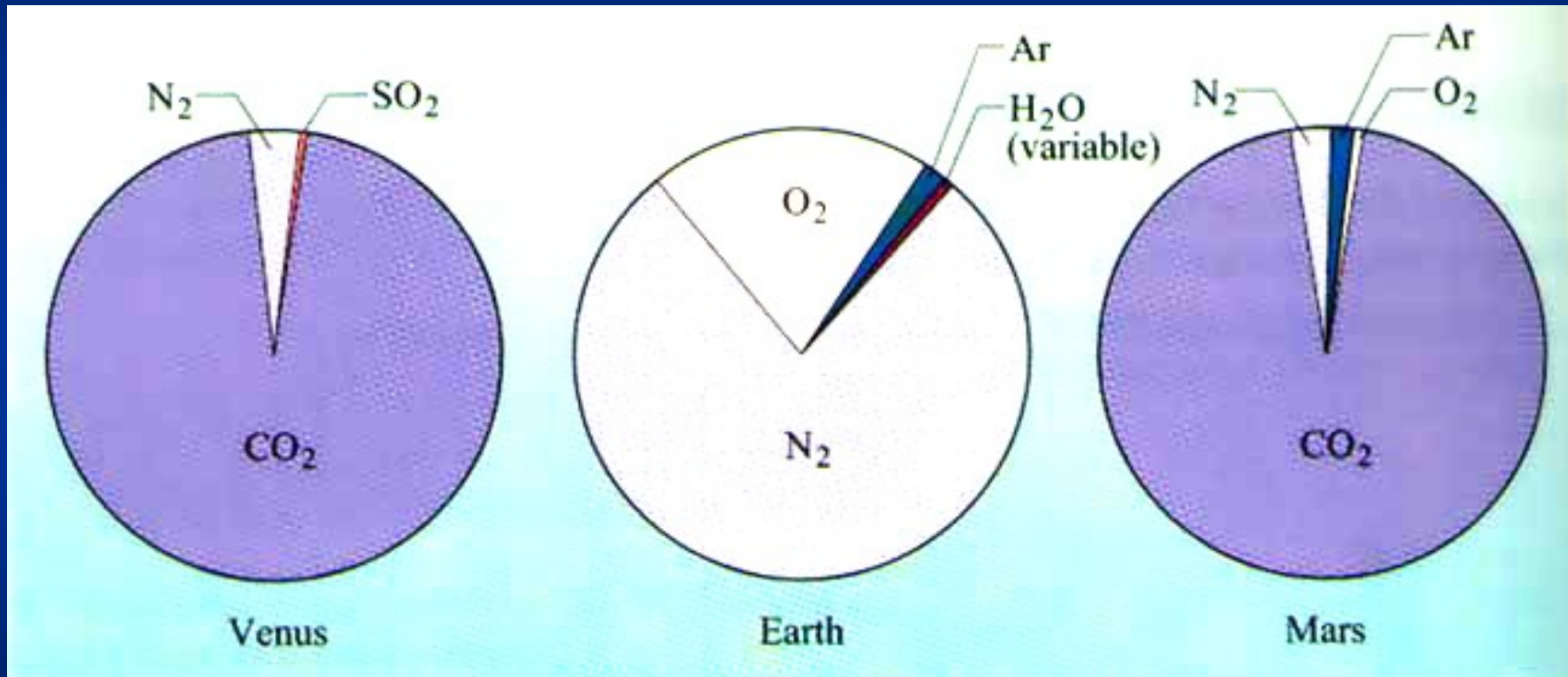


# 1.11 Mars

## 1.11.2 Planetares Umfeld

1.11.2.2

Atmosphärenvergleich



„Aktuelle Astronomie – Einführungskurs“ von Dr. Jürgen Wirth © 2016

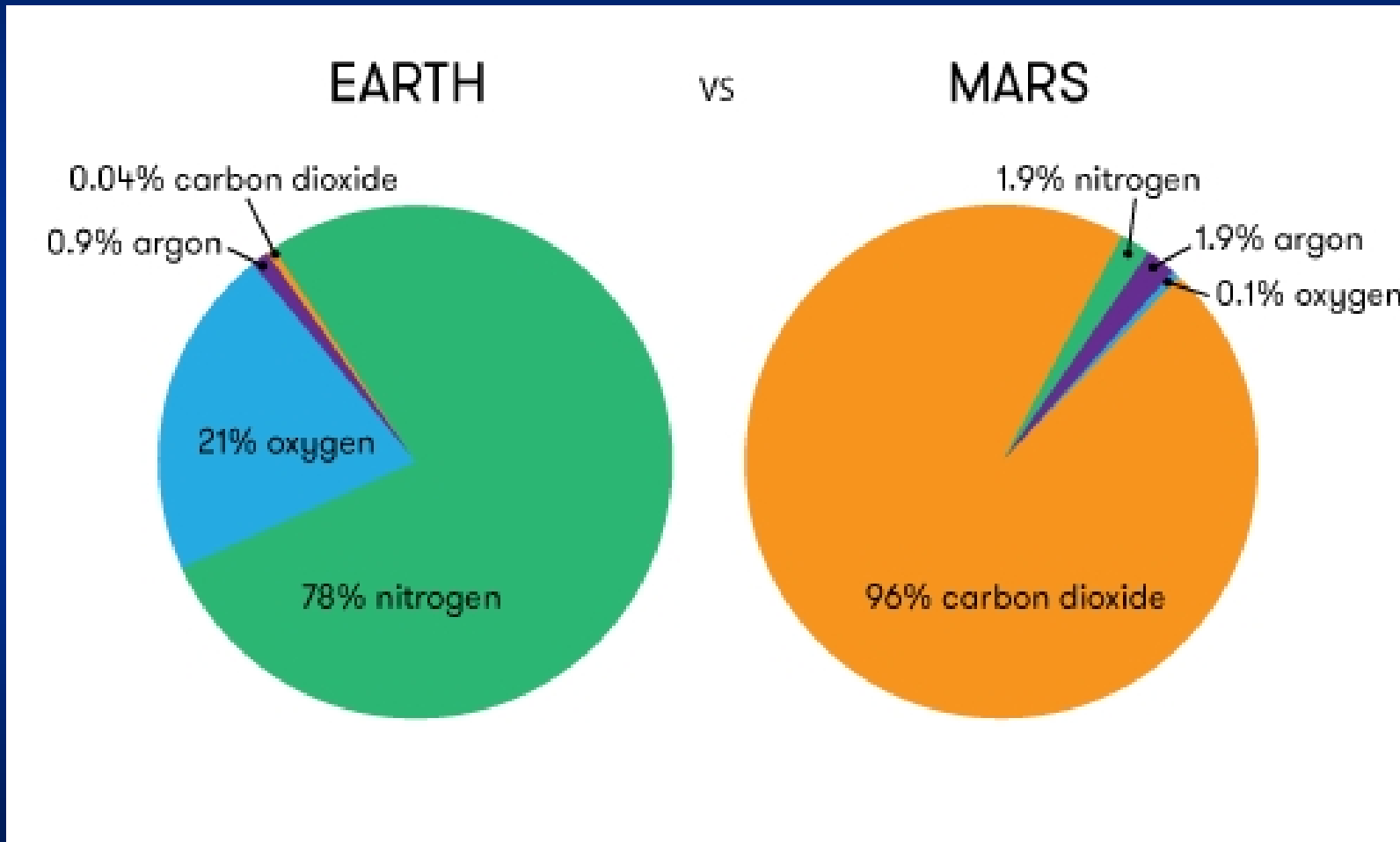
Zusammensetzung der Atmosphären von Venus, Erde und Mars im Vergleich

# 1.11 Mars

## 1.11.2 Planetares Umfeld

### 1.11.2.2

### Atmosphärenvergleich



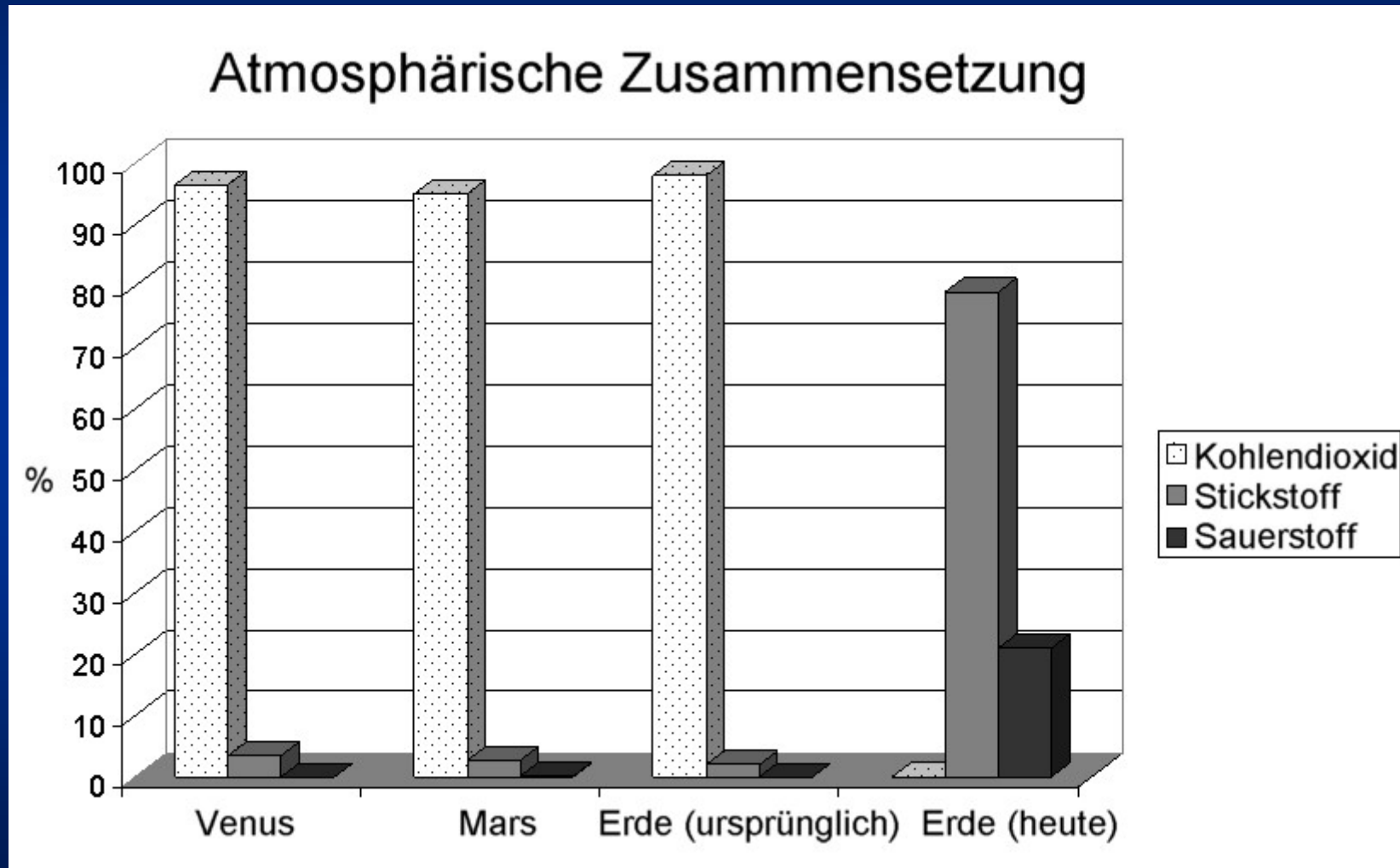
Zusammensetzung der Atmosphären von Erde und Mars im Vergleich

# 1.11 Mars

## 1.11.2 Planetares Umfeld

### 1.11.2.2

### Atmosphärenvergleich

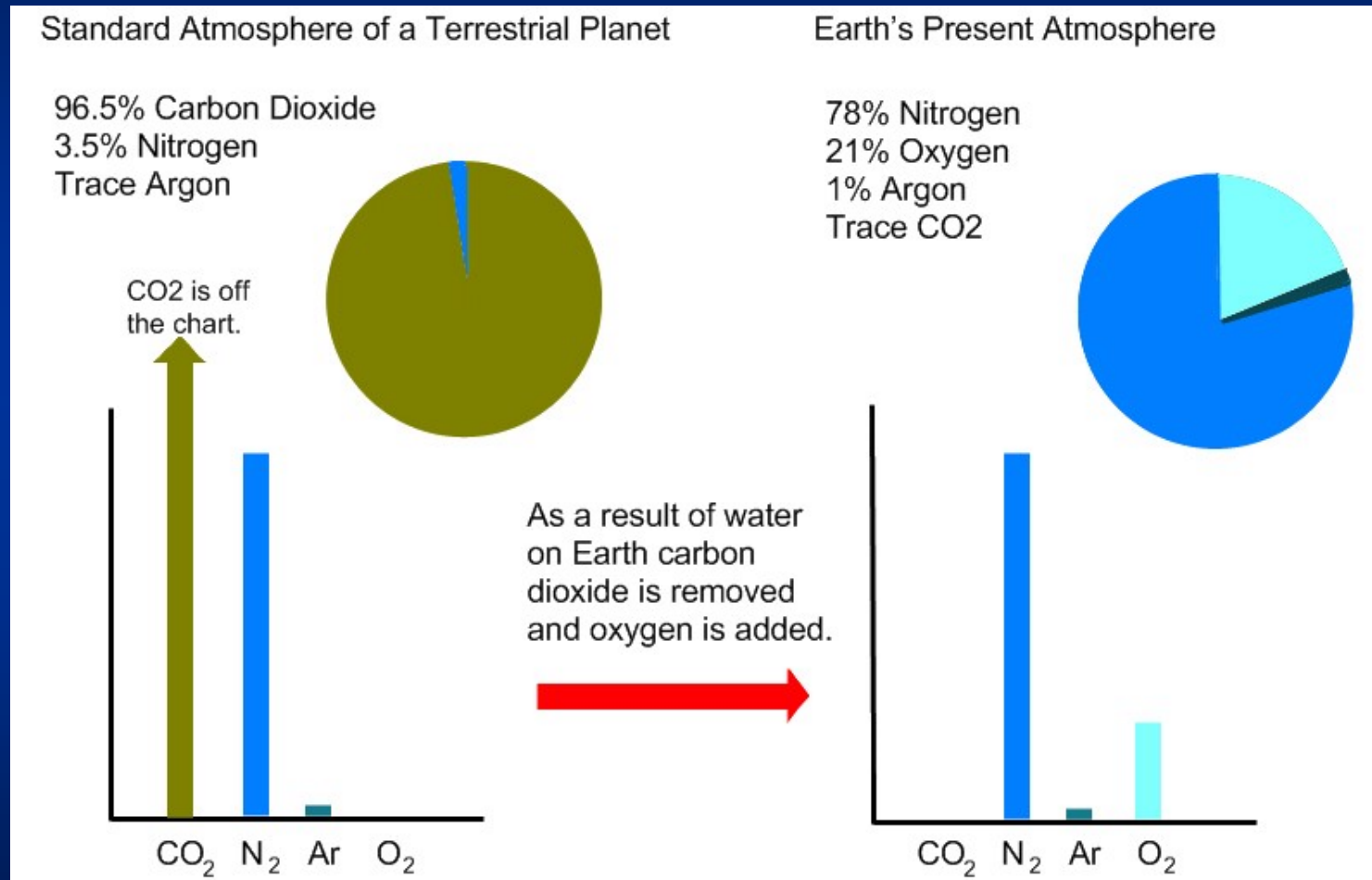


Zusammensetzung der Atmosphären von Venus, Erde und Mars im Vergleich

# 1.8 Erde

## 1.8.2 Planetares Umfeld

### 1.8.2.1 Atmosphärenentwicklung

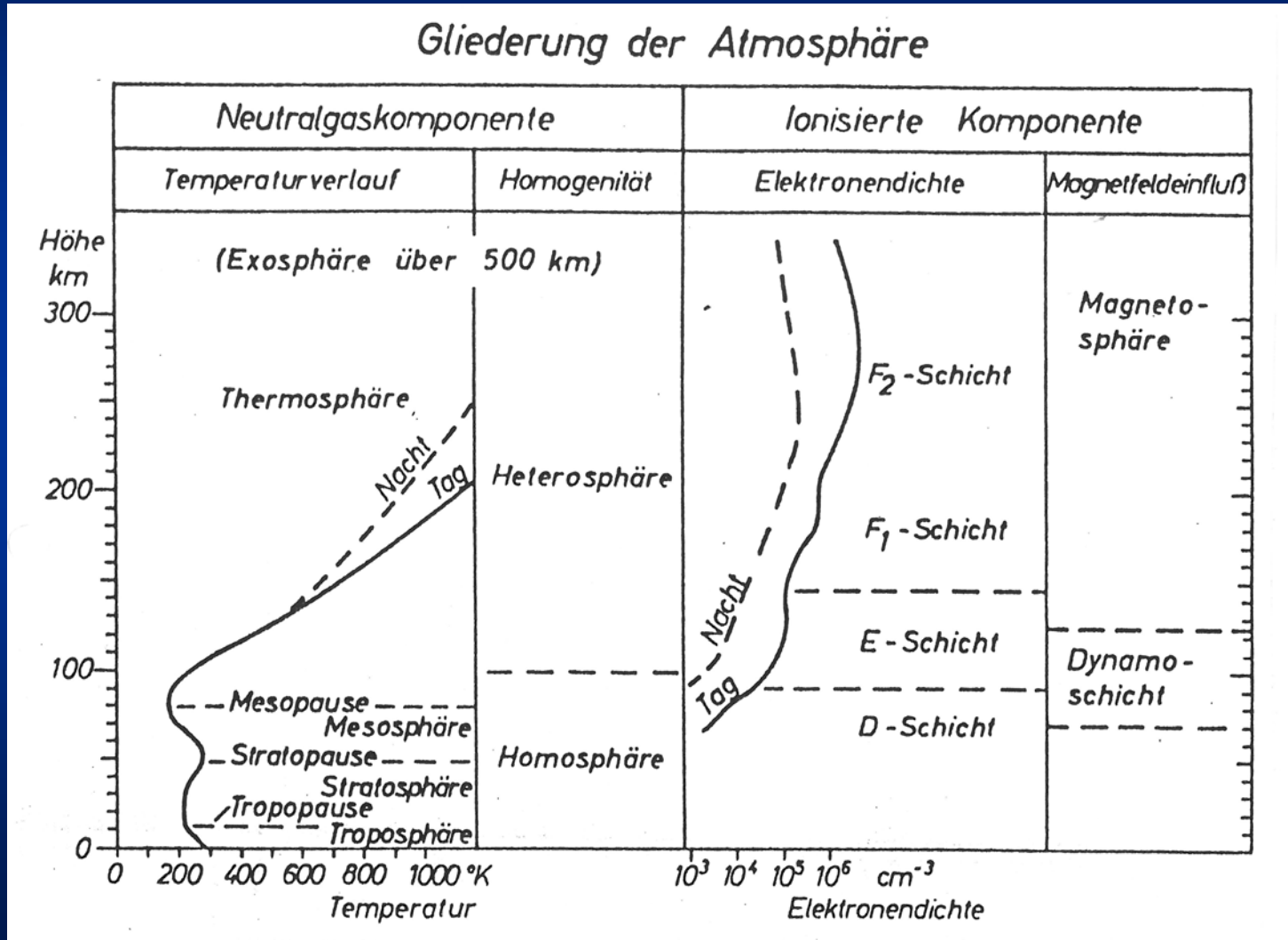


**Veränderung der Erdatmosphären durch Decarbonisierung (Sedimentierung von Karbonaten und Kohleflözen) sowie (biogene) Freisetzung von Sauerstoff**

# 1.8 Erde

## 1.8.2 Planetares Umfeld

### 1.8.2.1 Gliederung der Atmosphäre



# 1.8 Erde

## 1.8.2 Planetares Umfeld

### 1.8.2.1 Atmosphärenentwicklung

- **4.6 Mrd. a - Primordiale Atmosphäre ( $H_2$ , He,  $CH_4$ ,  $NH_3$ ):**  
entsteht durch Entgasung des Erdkörpers in der glutflüssigen Phase vor der Krustenbildung; wird spätestens durch den T-Tauri-Wind der frühen Sonne weggeblasen
- **3.5 Mrd. a – Erste Atmosphäre (80%  $H_2O$ , 10%  $CO_2$ , 5-7%  $H_2S$ ,  $N_2$ ,  $H_2$ , CO):**  
entsteht durch Ausgasung des Erdkörpers und Vulkanismus, während die ältesten Gesteine der Erde entstehen, Ozeanbildung durch Dauerregen von 40'000 a, erste Makromoleküle, Beginn der Biogenese
- **3.0 Mrd. a – Zweite Atmosphäre: Sauerstoffbildung durch Photodissoziation\* von Wasserdampf; Sauerstoffgehalt:  $<10^{-3}$  PAL\*\***  
Beginn der Oxidation von Oberflächenmaterialien, anaerobe Lebensformen

\* Spaltung von Molekülen durch Strahlung

\*\* PAL = „present atmospheric level“ = derzeitiges Niveau: 20.95 %

# 1.8 Erde

## 1.8.2 Planetares Umfeld

### 1.8.2.1 Atmosphärenentwicklung

- **4.6 Mrd. a - Primordiale Atmosphäre ( $H_2$ , He,  $CH_4$ ,  $NH_3$ ):** entsteht durch Entgasung des Erdkörpers in der glutflüssigen Phase vor der Krustenbildung; wird spätestens durch den T-Tauri-Wind der frühen Sonne weggeblasen
- **3.5 Mrd. a – Erste Atmosphäre (80%  $H_2O$ , 10%  $CO_2$ , 5-7%  $H_2S$ ,  $N_2$ ,  $H_2$ , CO):** entsteht durch Ausgasung des Erdkörpers und Vulkanismus, während die ältesten Gesteine der Erde entstehen, Ozeanbildung durch Dauerregen von 40'000 a, erste Makromoleküle, Beginn der Biogenese
- **3.0 Mrd. a – Zweite Atmosphäre: Sauerstoffbildung durch Photodissoziation\* von Wasserdampf; Sauerstoffgehalt:  $<10^{-3}$  PAL**  
**Beginn der Oxidation von Oberflächenmaterialien, anaerobe Lebensformen**
- **2.5 Mrd. a - Sauerstoffbildung durch Photosynthese, Blaualgen**  
**Sauerstoffgehalt:  $\sim 10^{-3}$  PAL, älteste Riffe, gebänderte Eisenerz-Sedimente**
- **2.0 Mrd. a – Dritte Atmosphäre: Übergang von einer reduzierenden in eine oxidierende Atmosphäre, starke Oxydation von Oberflächenmaterial in der Hydrosphäre niedere Grünpflanzen**



# 1.8 Erde

## 1.8.2 Planetares Umfeld

### 1.8.2.1 Atmosphärenentwicklung

- **2.0 Mrd. a – Dritte Atmosphäre: Übergang von einer reduzierenden in eine oxidierende Atmosphäre, starke Oxydation von Oberflächenmaterial in der Hydrosphäre niedere Grünpflanzen**
- **1.5 Mrd. a – erste aerobe Lebensformen**
- **1.0 Mrd. a – Kalksteinbildung, Dolomit, Kalziumsulfatsedimente  
Sauerstoffgehalt:  $>10^{-3}$  PAL**
- **0.8 Mrd. a - Sauerstoffgehalt:  $\sim 10^{-2}$  PAL  
Gebirgsbildung, mehrzellige Lebewesen, Ausbildung der Atmung**
- **0.75 Mrd. a – Beginn der Ausbildung der Ozonschicht durch  $O_3$ -Bildung**
- **0.4 Mrd. a - Sauerstoffgehalt:  $\sim 10^{-1}$  PAL  
verstärkte biologische Entwicklung in den Ozeanen, erste Landlebewesen  
UV-Strahlung  $<290$  nm wird durch  $O_2$ - und  $O_3$ -Gehalt der Atmosphäre abgeschirmt**

# 1.8 Erde

## 1.8.2 Planetares Umfeld

### 1.8.2.1 Atmosphärische Massenbilanz

- **Luft:**  $\sim 5.1 \cdot 10^{18}$  kg
- **Ozeane (H<sub>2</sub>O):**  $1.4 \cdot 10^{21}$  kg (96.5% des H<sub>2</sub>O)
- **Gletscher (H<sub>2</sub>O):**  $5 \cdot 10^{19}$  kg
- **Biomasse (CO<sub>2</sub>):**  $1.5 \cdot 10^{14}$  kg ...  $2.9 \cdot 10^{15}$  kg
- **Biomasse (H<sub>2</sub>O):**  $5 \cdot 10^{14}$  kg ...  $1 \cdot 10^{16}$  kg
- **gebundenes CO<sub>2</sub> (nicht in Gestein):**  $1.7 \cdot 10^{17}$  kg
- **gebundenes CO<sub>2</sub> (in Gestein):**  $2.75 \cdot 10^{20}$  kg
  
- **Gesamtbilanz (ohne Gestein):**  $1.46 \cdot 10^{21}$  kg → **291 bar**
- **Gesamtbilanz (mit Gestein):**  $1.73 \cdot 10^{21}$  kg → **346 bar**

**Das bedeutet, dass die erste Atmosphäre der Erde eine Dichte hatte, die mehr als dreifach höher war als die heutige Atmosphäre der Venus.**

*[verschiedene Quellen]*

# 1.8 Erde

## 1.8.2 Planetares Umfeld

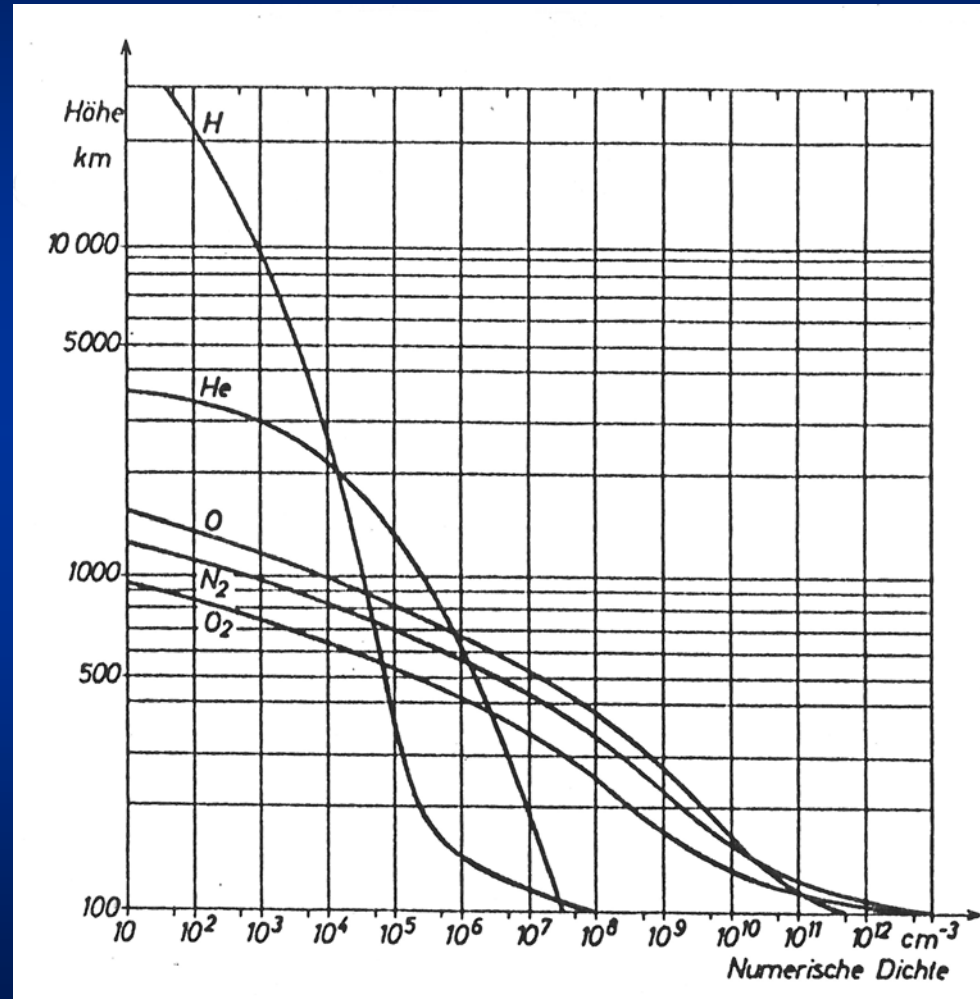
### 1.8.2.1 Atmosphärische Massenbilanz

- **Erde:**  $\sim 5.1 \cdot 10^{18}$  kg (1 bar)
- **Gesamtbilanz:**  $1.73 \cdot 10^{21}$  kg → **346 bar**
- Zum Vergleich:
- **Venus-Atmosphäre heute:**  $4.8 \cdot 10^{20}$  kg → **92 bar**

# 1.8 Erde

## 1.8.2 Planetares Umfeld

### 1.8.2.1 Atmosphärenentwicklung

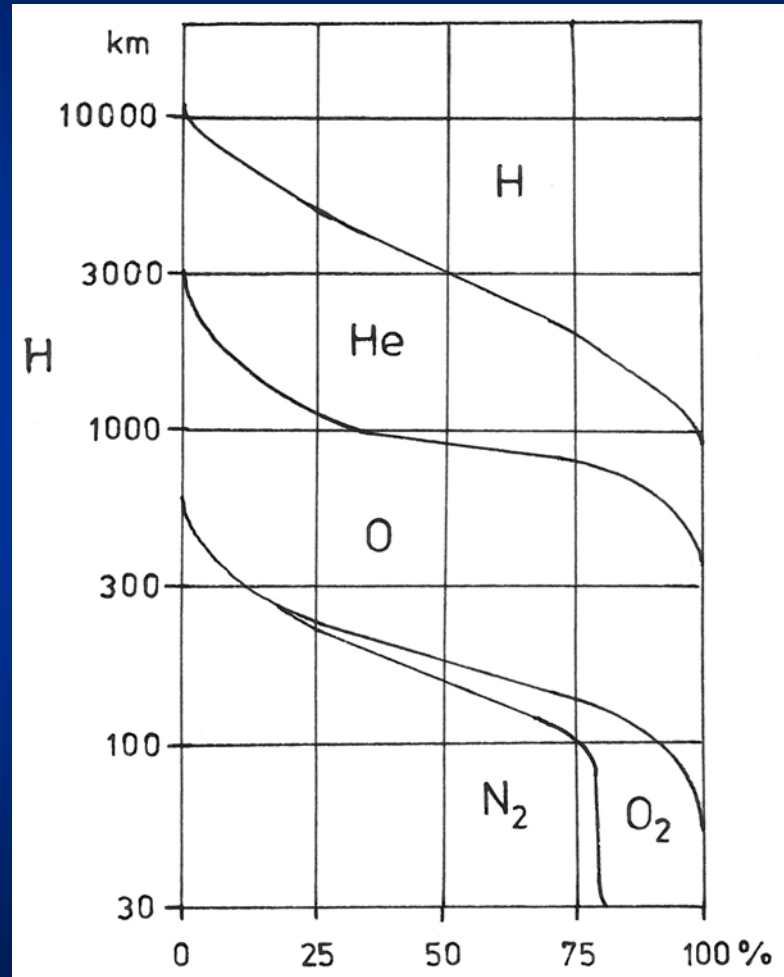


Höhenprofil der Dichte der atmosphärischen Gase

# 1.8 Erde

## 1.8.2 Planetares Umfeld

### 1.8.2.1 Atmosphärenentwicklung

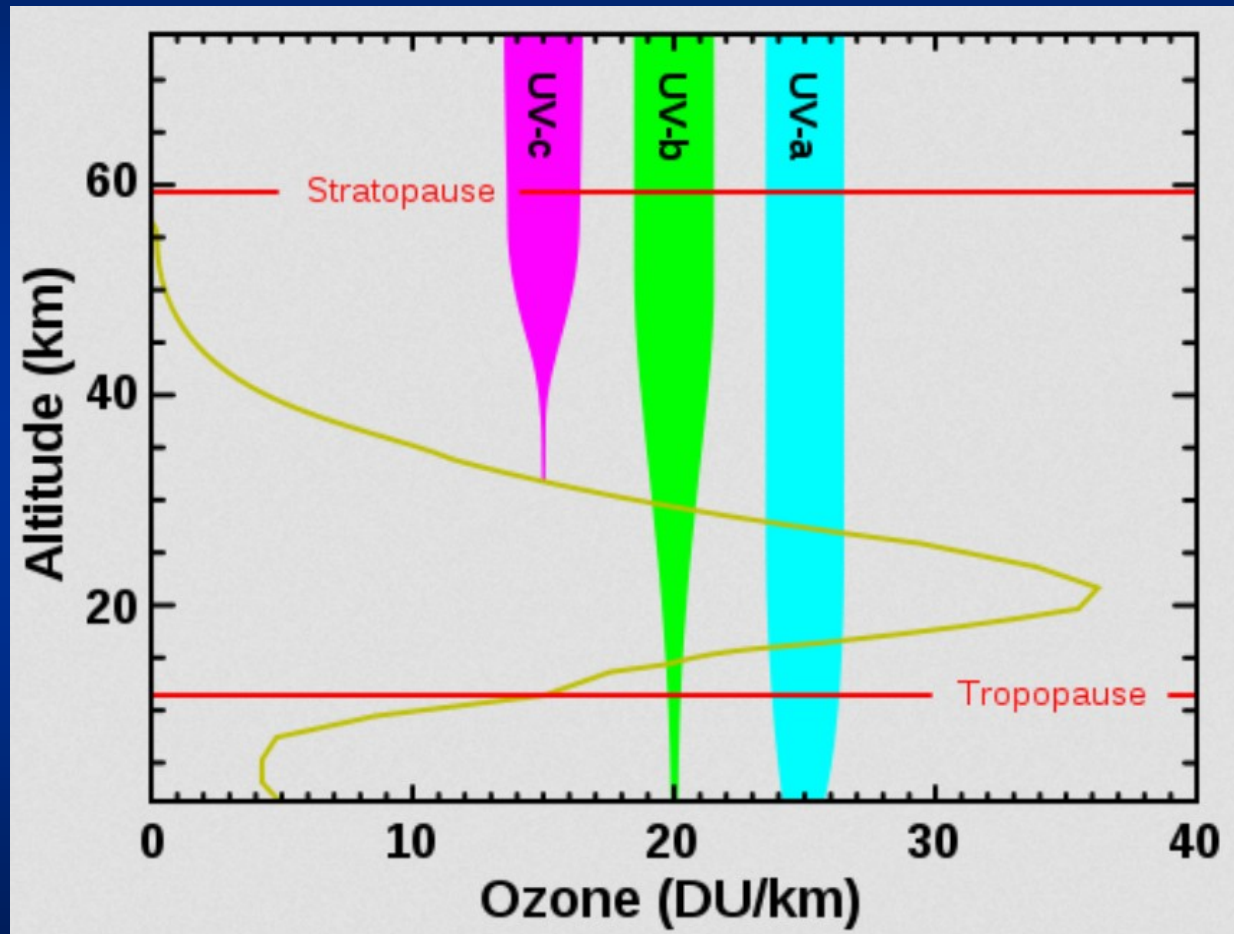


Höhenprofil der Anteile der atmosphärischen Gase

# 1.8 Erde

## 1.8.2 Planetares Umfeld

### 1.8.2.1 Atmosphärenentwicklung



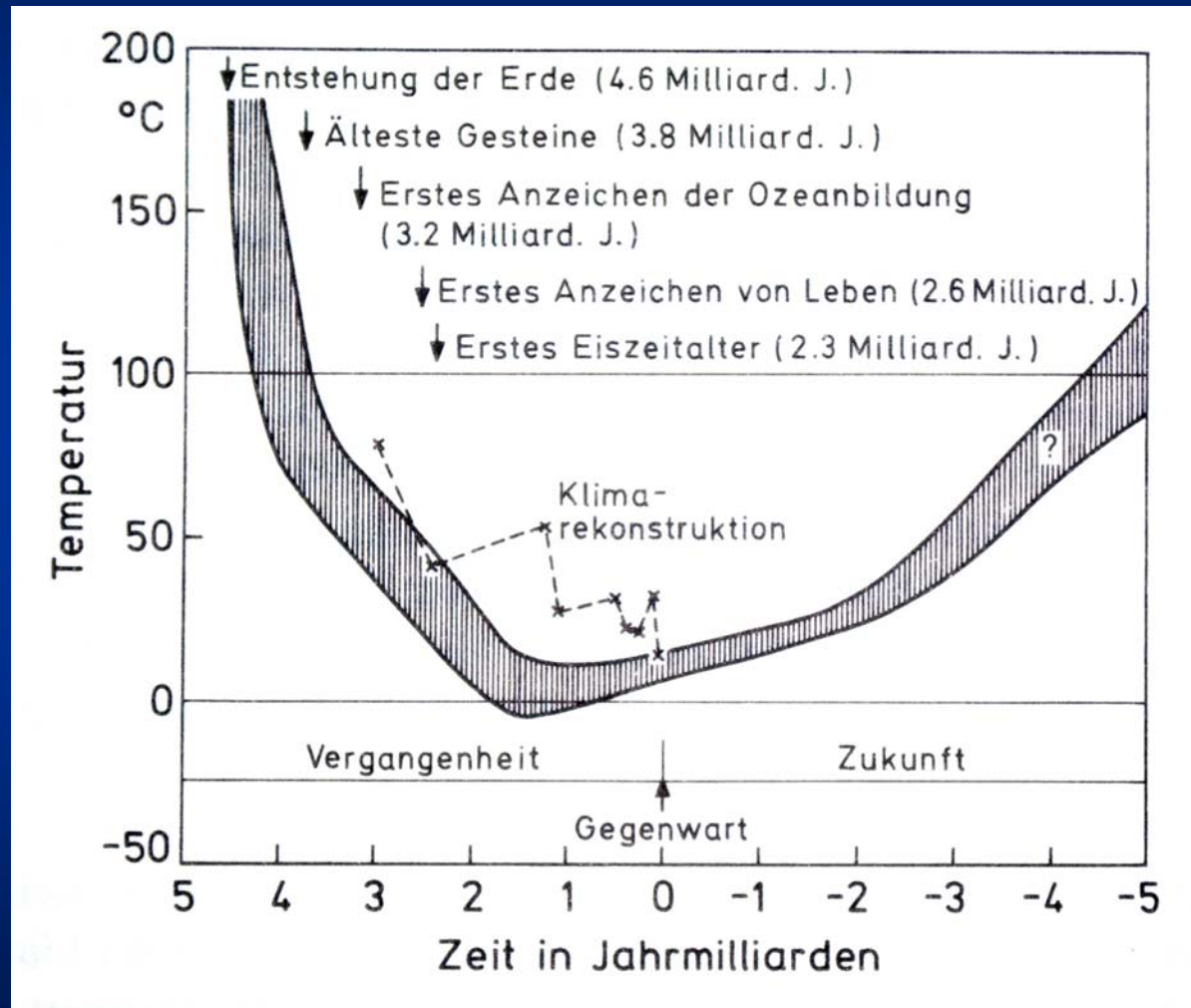
### Ozonanteil und UV-Durchlässigkeit der Atmosphäre

*DU = Dobson-Unit = Menge von Ozon über Fläche = 0.4462 mmol/m<sup>2</sup>*

# 1.8 Erde

## 1.8.2 Planetares Umfeld

### 1.8.2.1 Atmosphärenentwicklung



## Temperaturentwicklung in Erdgeschichte und -zukunft

[aus C.-D. Schönwiese, Klima im Wandel, Stuttgart 1992]

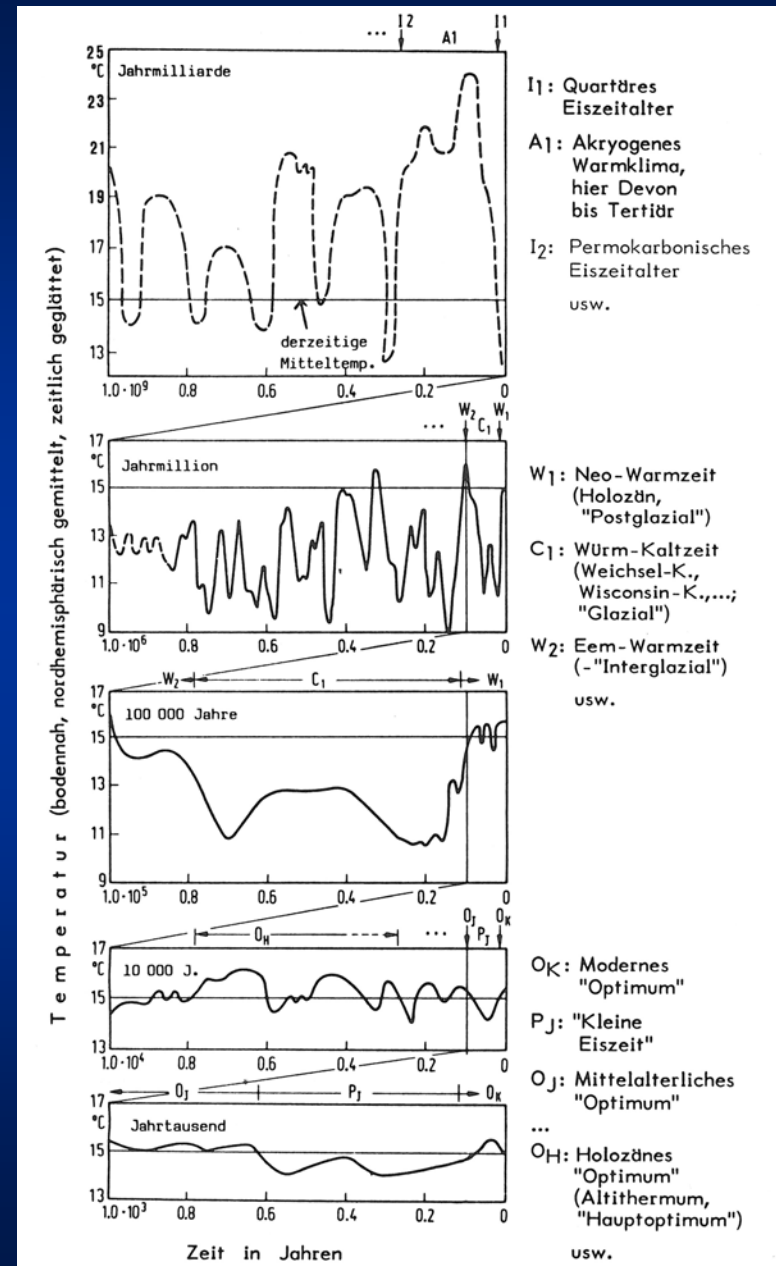


# 1.8 Erde

## 1.8.2 Planetares Umfeld

### 1.8.2.1 Atmosphärenentwicklung

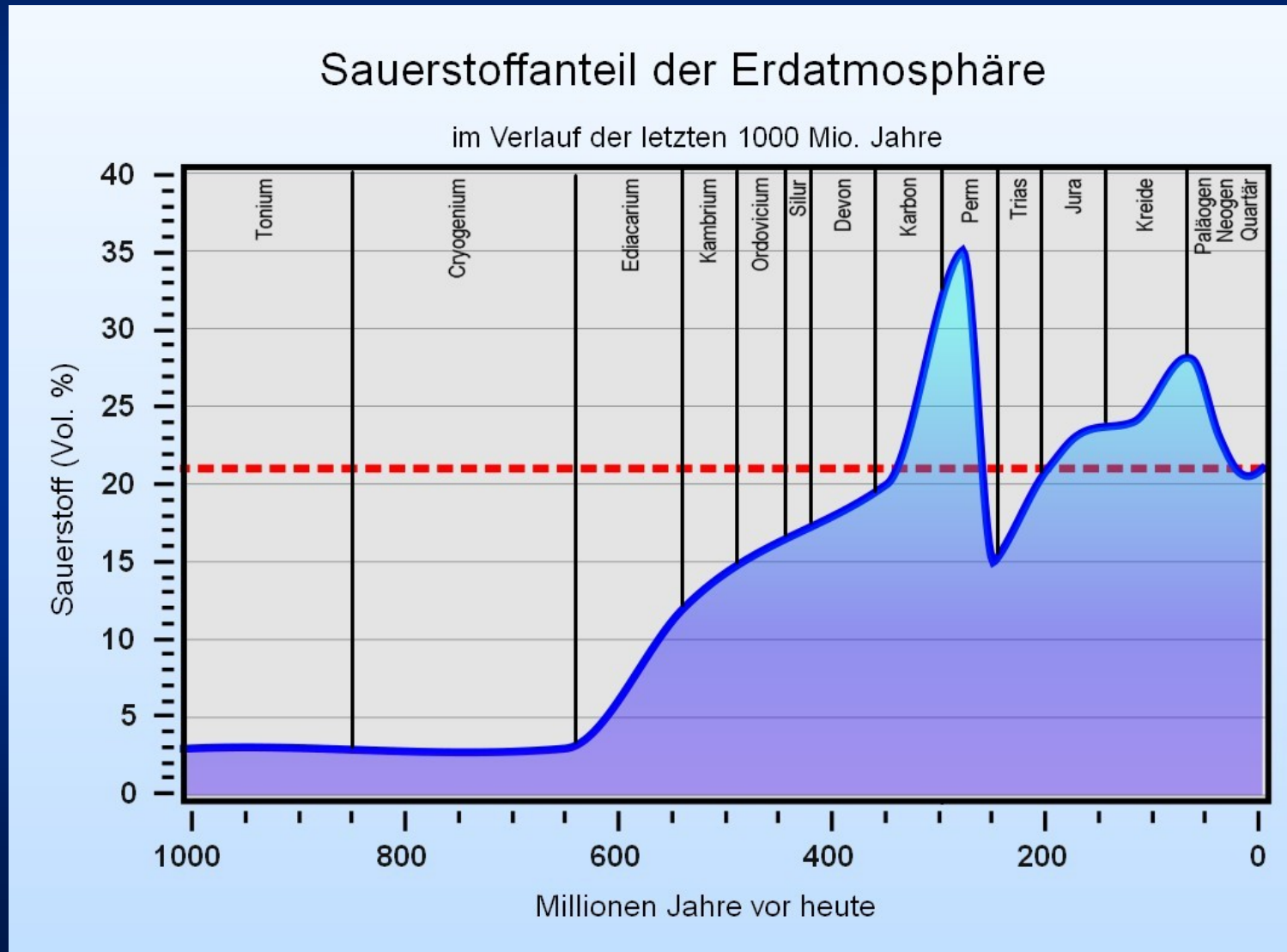
**Lufttemperaturentwicklung seit 1 Mrd. a**  
 [aus C.-D. Schönwiese, *Klimatologie*, Stuttgart 1994]



# 1.8 Erde

## 1.8.2 Planetares Umfeld

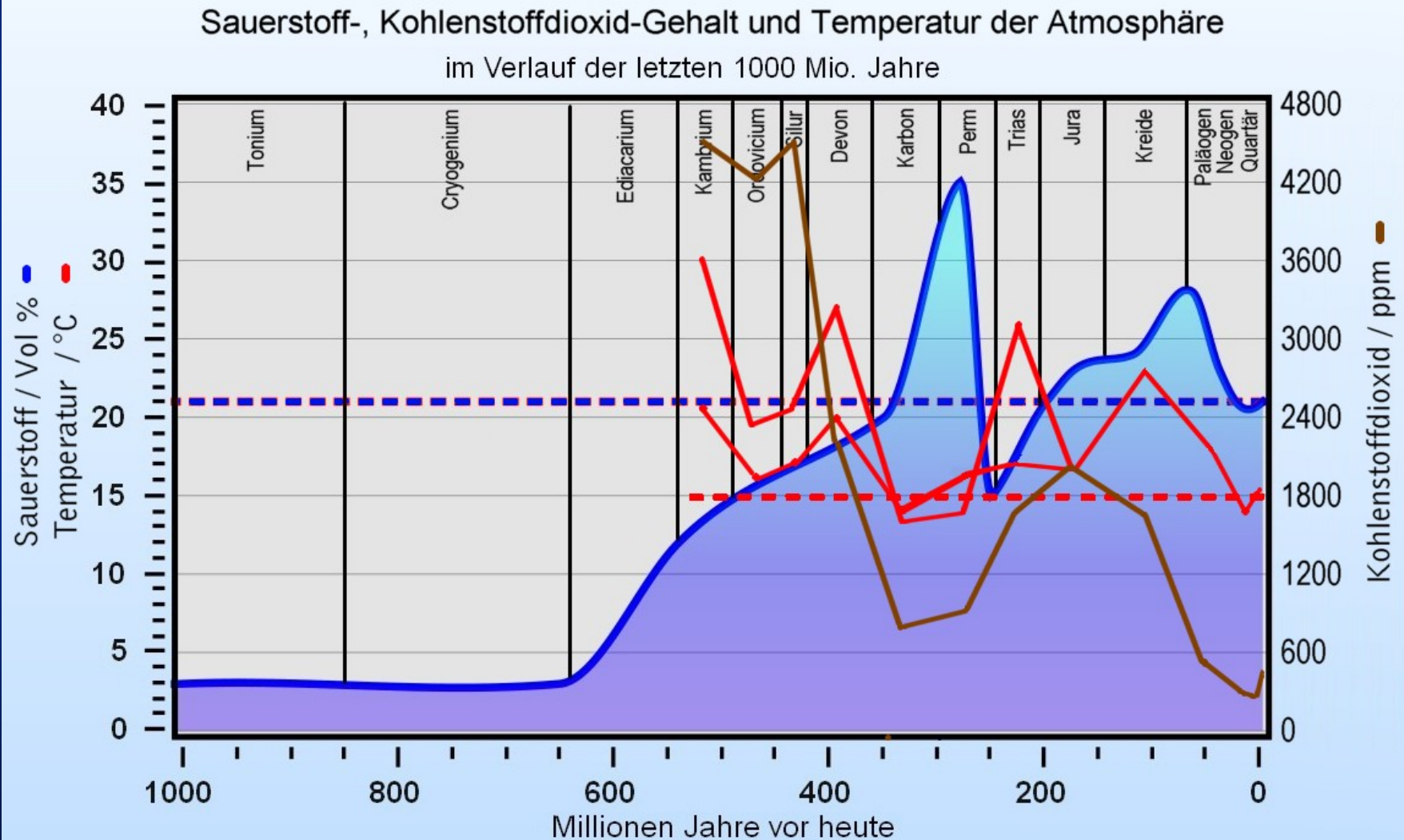
### 1.8.2.1 Atmosphärenentwicklung und Erdzeitalter



# 1.8 Erde

## 1.8.2 Planetares Umfeld

### 1.8.2.1 Atmosphärenentwicklung und Erdzeitalter

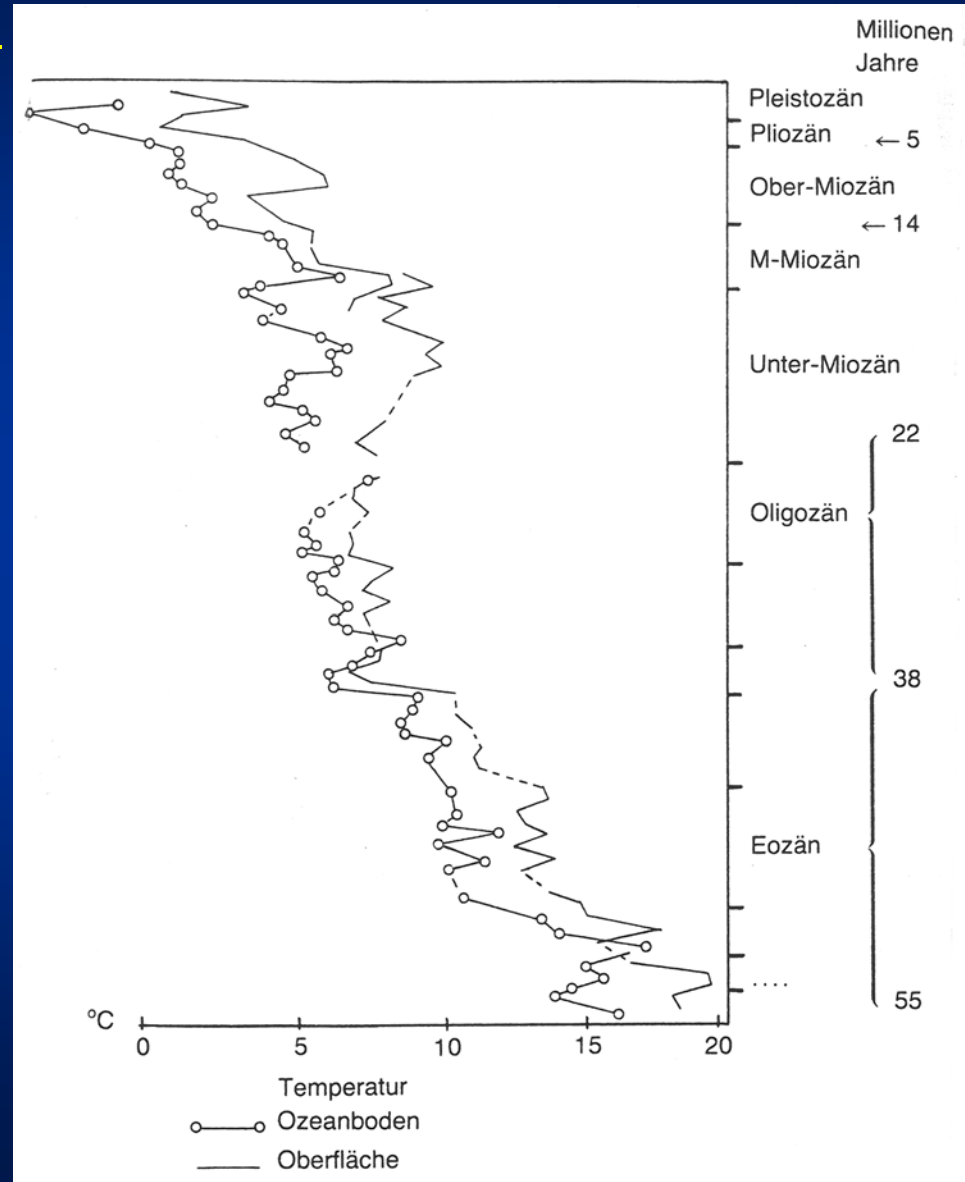


# 1.8 Erde

## 1.8.2 Planetares Umfeld

### 1.8.2.1.7 Klima- entwicklung

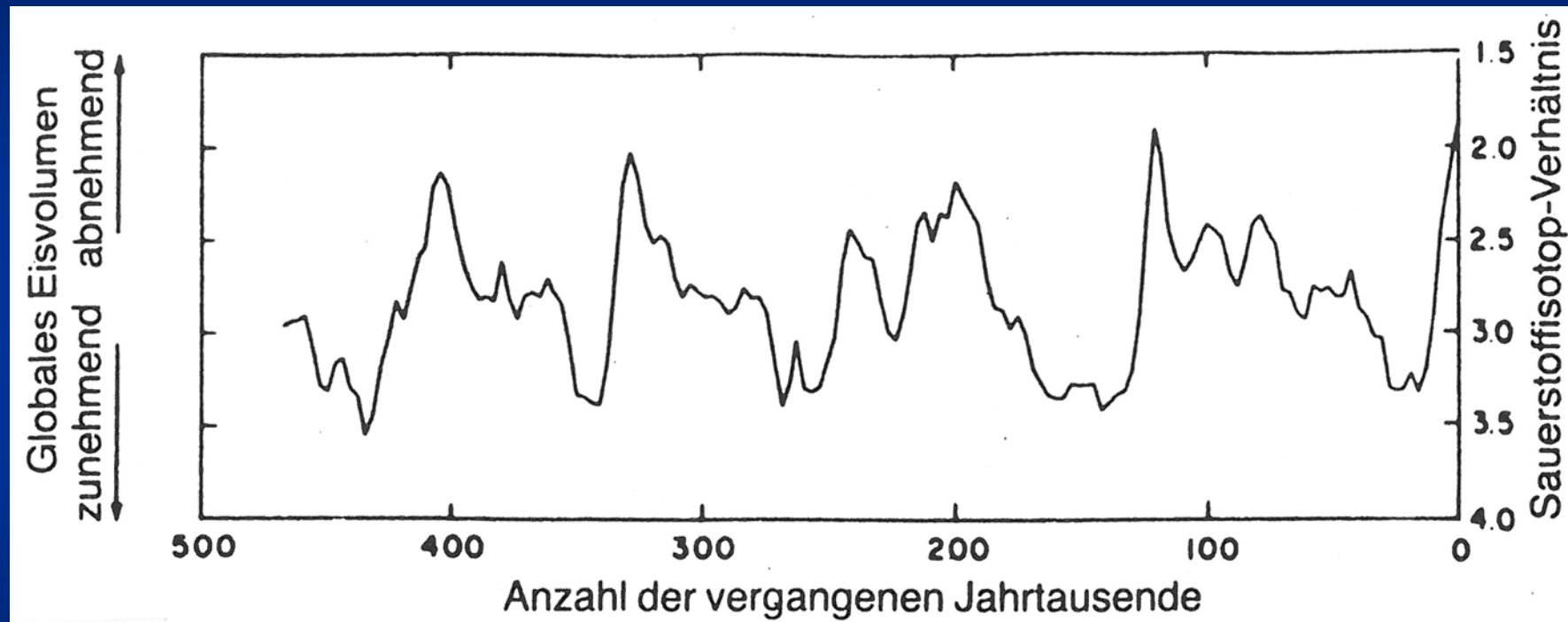
**Boden- und Oberflächentemperaturen in der Sub-Antarktis (50°S, 180°O) aus Isotopenanalysen**  
*[nach Kennett 1977]*



# 1.8 Erde

## 1.8.2 Planetares Umfeld

### 1.8.2.1.7 Klimaentwicklung



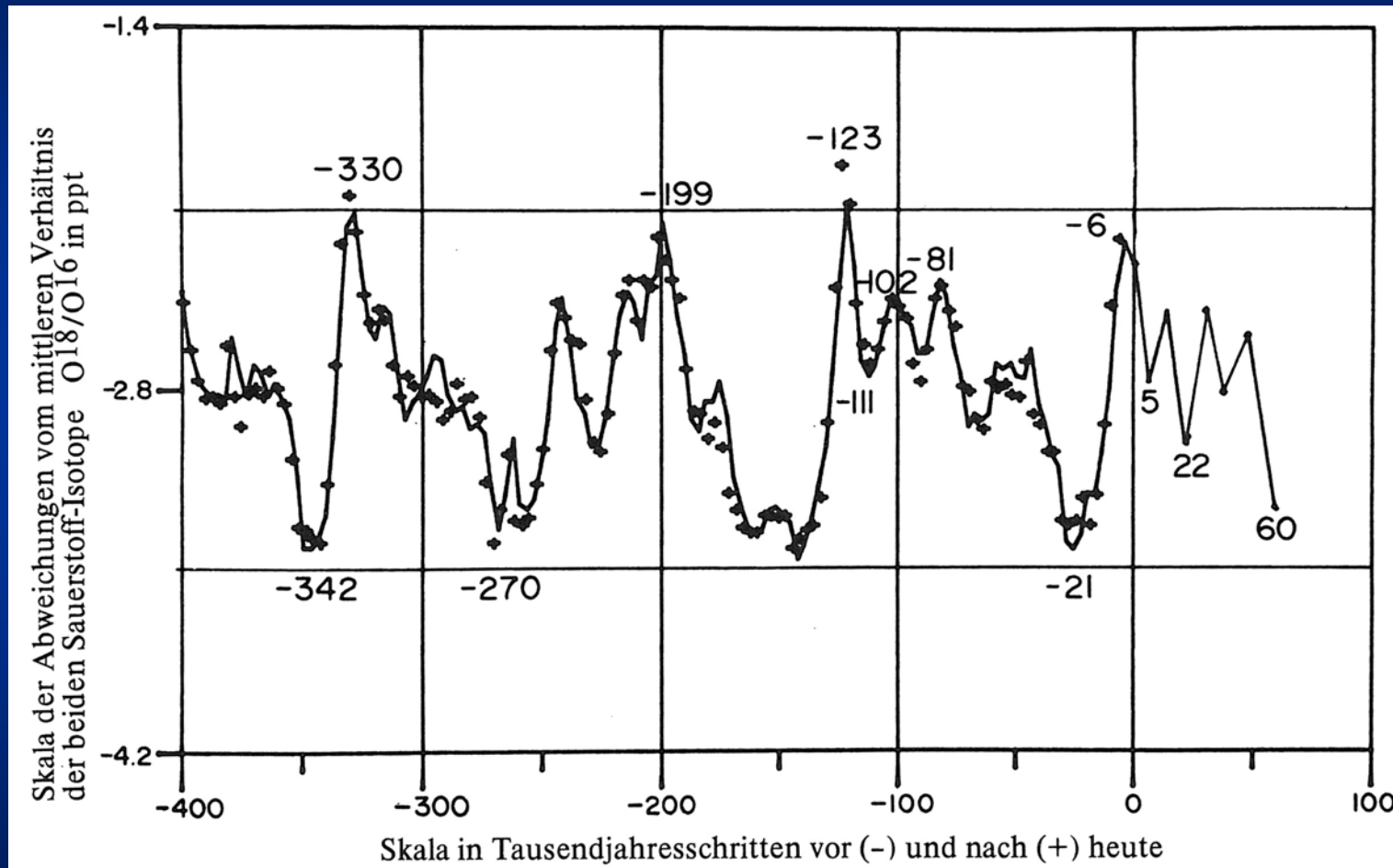
**Klima der letzten halben Million Jahre**

*[nach Hays et al. 1976]*

# 1.8 Erde

## 1.8.2 Planetares Umfeld

### 1.8.2.1.7 Klimaentwicklung



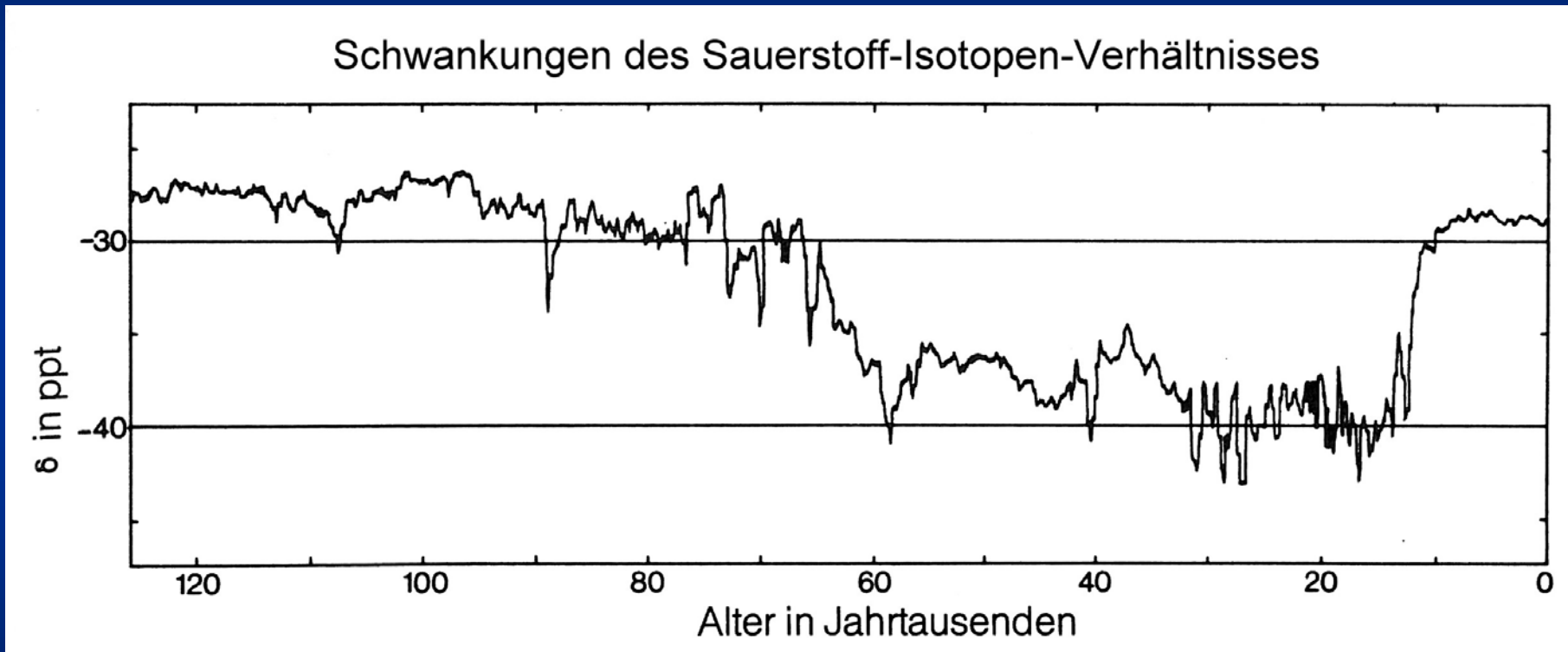
**Klima der letzten 400'000 und kommenden 60'000 Jahre (Prognose) nach dem Sauerstoff-Isotopen-Verhältnis – niedriger bedeutet kälter**

[aus H.H. Lamb, *Klima und Klimageschichte*, Reinbek 1989 (Original: 1982)]

# 1.8 Erde

## 1.8.2 Planetares Umfeld

### 1.8.2.1.7 Klimaentwicklung



**Schwankungen im Verhältnis der Sauerstoff-Isotope in der Eisschicht im äußersten Nordwesten Grönlands (77°N, 56°W) während der letzten 125'000 Jahre niedriger bedeutet kälter**

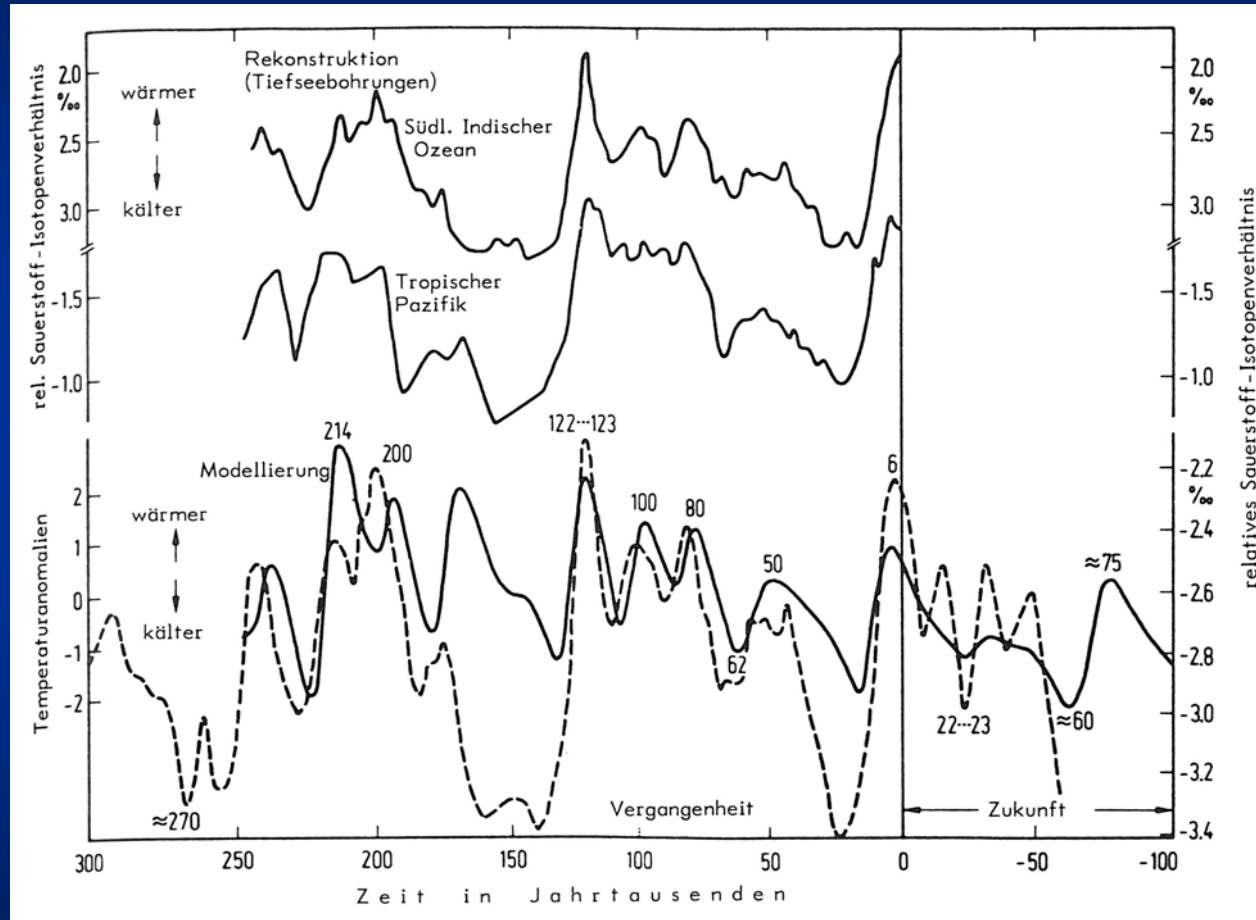
[aus H.H. Lamb, *Klima und Klimageschichte*, Reinbek 1989 (Original: 1982)]



# 1.8 Erde

## 1.8.2 Planetares Umfeld

### 1.8.2.1.7 Klimaentwicklung



**Temperaturrekonstruktion und -simulationen der letzten 250-300'000 Jahre und kommenden 100'000 Jahre**

[aus C.-D. Schönwiese, *Klimatologie*, Stuttgart (1994)]

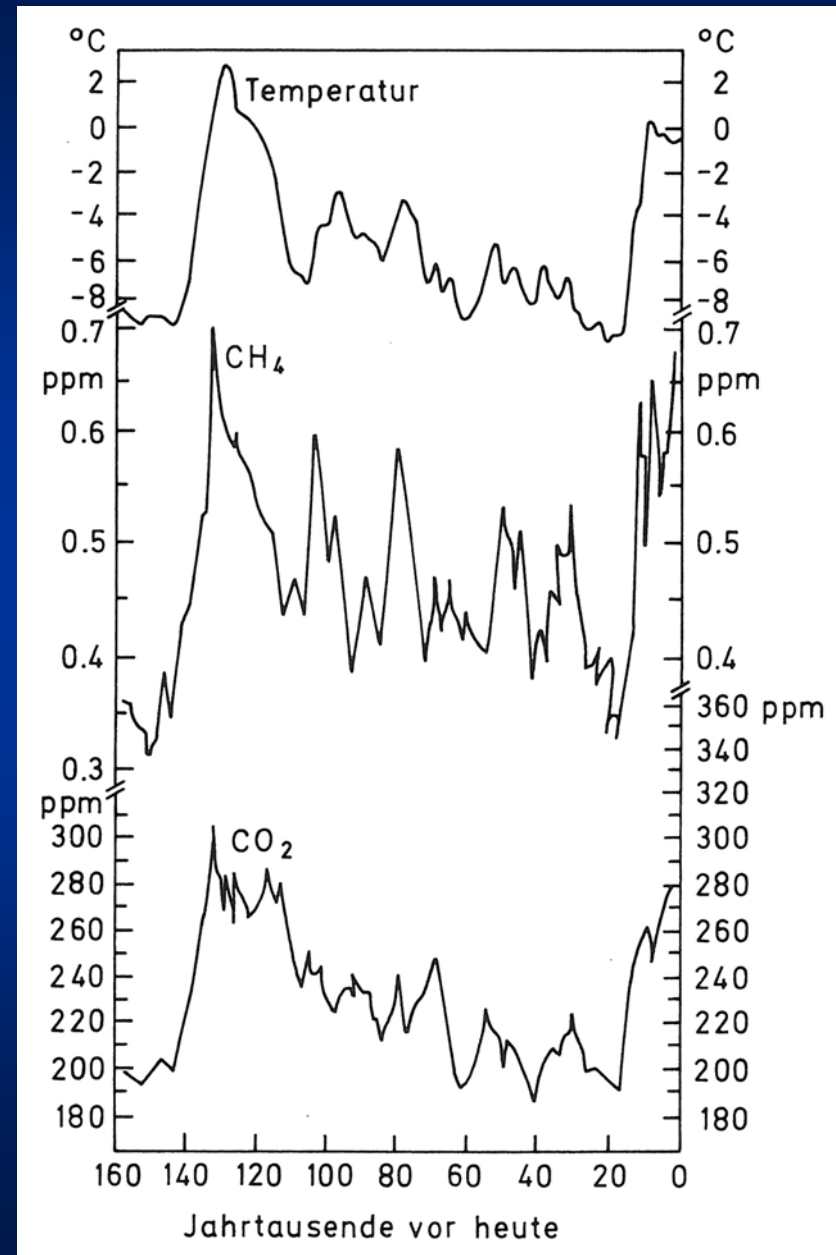
# 1.8 Erde

## 1.8.2 Planetares Umfeld

### 1.8.2.1.7 Klima- entwicklung

**Temperatur, Methan- und Kohlendioxid-  
Variationen der Atmosphäre während der  
letzten rund 160'000 Jahre (Eem-Warmzeit,  
Würm-Kaltzeit, Neo-Warmzeit) nach  
Eisbohrkern-Rekonstruktionen**

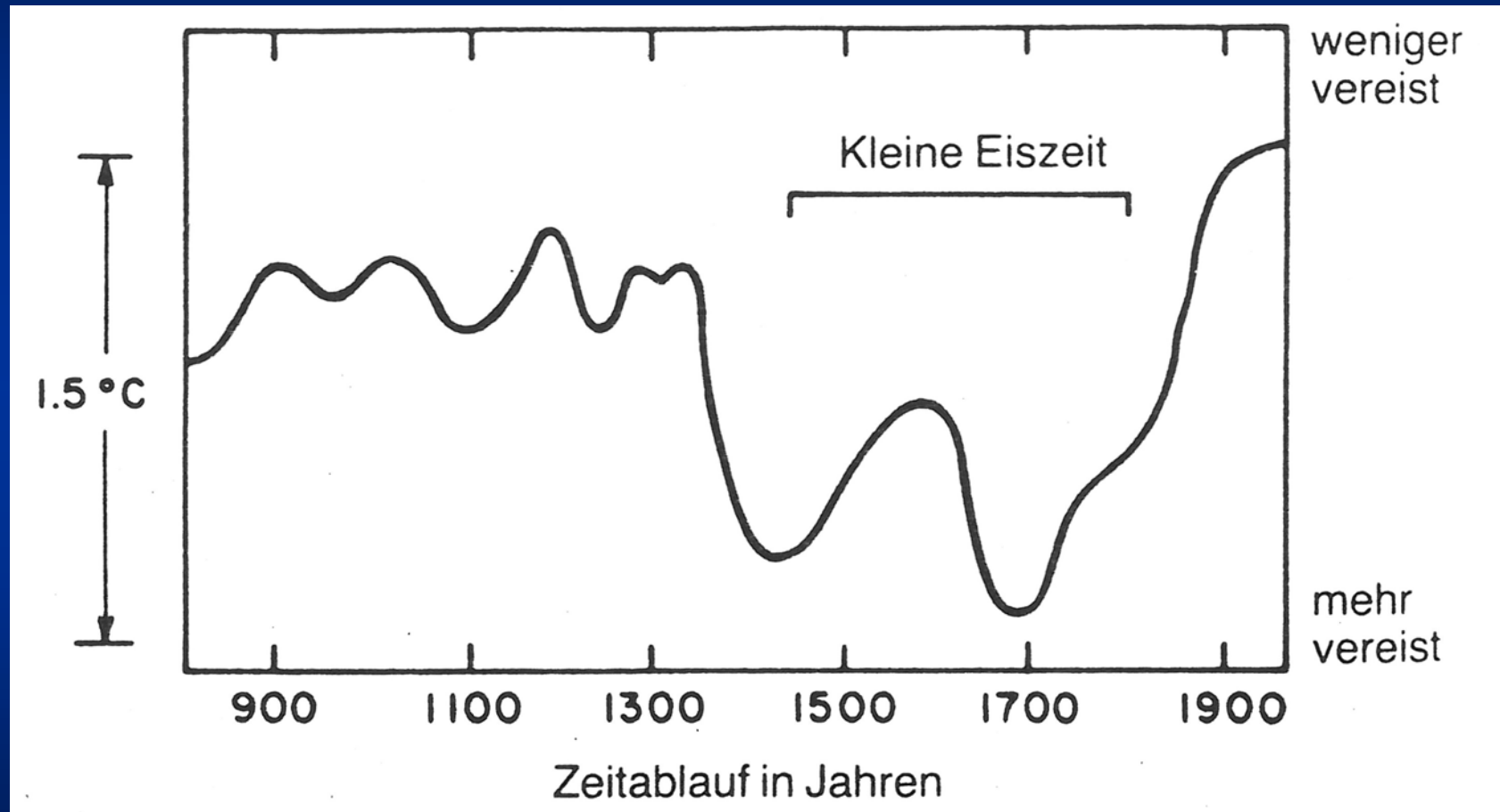
*[aus C.-D. Schönwiese, Klima im Wandel, Stuttgart 1992]*



# 1.8 Erde

## 1.8.2 Planetares Umfeld

### 1.8.2.1.7 Klimaentwicklung



**Winterbedingungen in Osteuropa**

[nach Lamb 1969]

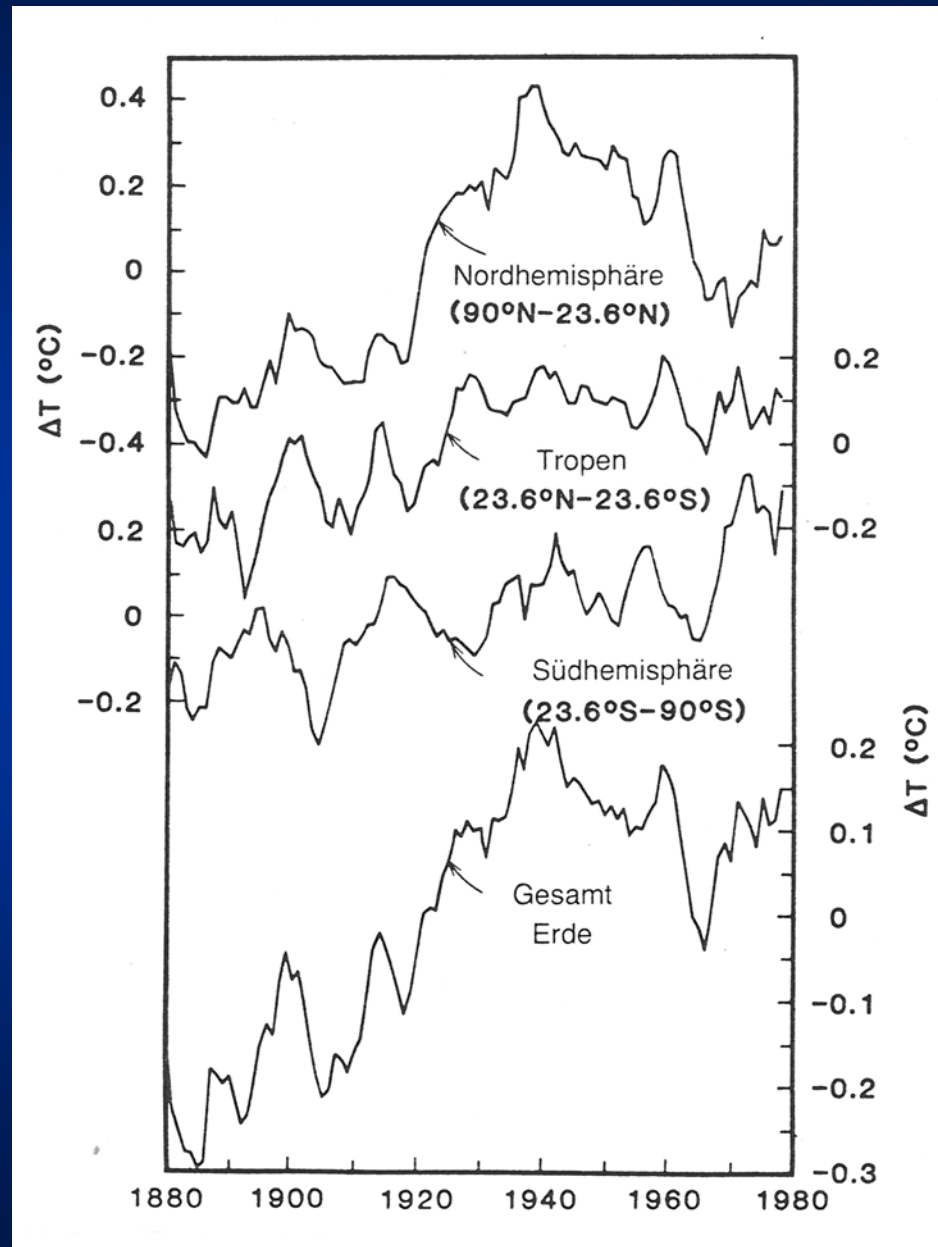
# 1.8 Erde

## 1.8.2 Planetares Umfeld

### 1.8.2.1.7 Klima- entwicklung

#### Temperaturentwicklung der letzten Hundert Jahre in verschiedenen Breiten

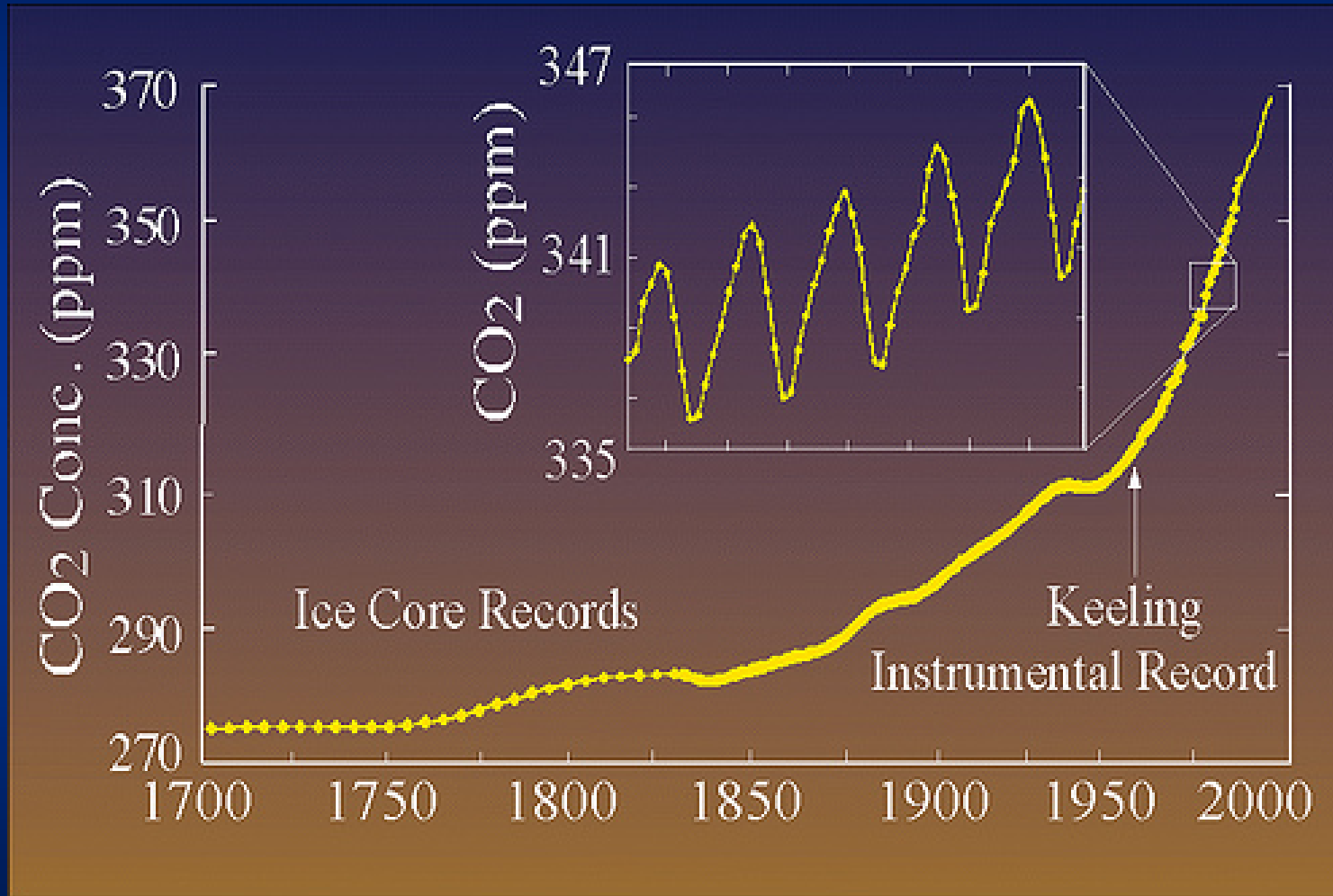
[Hansen et al. 1981]



# 1.8 Erde

## 1.8.2 Planetares Umfeld

### 1.8.2.1.7 Klimaentwicklung



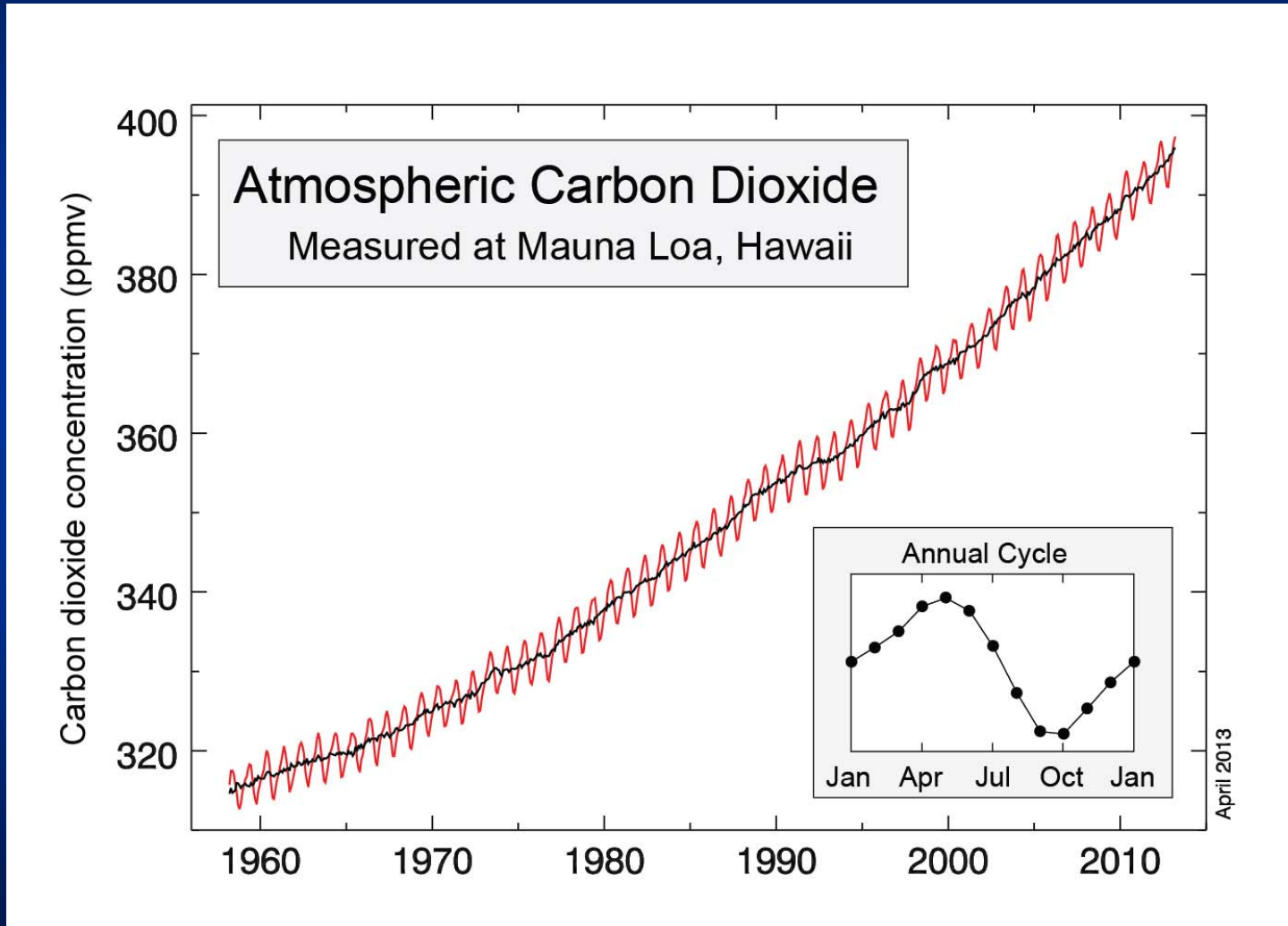
### Anstieg des Kohlenstoffdioxid-Anteils von 1700 bis 2000

[nach Neftel et al., Nature 315, 45-47 (1982) - Eisbohrkerne und Keeling – Mauna Loa-Messungen]

# 1.8 Erde

## 1.8.2 Planetares Umfeld

### 1.8.2.1.7 Klimaentwicklung

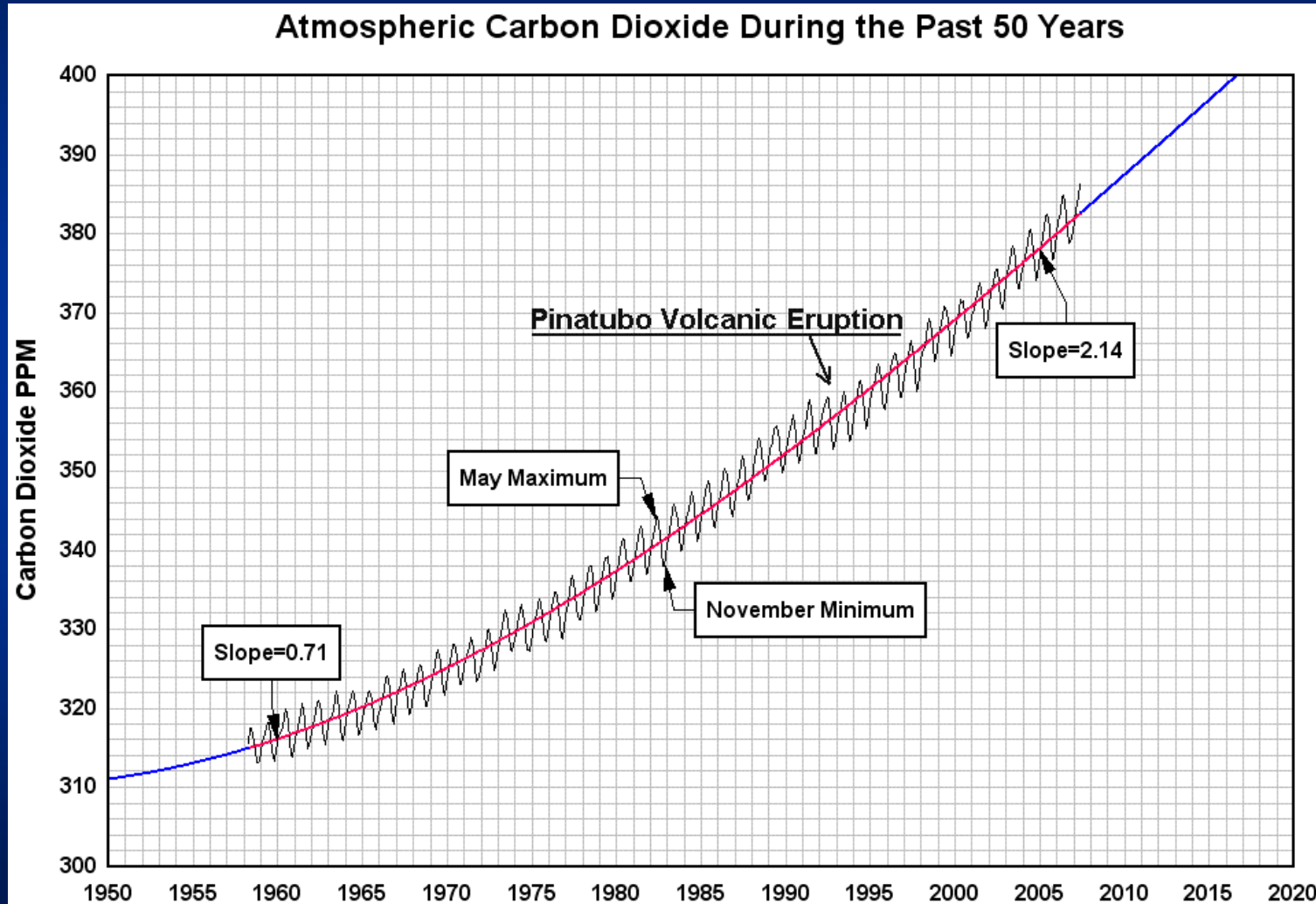


**Messungen des Kohlenstoffdioxid-Anteils der Atmosphäre (sogenannte Keeling-Kurve)**

# 1.8 Erde

## 1.8.2 Planetares Umfeld

### 1.8.2.1.7 Klimaentwicklung



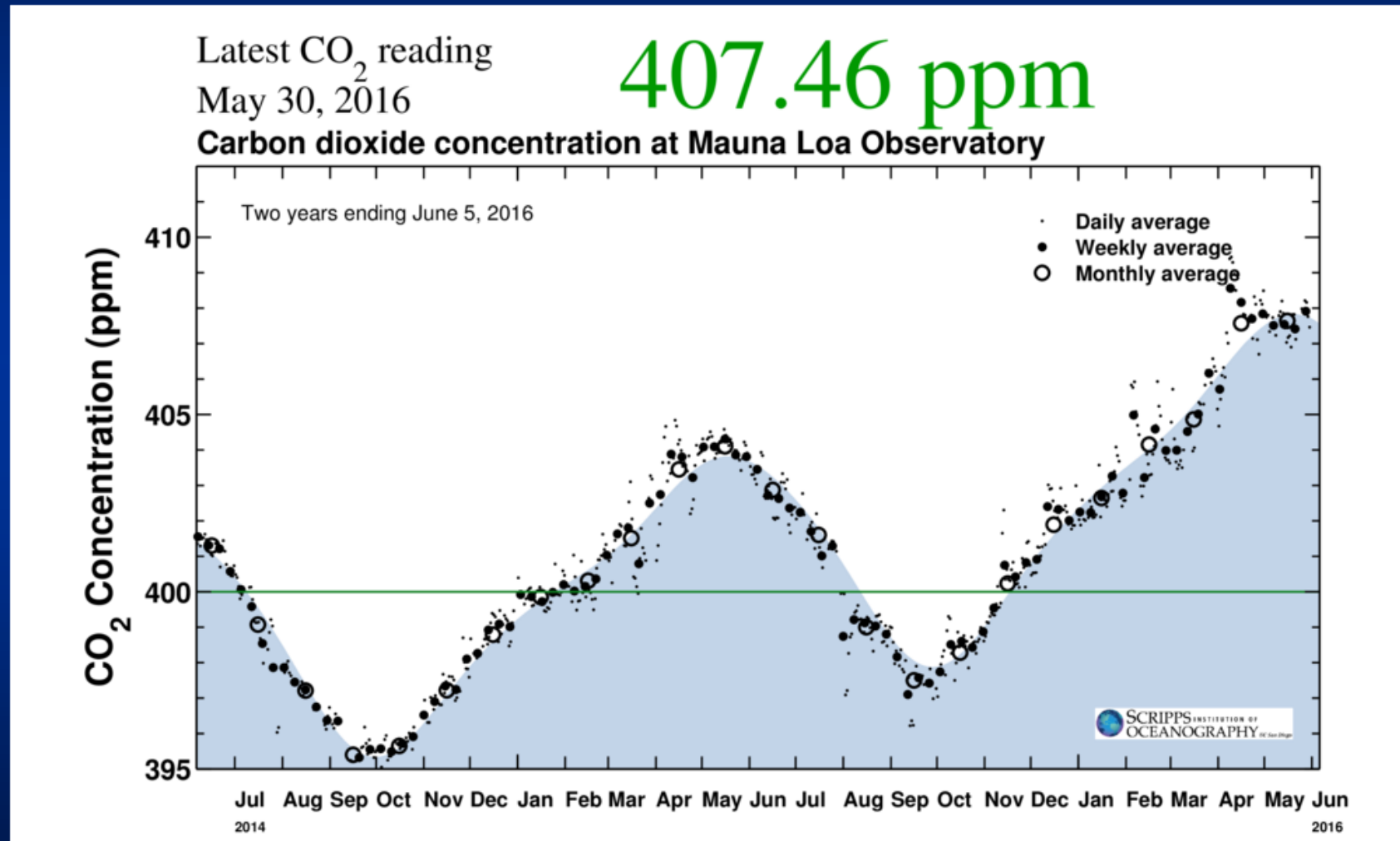
Messungen des Kohlenstoffdioxid-Anteils der Atmosphäre (sogenannte Keeling-Kurve)



# 1.8 Erde

## 1.8.2 Planetares Umfeld

### 1.8.2.1.7 Klimaentwicklung

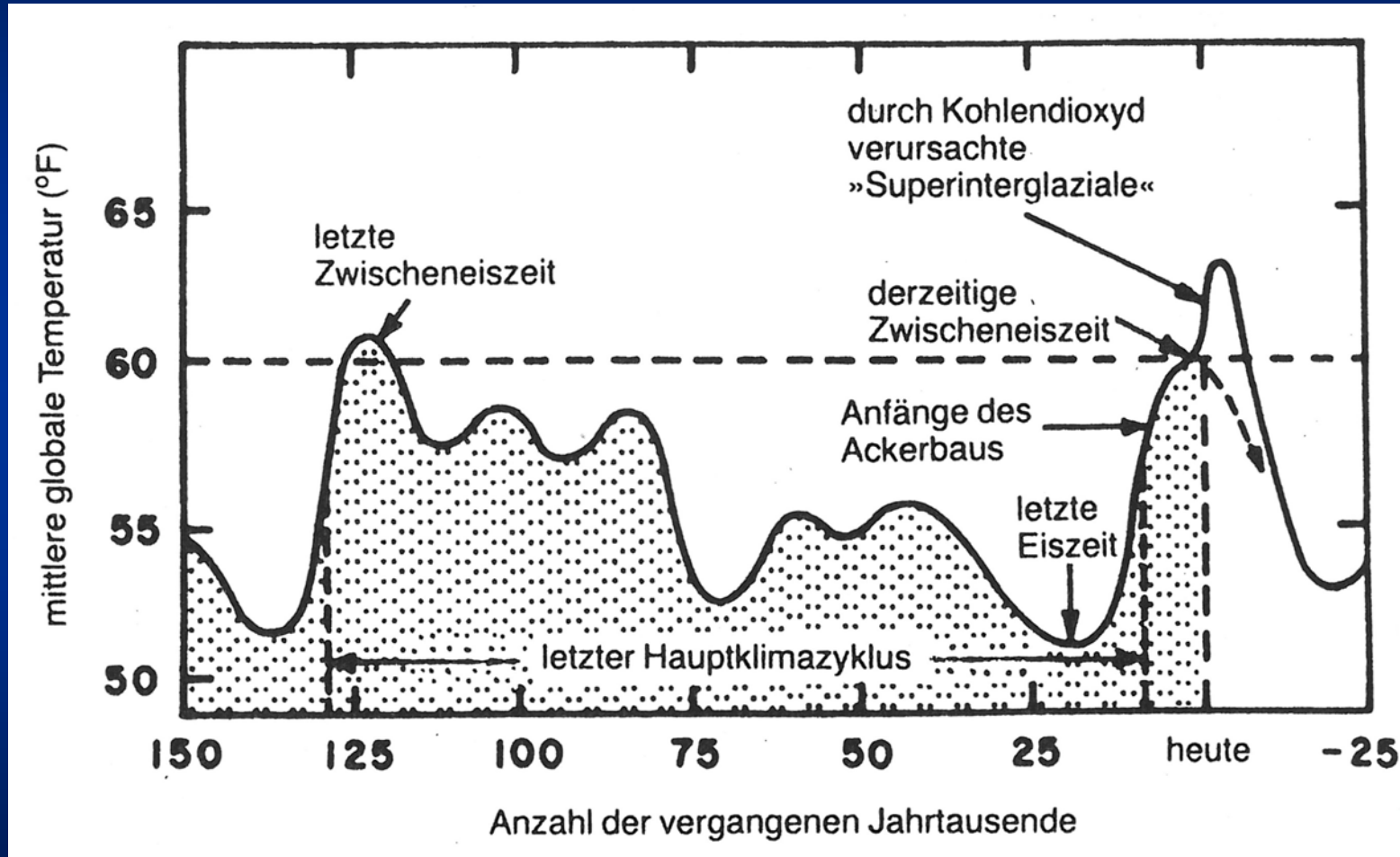


Messungen des Kohlenstoffdioxid-Anteils der Atmosphäre (sogenannte Keeling-Kurve)

# 1.8 Erde

## 1.8.2 Planetares Umfeld

### 1.8.2.1.7 Klimaentwicklung

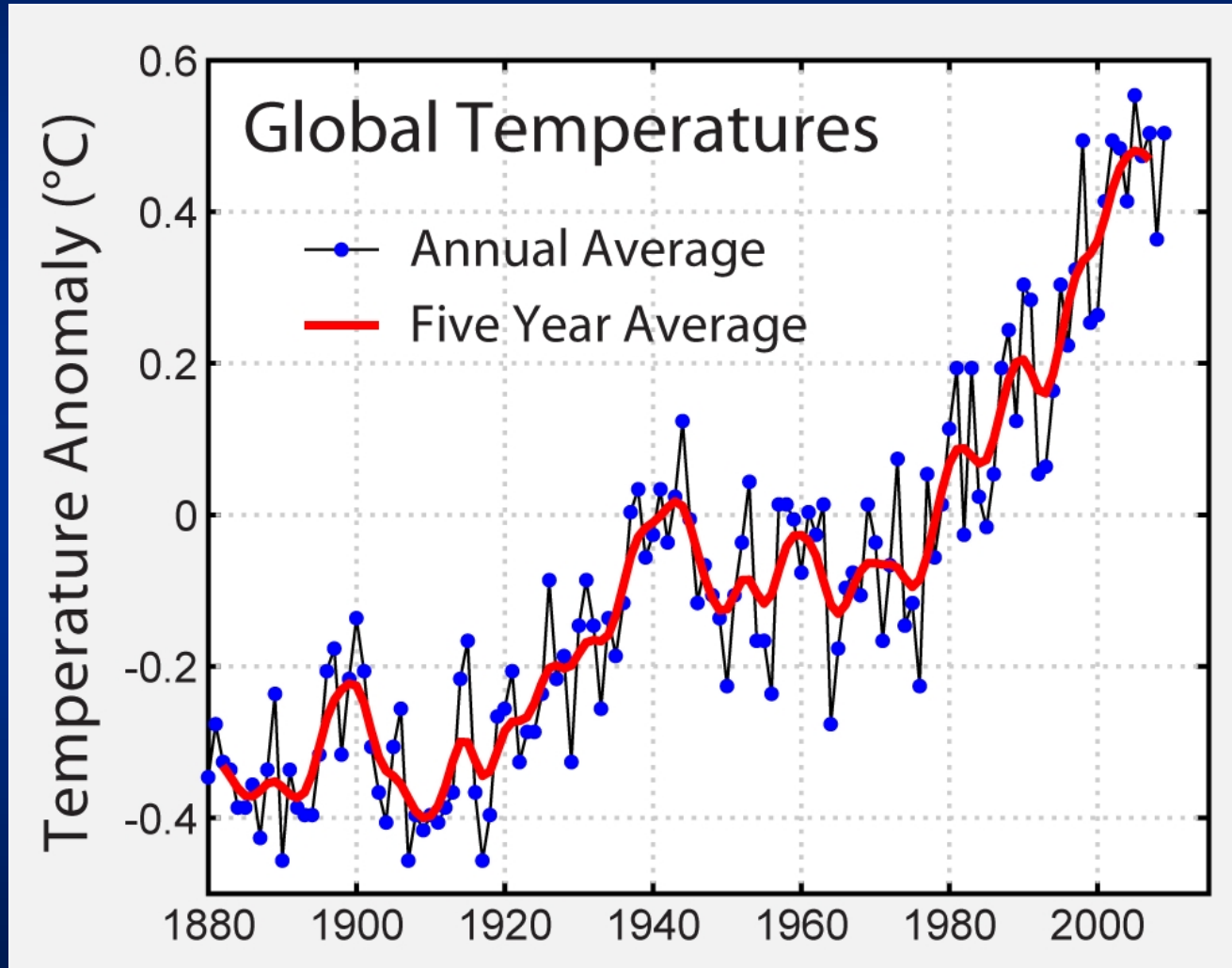


[nach Broecker 1975 und Mitchell 1977]

# 1.8 Erde

## 1.8.2 Planetares Umfeld

### 1.8.2.1.7 Klimaentwicklung

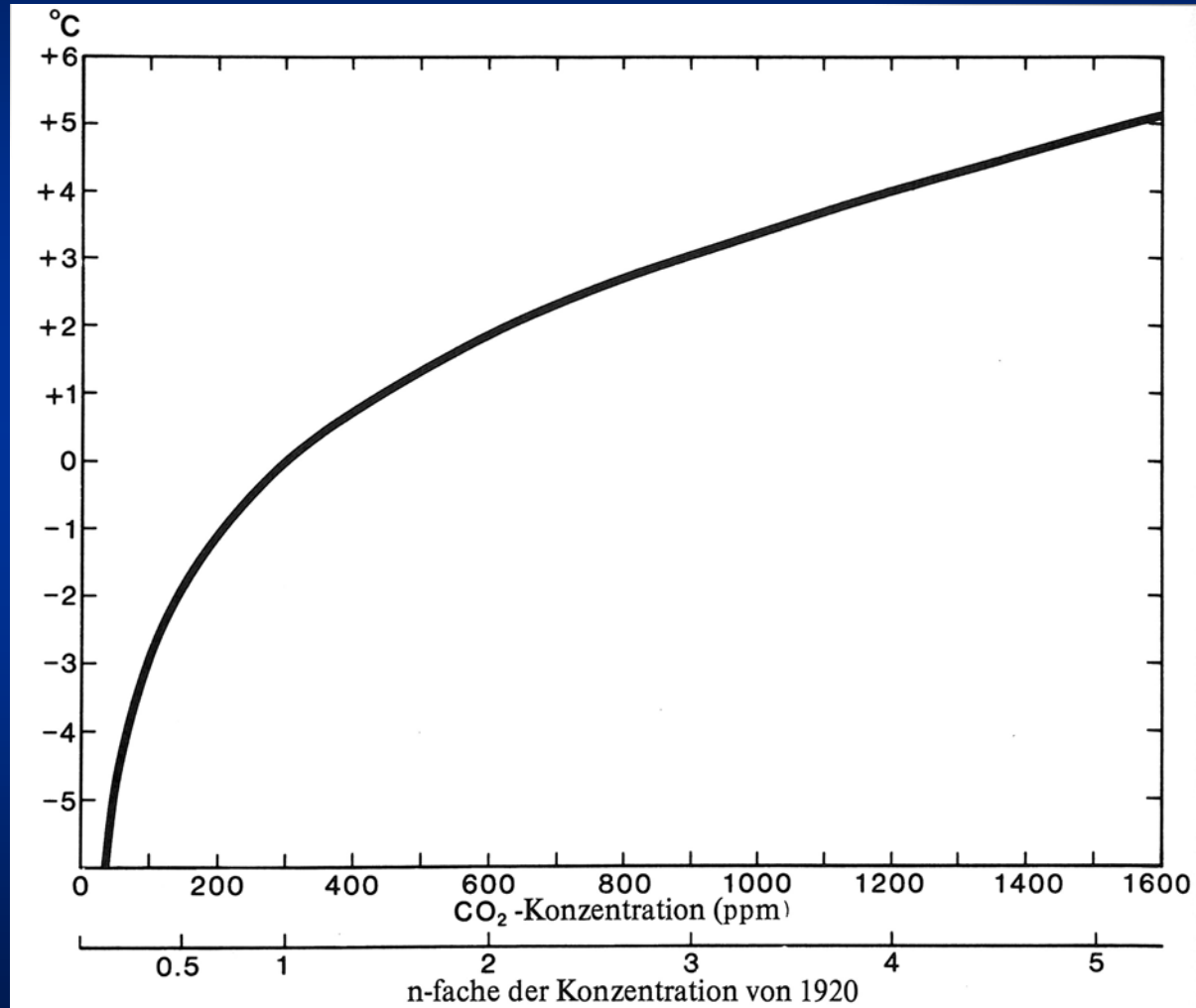


**Anstieg der Globaltemperatur seit 1880**

# 1.8 Erde

## 1.8.2 Planetares Umfeld

### 1.8.2.1.7 Klimaentwicklung

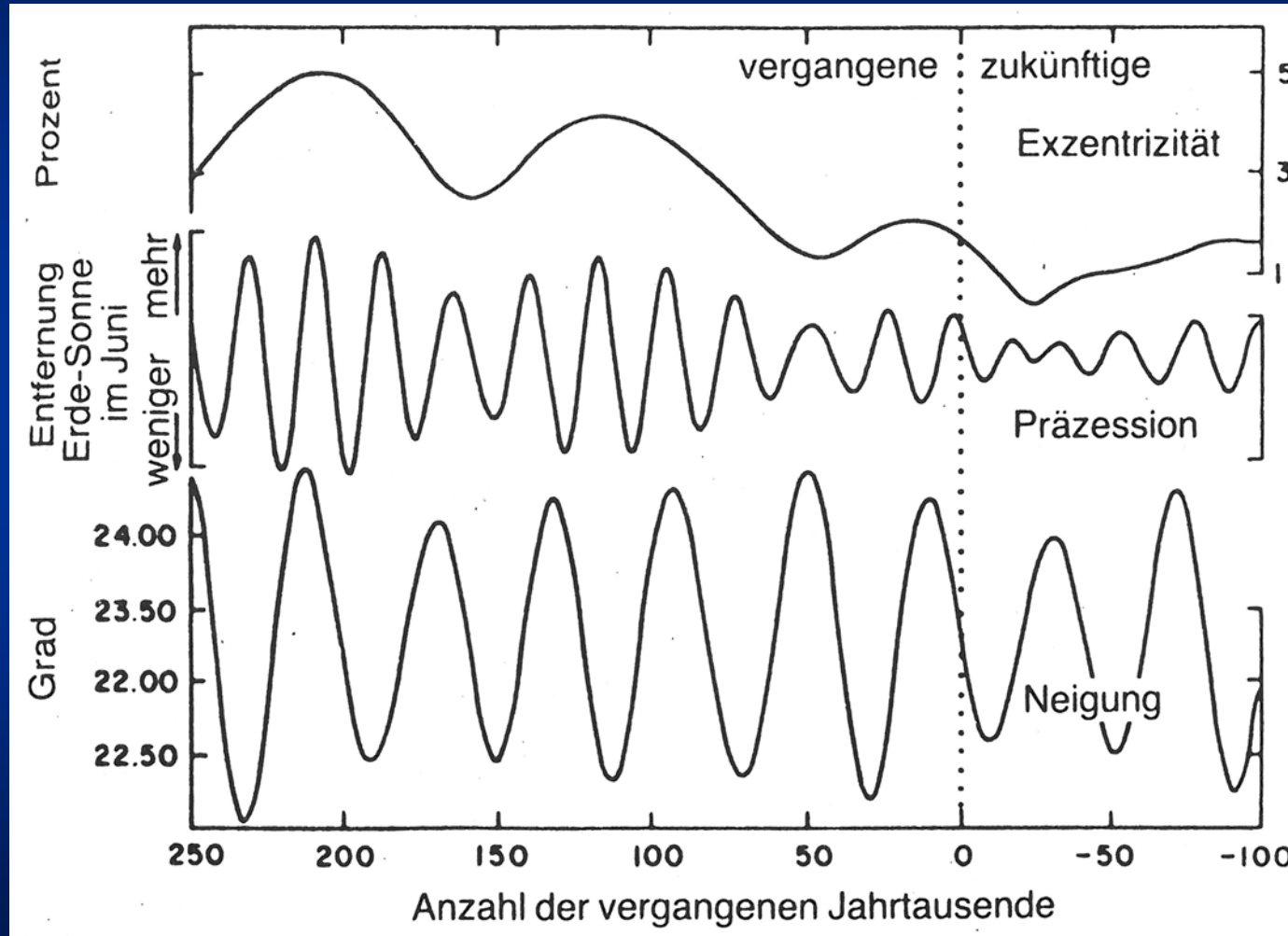


**Anstieg der Globaltemperatur in Abhängigkeit vom Kohlenstoffdioxid-Anteil**

# 1.8 Erde

## 1.8.2 Planetares Umfeld

### 1.8.2.1.7 Klimaentwicklung



# 1.11 Mars

## 1.11.2 Planetares Umfeld

### 1.11.2.3

### Magnetosphäre

#### Magnetfeld:

Dipol-Feldstärke:  $H \leq 0.25 \text{ mOe}$  (Erde:  $308 \text{ mOe} = 24.48 \text{ A m}^{-1}$ )

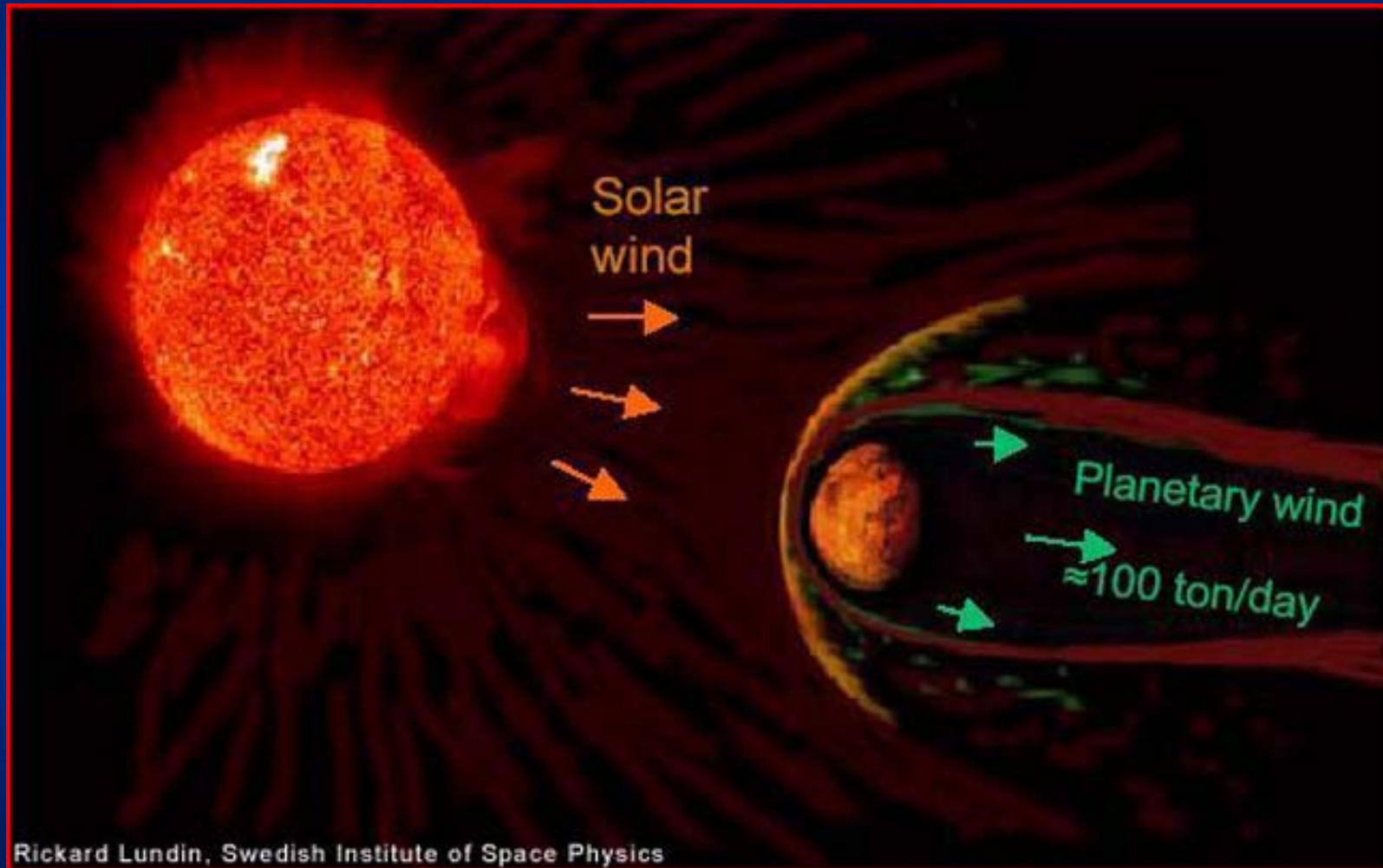
Neigung ./ Rotationsachse:  $i_M \sim 170^\circ$

# 1.11 Mars

## 1.11.2 Planetares Umfeld

### 1.11.2.3

### Magnetosphäre



**Da das Magnetfeld des Mars sehr schwach ist, ist die Magnetosphäre sehr niedrig, reicht in die Atmosphäre und lässt Sonnenwindteilchen tief eindringen.**

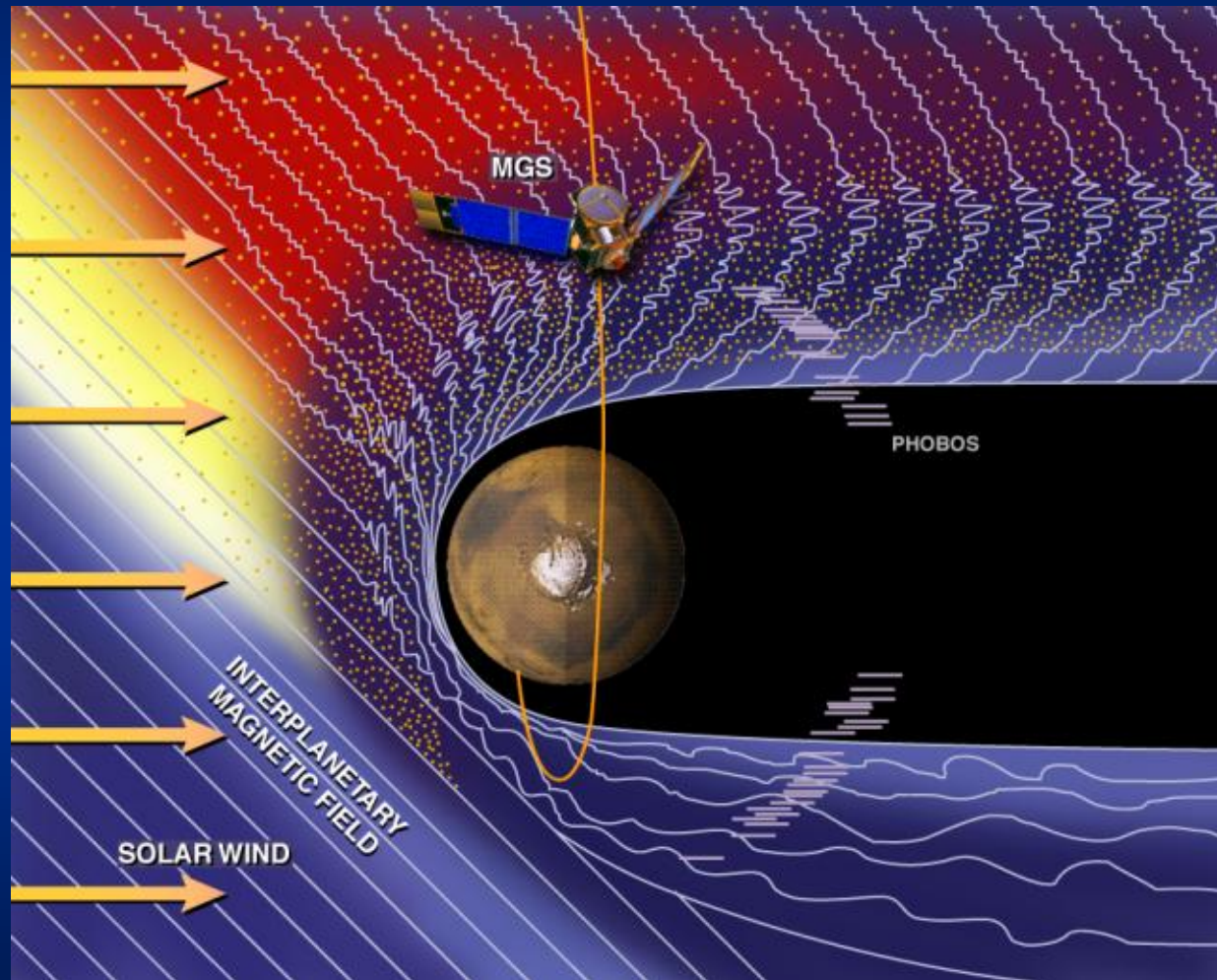


# 1.11 Mars

## 1.11.2 Planetares Umfeld

### 1.11.2.3

### Magnetosphäre



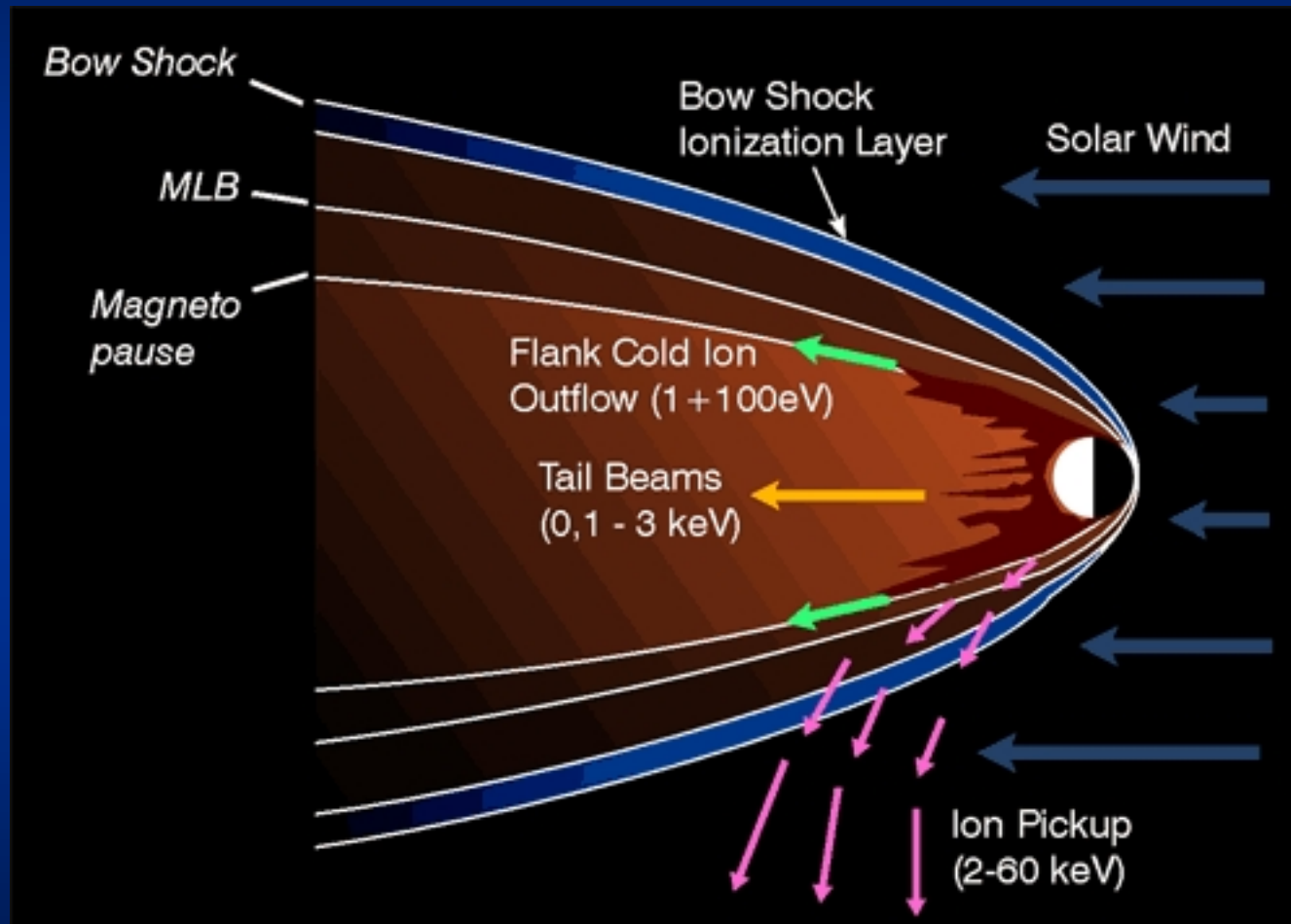
Da das Magnetfeld des Mars sehr schwach ist, ist die Magnetosphäre sehr niedrig, reicht in die Atmosphäre und lässt Sonnenwindteilchen tief eindringen.

# 1.11 Mars

## 1.11.2 Planetares Umfeld

### 1.11.2.3

### Magnetosphäre und Ionosphäre



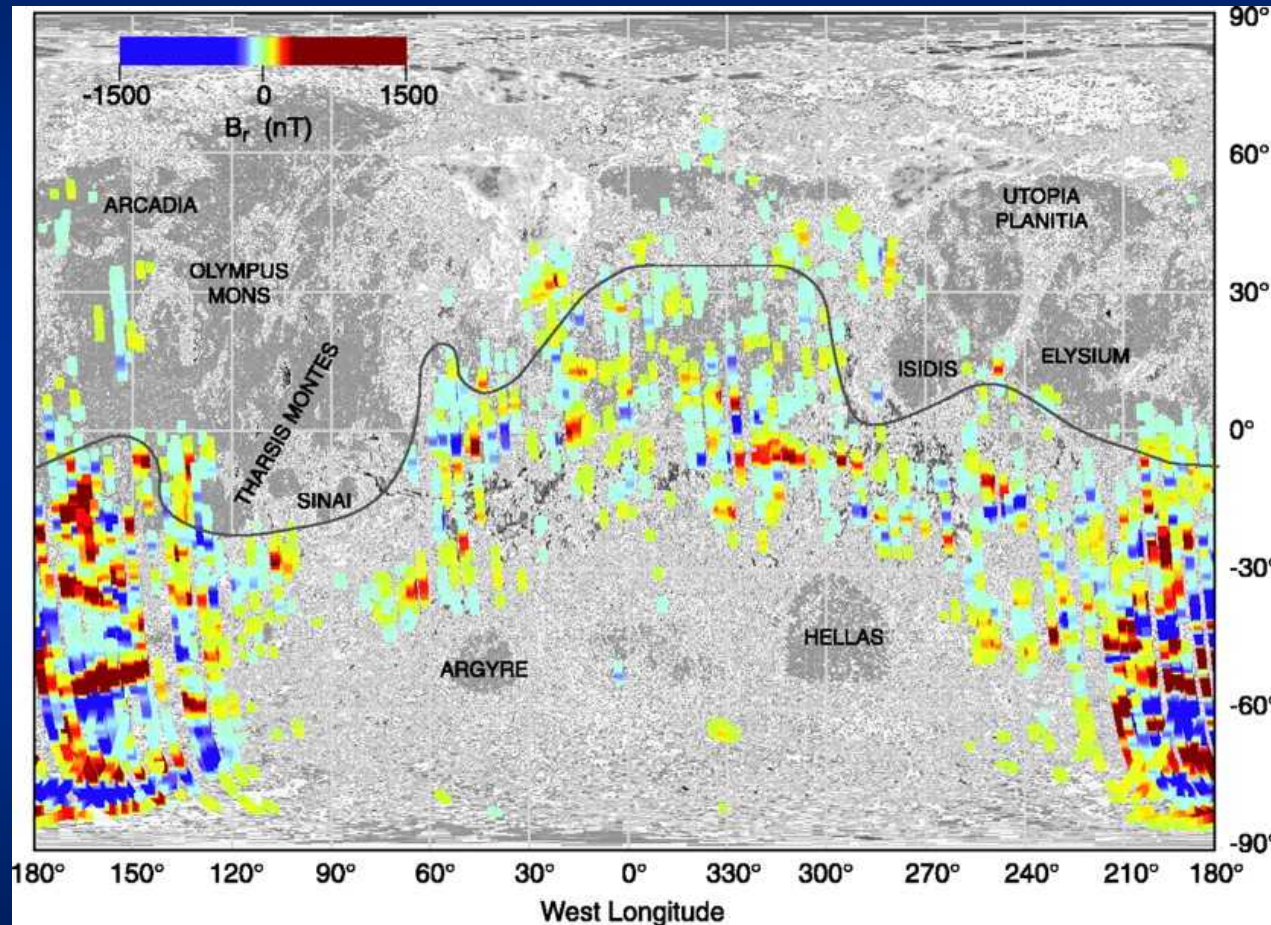
**Durch das Eindringen von Sonnenwindteilchen wurde im Laufe der Entwicklung die Atmosphäre ionisiert und fortgetragen.**

# 1.11 Mars

## 1.11.2 Planetares Umfeld

### 1.11.2.3

## Oberflächen-Magnetfeld



Früher war das Magnetfeld des Mars viel stärker, was sich an der verbliebenen Magnetisierung des Hochlandes ablesen lässt. Dadurch wurde auch die Atmosphäre abgeschirmt.

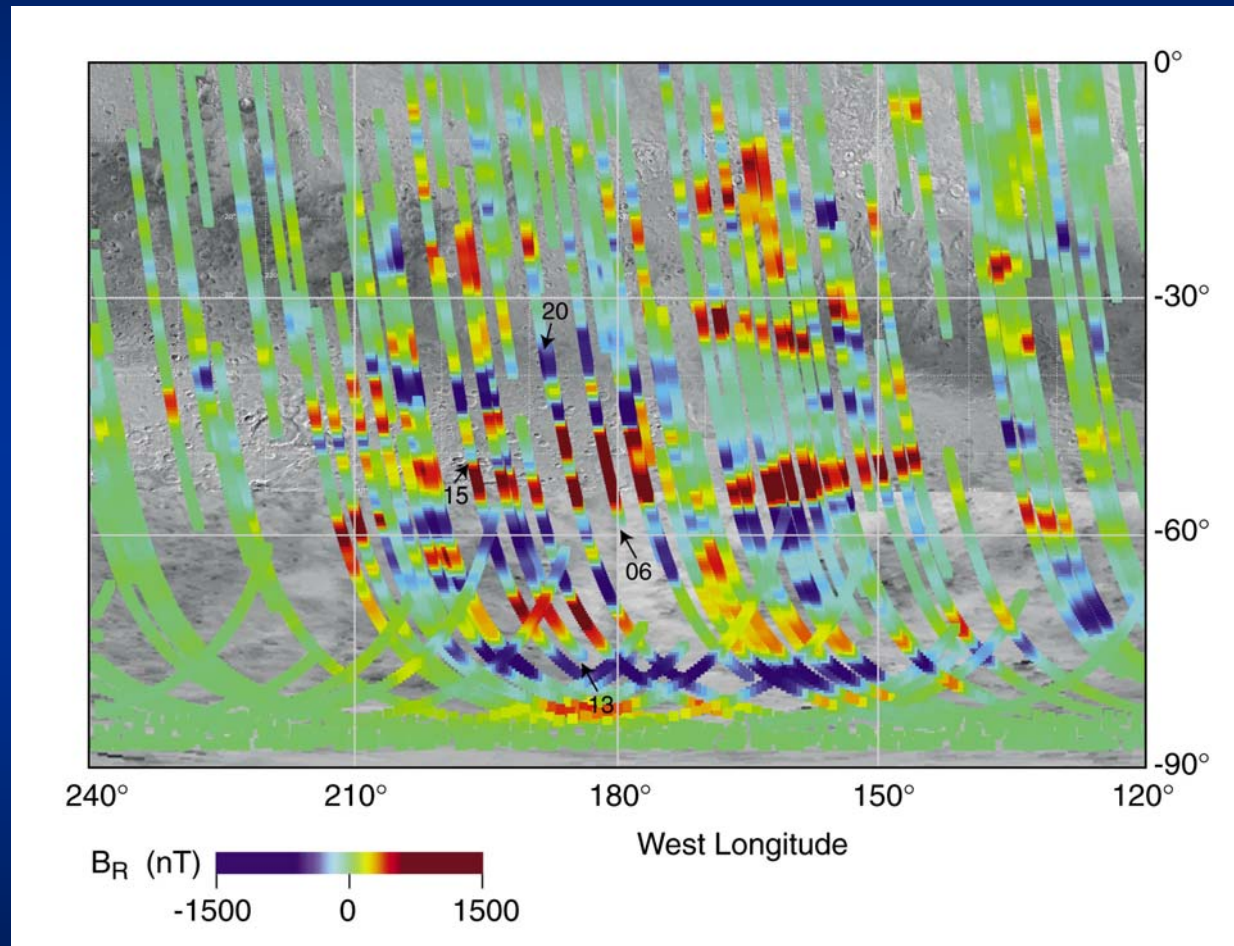
[NASA Mars Global Surveyor 1999]



# 1.11 Mars

## 1.11.2 Planetares Umfeld

### 1.11.2.3 Oberflächen-Magnetfeld

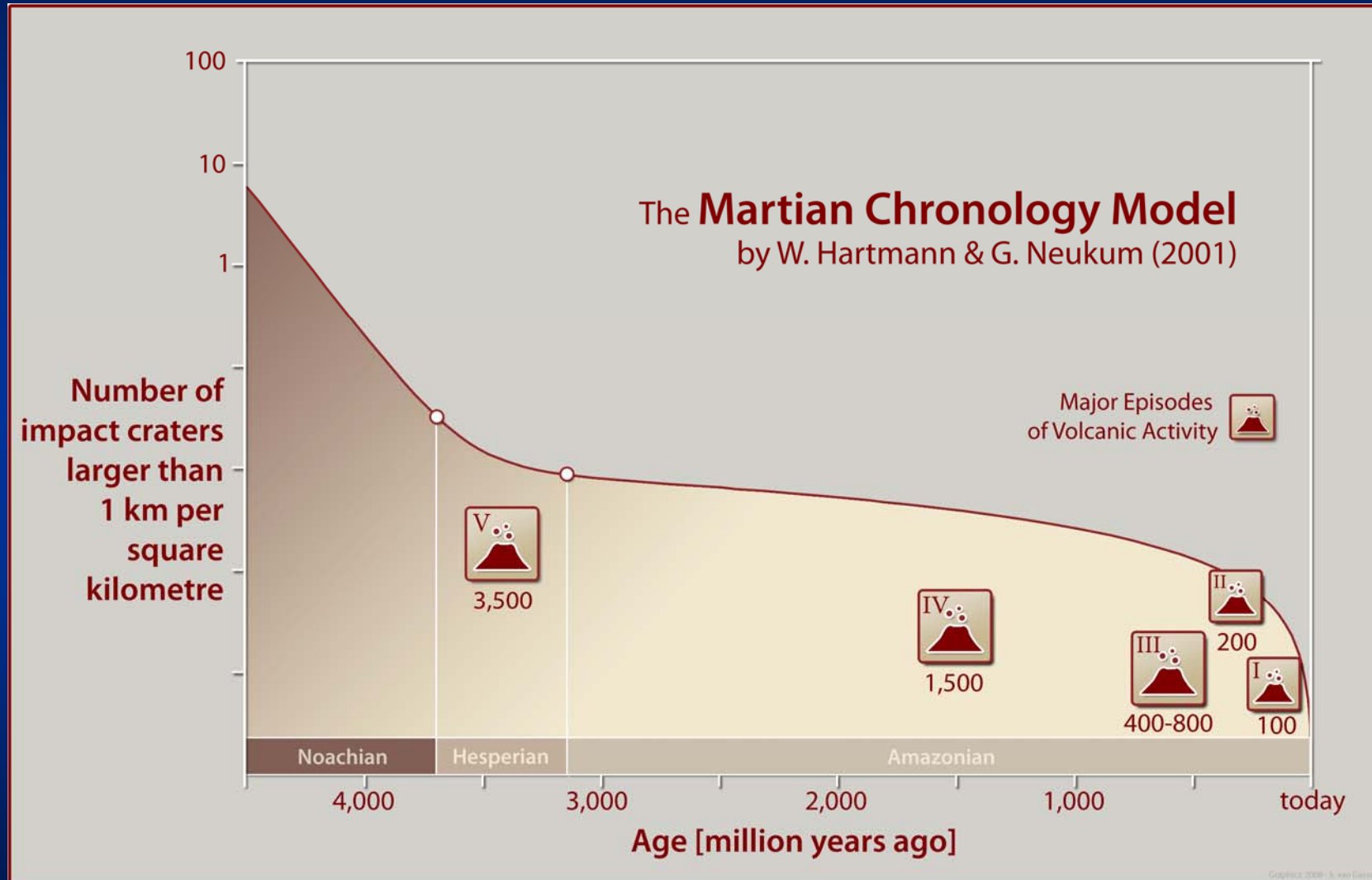


**Früher war das Magnetfeld des Mars viel stärker, was sich an der verbliebenen Magnetisierung des Hochlandes ablesen lässt. Dadurch wurde auch die Atmosphäre abgeschirmt.**

*[NASA Mars Global Surveyor 1999]*

# 1.11 Mars

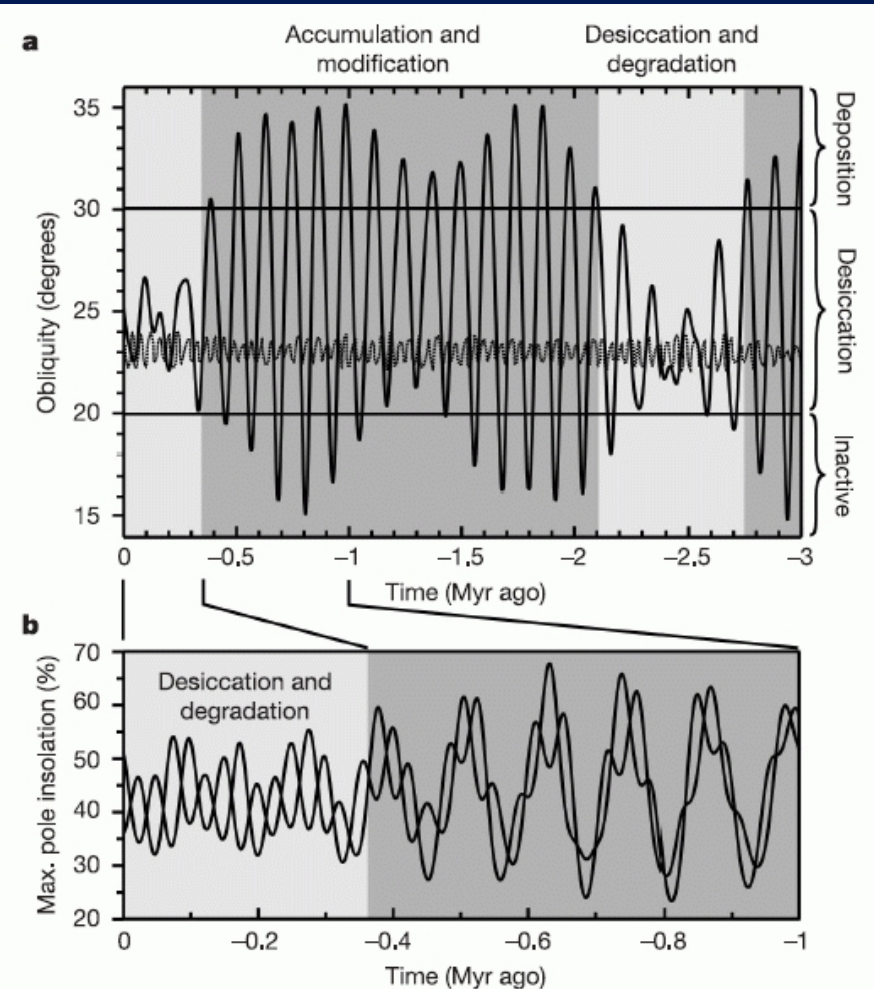
## 1.11.3 Entwicklungsgeschichte



# 1.11 Mars

## 1.11.3 Entwicklungsgeschichte

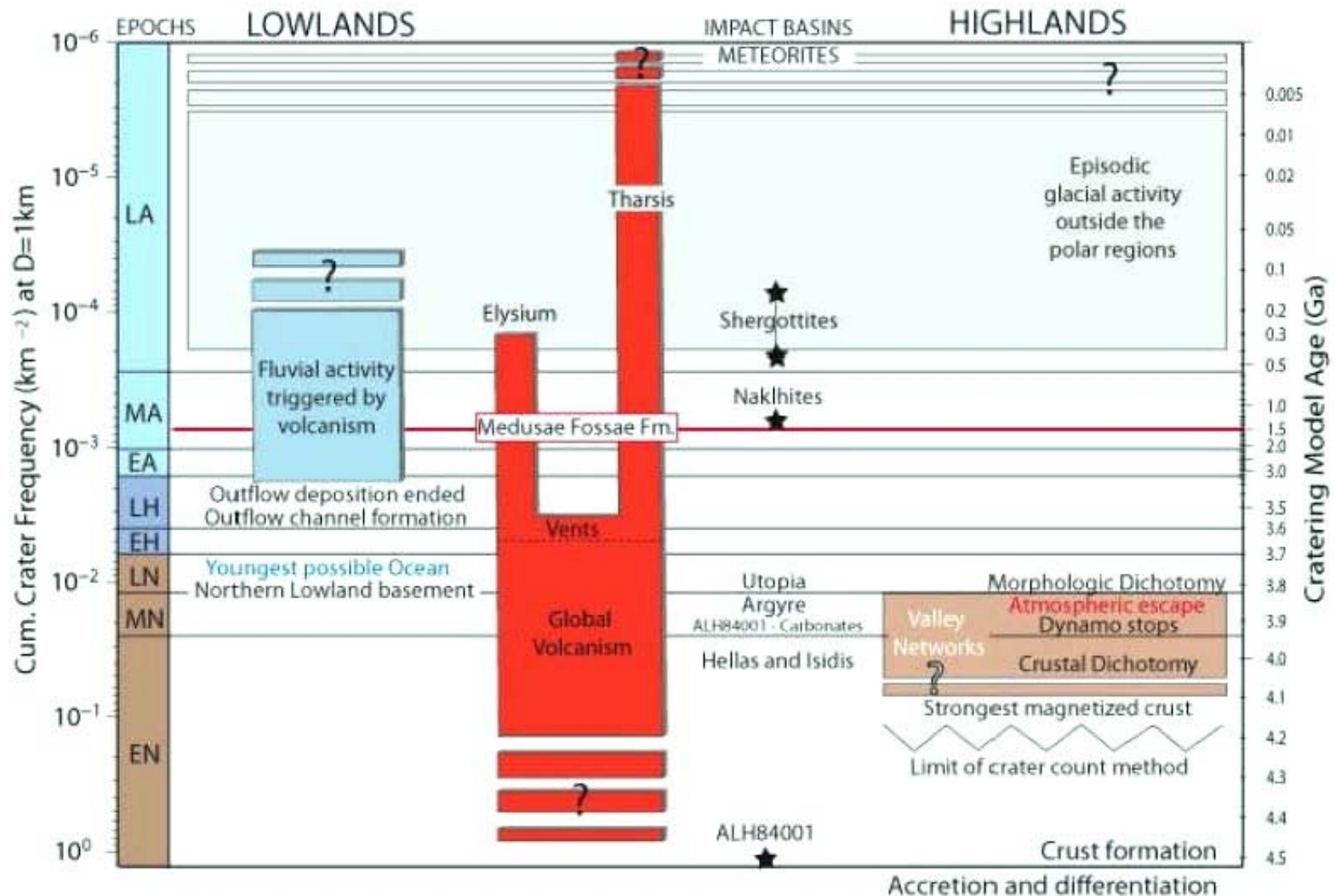
**Einfluss der Instabilität der Äquator-Neigung des Mars und der Exzentrizität der Marsbahn auf die Entwicklung der Atmosphäre und der Polkappen**



**Figure 4** Orbital forcing of climate in the past. **a**, Obliquity variations<sup>5</sup> for the past 3 Myr, with glacial (accumulation and modification; dark grey) and interglacial (desiccation and degradation; pale grey) periods marked. Low-amplitude line between 22° and 24° represents the obliquity range on Earth during the comparable period of history<sup>5</sup>. **b**, Maximal insolation of the north and south poles<sup>5</sup> for the past 1 Myr. During the past 300 kyr, there is an asymmetry in insolation, but before 300 kyr ago, insolation is primarily driven by obliquity and is symmetric.

# 1.11 Mars

## 1.11.3 Entwicklungsgeschichte



„Aktuelle Astronomie – Einführungskurs“ von Dr. Jürgen Wirth © 2016

Aus: Stefanie Werner, Dissertation, FU Berlin 2006



# 1.11 Mars

## 1.11.3 Entwicklungsgeschichte

### Geschichte des Wassers auf Mars [Mrd. a]



4.0



3.8



3.5



2.0



1.0



Heute

# 1.11 Mars

## 1.11.3 Entwicklungsgeschichte

Zeit /Ga	Zeitalter	Prozesse	Ereignisse	Bedingungen
4.5	Unteres Noachium	Akkretion, Magma-Ozean?		dichte Atmosphäre feucht-warm, flüssiges Wasser, T>0°C
4.1		Krustenbildung (~50 km)	Alter des Meteoriten ALH84001	
		Kerndynamo startet	stärkste Gesteinsmagnetisierung	
		globaler Ausgasungsvulkanismus, Aufbau einer dichten Atmosphäre	Hellas- und Isidis-Einschläge	
3.95	Mittleres Noachium	Kerndynamo stoppt	Entstehung der Krustenungleichheit Nord-Süd	
		Verlust der Atmosphäre	Entstehung der morphologischen Ungleichheit Nord-Süd	
			Argyre-Einschlag	
3.8	Oberes Noachium	Atmosphäre verloren	Utopia-Einschlag	dünne Atmosphäre kalt, eisbedeckte Seen, T<0°C
		jüngster Ozean	Entstehung der Basis des nördlichen Tieflandes	
		Tharsis-Plume startet		
3.7	Unteres Hesperium			
3.6	Oberes Hesperium	Bildung von Ausflußkanälen		
3.0	Unteres Amazonium	vulkanisch bedingte		Wasser nur in porösem Gestein, Grundeis (3-7 km tief ?), Grundwasser (?)
2.0	Mittleres Amazonium	Flußaktivitäten, mafischer Vulkanismus endet		
1.5		Tharsis -Aktivität endet ?	Alter des Meteoriten Naklha	Druck bei Tripelpunkt des Wassers, kein dauerhaft flüssiges Wasser
0.6	Oberes Amazonium	episodische Vereisungen außerhalb der Polregionen		Wassers, kein dauerhaft flüssiges Wasser
		Elysium-Aktivität endet		
0.3		Tharsis-Plume aktiv?	Alter des Meteoriten Shergotty	

# 1.11 Mars

## 1.11.3 Atmosphärische Massenbilanz

- **Gashülle:**  $\sim 2.5 \cdot 10^{16}$  kg (6.36 mbar)
- **gebundenes CO<sub>2</sub> (in Gestein):**  $\leq 5 \cdot 10^{16}$  kg\*
- **Verlust durch Sonnenwind:**  $1.5 \times 10^{24}$ /s, hauptsächlich O<sub>2</sub><sup>+</sup>  
 $\approx 2 \cdot 10^6$  kg/a\*\*
- **Gesamtverlust in  $3.5 \cdot 10^9$  a:**  $7 \cdot 10^{15}$  kg ( $\approx 1/4$ )\*\*  
 $0.2 - 4$  mbar (CO<sub>2</sub>)\*\*\*  
wenige cm H<sub>2</sub>O\*\*\*
- **Abgeschätzte Uratmosphäre:**  $\approx 11$  mbar
- **Erfordernisse für warm-feuchten Mars:**  $1 - 5$  bar (CO<sub>2</sub>)\*\*\*  
 $3.9 \cdot 10^{18} - 2 \cdot 10^{19}$  kg  
mehrere Hundert m H<sub>2</sub>O\*\*\*  
 $2.9 - 5.8 \cdot 10^{19}$  kg (200 – 400 m)
- **Gesamtbilanz:**  $3.3 \cdot 10^{19} - 7.8 \cdot 10^{19}$  kg →  $8.5 - 20$  bar  
→ **Erhebliche Diskrepanz zwischen Erfordernis und Beobachtung !**

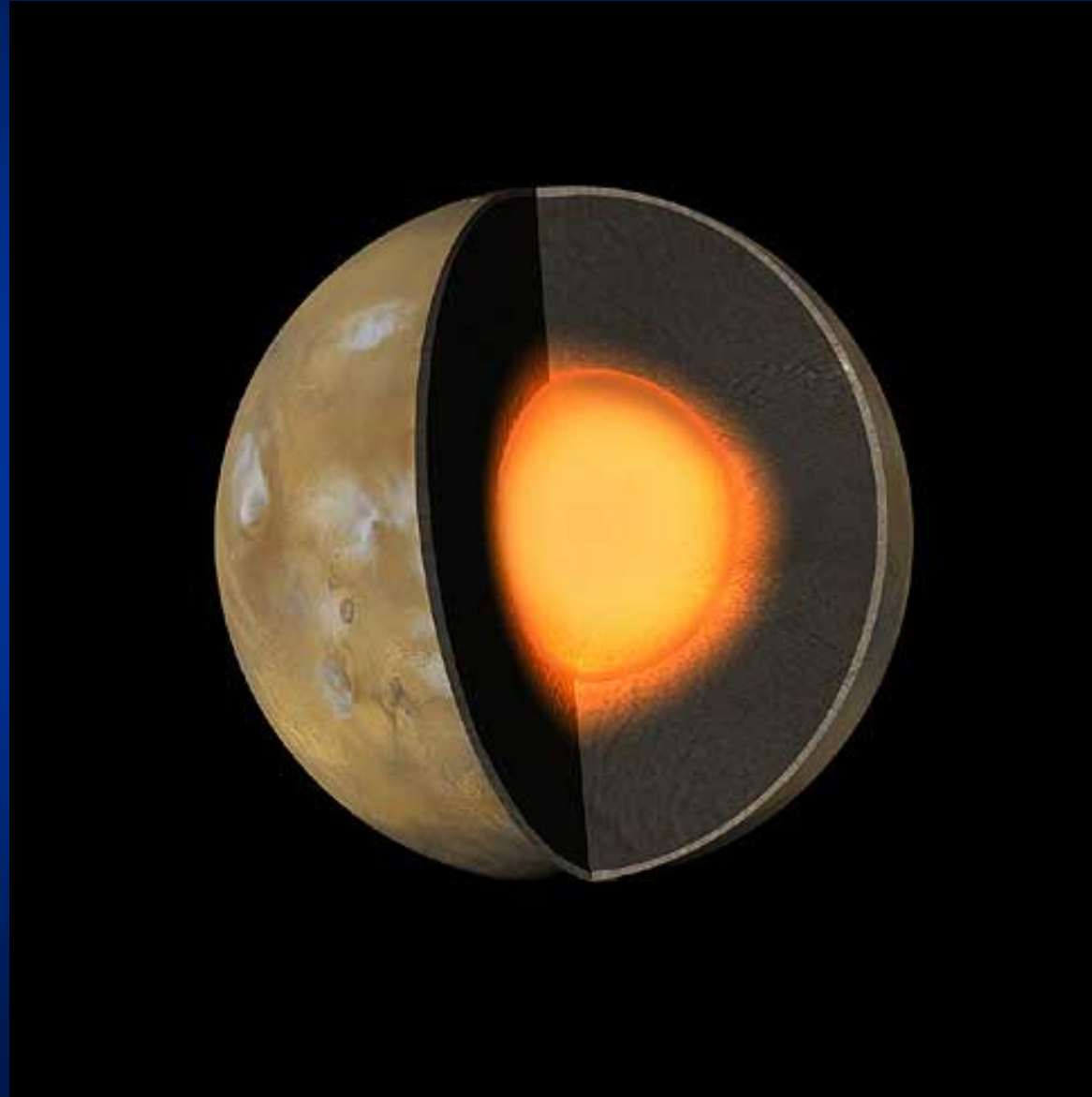
\* Christopher S. Edwards und Bethany L. Ehlmann (NASA / JPL-Caltech) 2015

\*\* Jakosky et al. [Science 350 (2015)] - Daten von MAVEN

\*\*\* Barabash et al. [Science 315, 501 (2007)] - Daten von MAVEN

# 1.11 Mars

## 1.11.4 Innerer Aufbau



# 1.11 Mars

## 1.11.4 Innerer Aufbau

