

Sterne V: Pulsationsveränderliche, Nukleosynthese der schweren ($> \text{Fe}$) Elemente

14 Dezember, 2006

Laura Baudis, lbaudis@physik.rwth-aachen.de
Physikalisches Institut Ib, RWTH Aachen

Inhalt

- Pulsationsveränderliche

 - Klassifikation

 - Cepheiden

 - Perioden-Leuchtkraftbeziehung

 - Entfernungsbestimmung mit Cepheiden

 - Mira-Sterne

- Nukleosynthese der schweren Elemente ($> \text{Fe}$)

 - s-Prozess

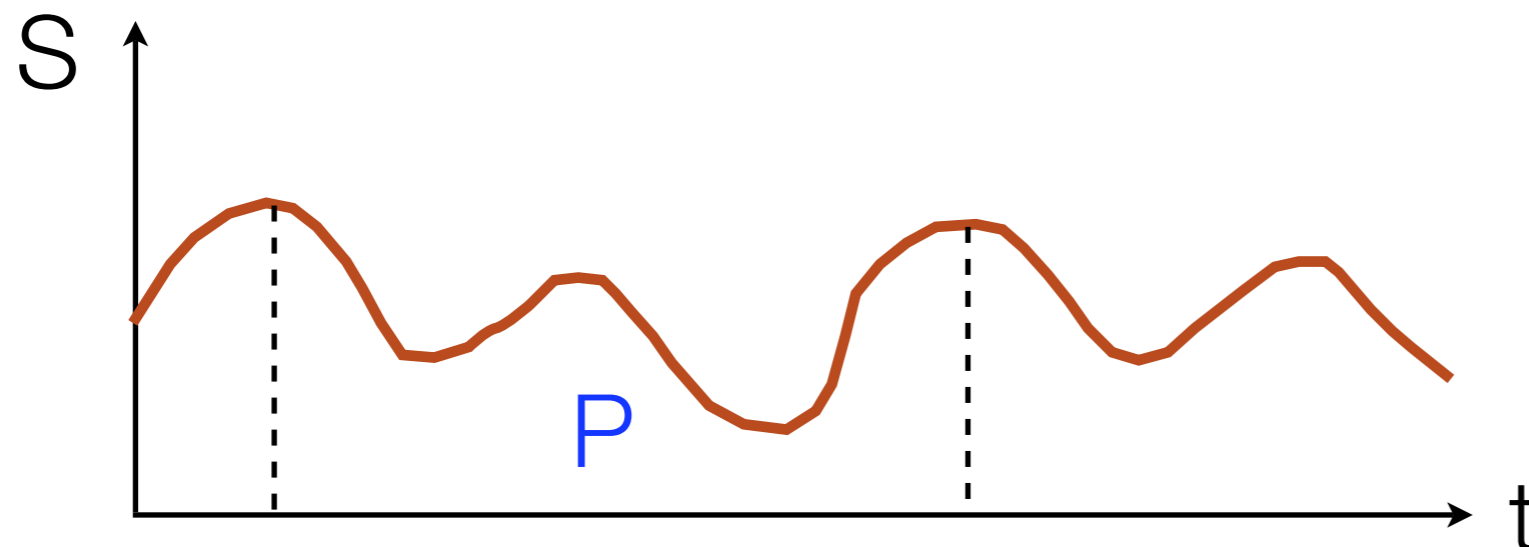
 - r-Prozess

- Literatur:

 - Carroll, Ostlie, Kapitel 14; Weigert, Wendker, Wisotzki, Kapitel 8.3.2; Unsöld, Baschek, Kapitel 7.4

Veränderliche Sterne

- **Sterne, die deutliche Helligkeitsschwankungen zeigen**
- Erste Beobachtungen: 16. zum 17. Jahrhundert -> starkes Argument gegen das Aristotelische Dogma von der Unveränderlichkeit des Himmels
- **1595 David Fabricius** beobachtet den Stern α Ceti, der seine Helligkeit mit einer Periode von 11 Monaten veränderte => **Mira** ("die Wunderbare")
- Bezeichnung veränderlicher Sterne: mit R, S, T, ... Z + Genitiv des Sternbildes, danach RR, RS, .. ZZ, AA, ... AZ, BB, ... QZ, danach V335, V336... + Genitiv des Sternbildes (V von Variabler Stern, zB V1016 Cygni)
- Helligkeitsschwankungen: von gerade noch messbaren bis zu vielen Zehnerpotenzen (Intensitätsveränderungen), in Zeitspannen von Bruchteilen von Sekunden bis zu mehreren Jahren
- **Lichtkurve** = Verlauf des Strahlungsstromes als Funktion der Zeit $S(t)$



Pulsationsveränderliche

- In bestimmten Phasen ihrer Entwicklung sind Sterne nicht stabil, sondern **oszillieren um einen Gleichgewichtszustand**

=> **pulsierende helligkeitsveränderliche Sterne**

→ liegen in eng umgrenzter Region im HRD = **“Instabilitätsstreifen”**

→ wenn dieser im Laufe der Sternentwicklung gekreuzt wird, wird der Stern zeitweilig zum Veränderlichen:

δ Cephei-Sterne

RR Lyrae-Sterne

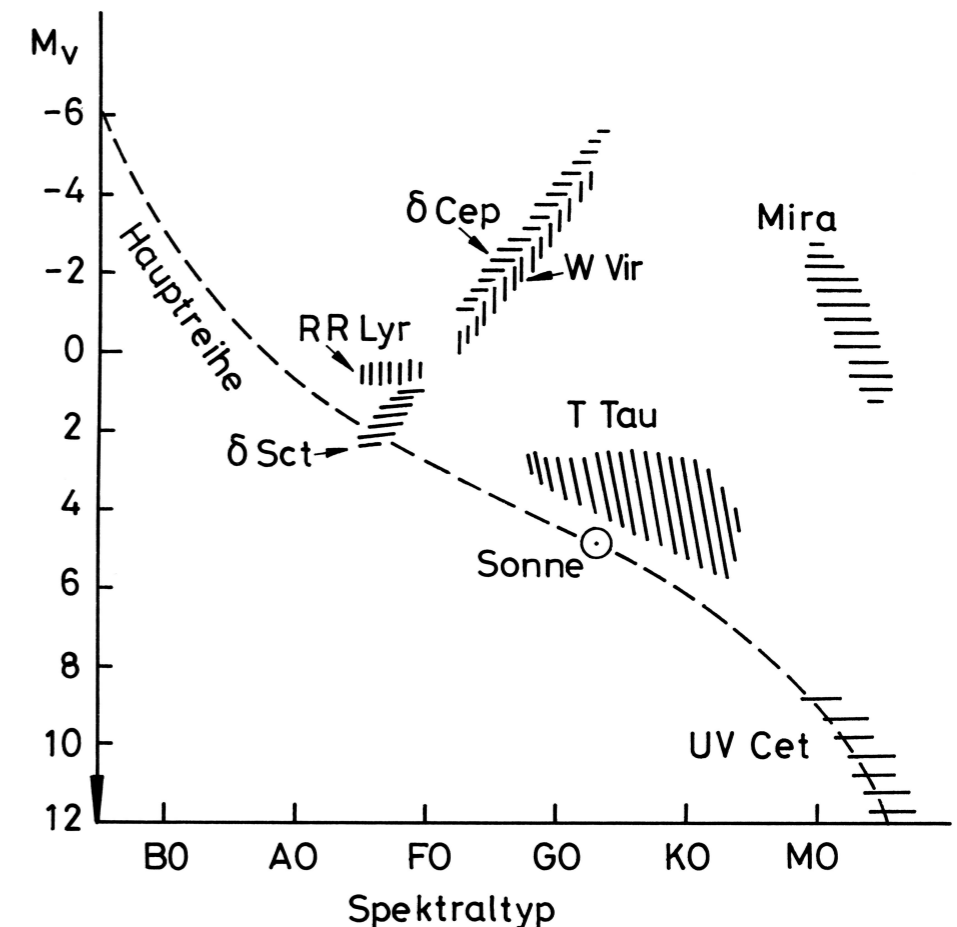
W Virginis-Sterne

δ Scuti-Sterne (Zwergcepheiden)

Mira-Veränderliche

T Tauri

...



Pulsationsveränderliche: Klassifikation

- **RR Lyrae** (oder Haufenveränderliche): Sterne mit regelmäßigem Lichtwechsel in Perioden von etwa 0.2 - 1.2 d, Helligkeitsamplituden ~ 1 mag (0.4 - 2 mag); Spektraltyp A und F; Unterklasse von Cepheiden; wichtig in Kugelsternhaufen
- **δ -Cephei Sterne** (klassische Cepheiden): Sterne mit regelmäßigem Lichtwechsel in Perioden von etwa 1 - 50d, Helligkeitsamplituden ~ 2 mag (0.1 - 2 mag); Spektraltyp F5 - K5; in den Spiralarmen der Milchstrasse
- **W Virginis-Sterne**: sehr ähnlich den δ -Cephei Sternen, jedoch absolut schwächer (um 1-2 mag) und mit kleineren Massen; im Halo und Kernbereich der Milchstraße
- **Zwergcepheiden und δ -Scuti Sterne**: kurzperiodische Veränderliche in der Nähe der Hauptsequenz, Spektraltyp A und F, Perioden 0.03 - 0.2 d; Helligkeitsamplituden von 0.3 - 0.8 mag (Zwergcepheiden) und ≤ 0.1 mag bei den δ -Scuti.
- **Mira Veränderliche** (oder langperiodische Veränderliche): Riesensterne späten Spektraltyps, Perioden von 80 d - 500 d; Helligkeitsamplituden von 2.5 - 8 mag im Visuellen; sowohl bei jungen als auch alten Sternpopulationen der Milchstrasse
- **T-Tauri Sterne**: junge Sterne, die sich noch nicht im hydrostatischen Gleichgewicht befinden, daher noch oberhalb der Hauptreihe; Spektralklasse F - M; in dichten, interstellaren Wolken

Pulsationsveränderliche

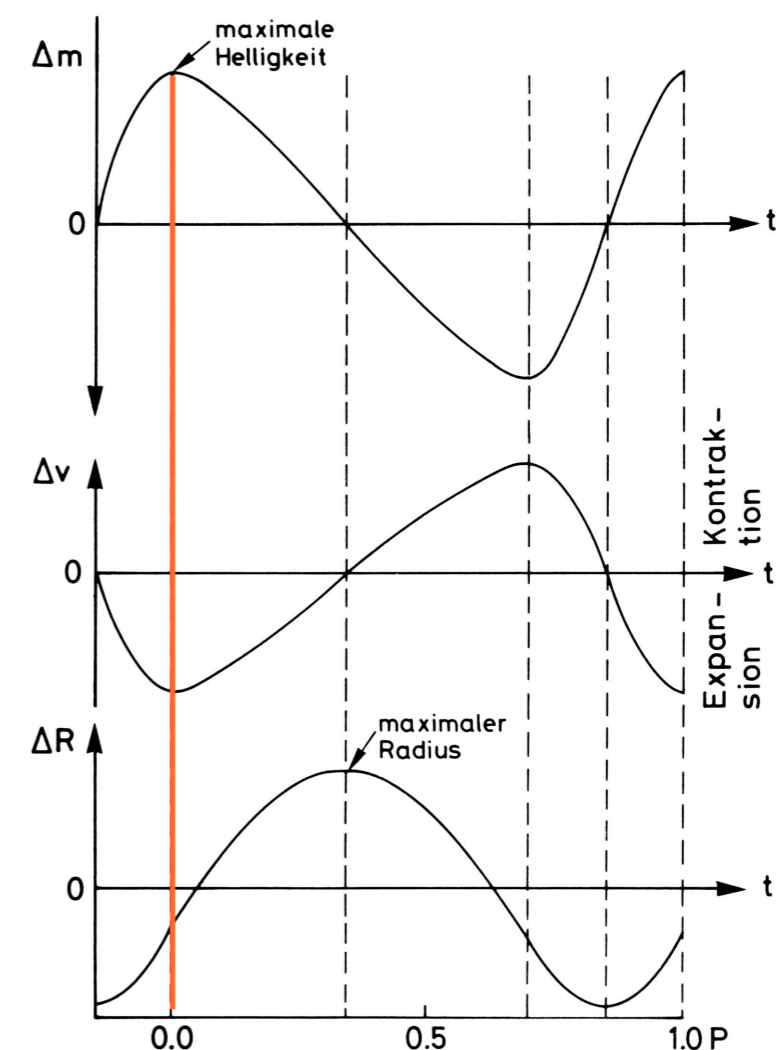
- Die regelmäßigen Helligkeitsänderungen sind auf **physikalische Veränderungen** der Sterne zurückzuführen => die Sterne pulsieren, dh sie oszillieren periodisch um eine Gleichgewichtsdausdehnung, relativ zu welcher sie sich **ausdehnen und kontrahieren**
- Spektrum:** die Spektrallinien zeigen ein periodisches Pendeln um eine mittlere Wellenlänge, wobei P =Periode der Helligkeitsschwankung => Dopplereffekt => periodische Änderung der Radialgeschwindigkeit mit der Amplitude (10-20 km s⁻¹):

$$\Delta v_r = \frac{\Delta \lambda}{\lambda_0} \cdot c$$

- Integration über die Radialgeschwindigkeit

=> **Radienänderung des Sterns $\approx 10\%$ des mittleren Radius**

$$\int_{t_1}^{t_2} v_r dt = \int_{t_1}^{t_2} \frac{dx}{dt} dt = x_2 - x_1$$

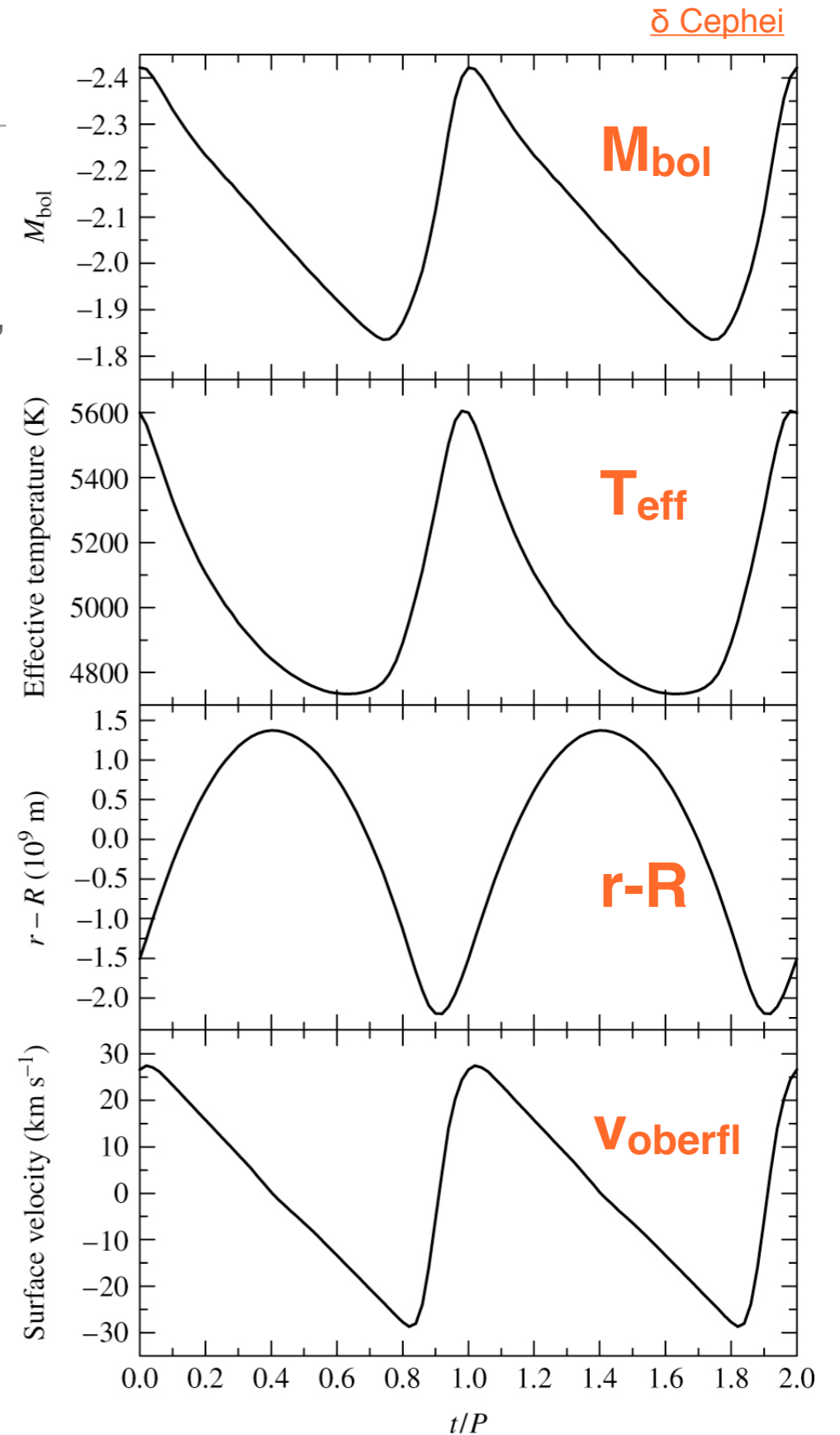
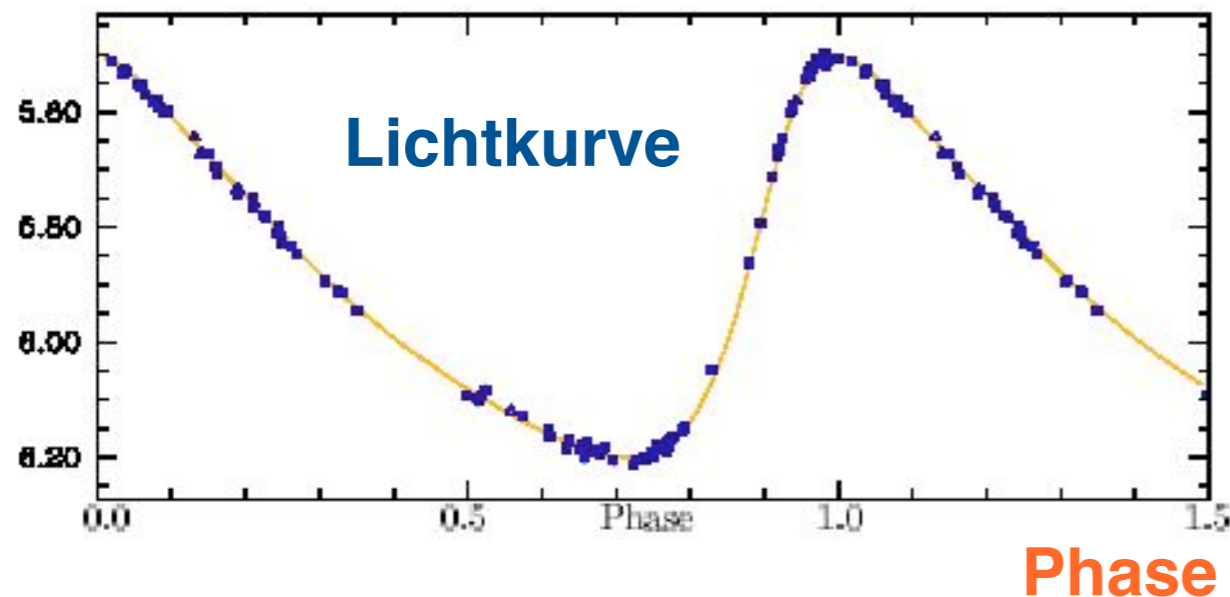


Cepheiden

- wichtigste Klasse von **Pulsationsveränderlichen**:
- **δ Cephei-Sterne oder Cepheiden** (nach dem δ -Cephei Stern, entdeckt 1784 von John Goodrick, England)
- **Pulsationen**: periodische Variationen von Radius und Effektivtemperatur

=> **Variation in der Leuchtkraft**

$$L \propto T_{\text{eff}}^4 \cdot R^2$$



Cepheiden

- **Riesensterne, die in ihrer Entwicklung während des He-Brennens den Cepheiden-Bereich kreuzen**
- Im “**Instabilitätsstreifen**” liegen besondere Verhältnisse der P- und T-Schichtung vor, insbesondere die **Lage + Ausdehnung der He⁺-Ionisationszone** in den äußeren Sternschichten => kleine, zufällige radiale Störungen des Sterns schaukeln sich zu großen Schwankungen auf, wegen **anomales Verhalten des Absorptionskoeffizienten κ**
- bei **kleinen Schwingungen** wird die Sternmaterie nahezu adiabatisch komprimiert/expandiert
- kleine **Abweichungen von der Adiabasie** => Dämpfung oder Anregung der Schwingung, je nach Vorzeichen; da

$$\kappa \propto \frac{\rho}{T^{3.5}}$$

- nimmt κ **in den meisten Sternregionen mit Kompression ab** (T, ρ nehmen zu)
=> Dämpfung aller Störungen!
- **in der ausgedehnten He⁺-Ionisationszone der Cepheiden steigt κ bei nahezu adiabatischer Kompression, und sinkt bei der Expansion**

Cepheiden

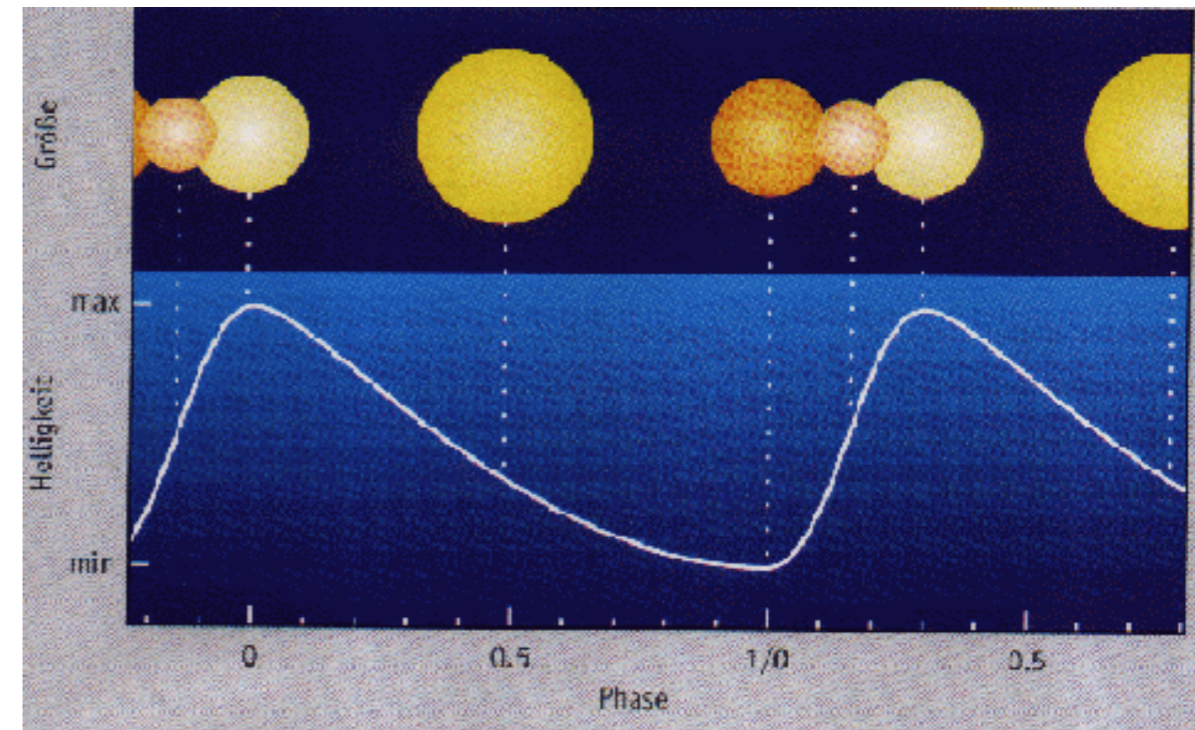
=> Ursache für Pulsationen:

“ κ -Mechanismus” = κ wächst mit Kompression!

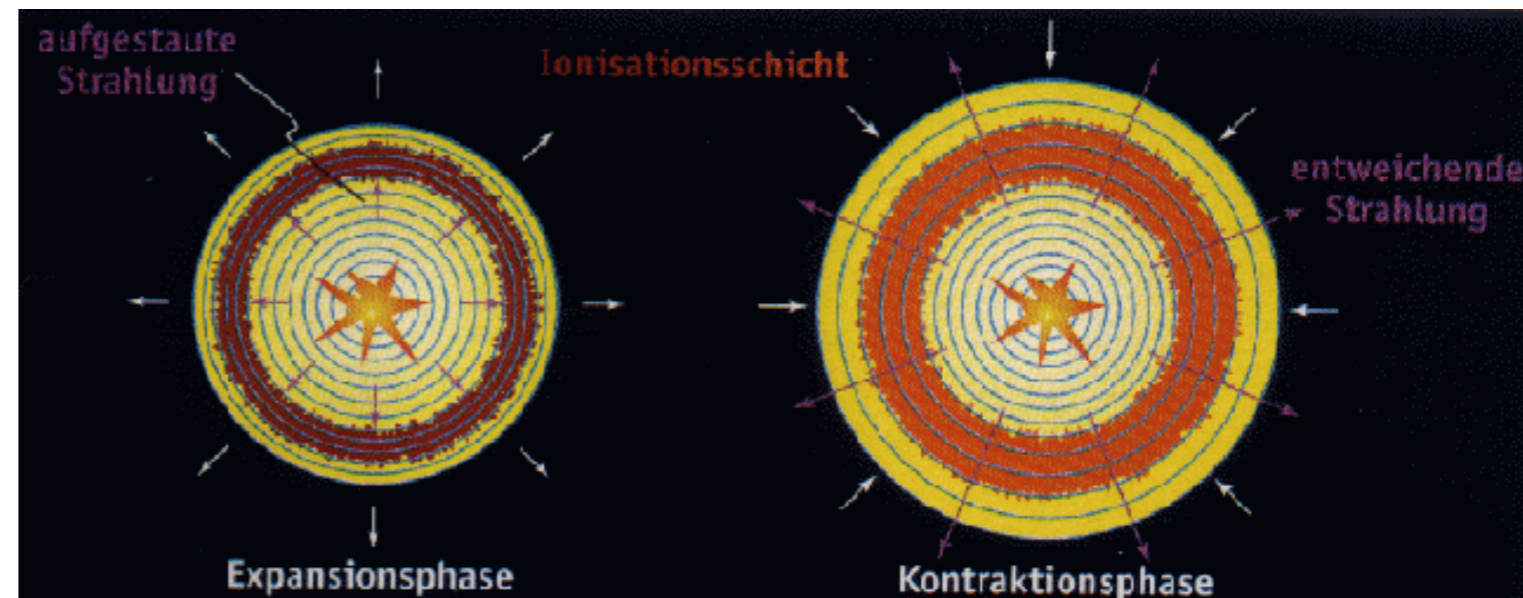
In einem teilweise ionisierten Gas kann Teil der Arbeit in die Ionisation gehen.

Kompression der (teilweise) ionisierten Gaszone führt zu einer Erhöhung der Opazität \rightarrow der Strahlungsdruck wächst \rightarrow die Gaszone dehnt sich aus, wird kühler $\rightarrow \kappa$ nimmt ab \rightarrow Strahlung kann entweichen, Druck wird niedriger, Gaszone kann wieder komprimiert werden,...

\rightarrow dabei wird Energie aus dem Strahlungsstrom entnommen und in Schwingungsenergie umgewandelt



<http://www.astro.uni-bonn.de/~deboer>



Cepheiden

- sehr wichtige Sterne, da eine Beziehung zwischen Schwingungsperiode und Leuchtkraft (bzw. absoluter Helligkeit) existiert:

- **Perioden-Leuchtkraft-Beziehung:**

$$M_V = A \cdot \log\left(\frac{P}{1d}\right) + B$$

wobei $A \approx -2.8$ und $B \approx -1.3$

- **typische Perioden:** Tage (Stern δ -Cephei $P=5.37$ d)

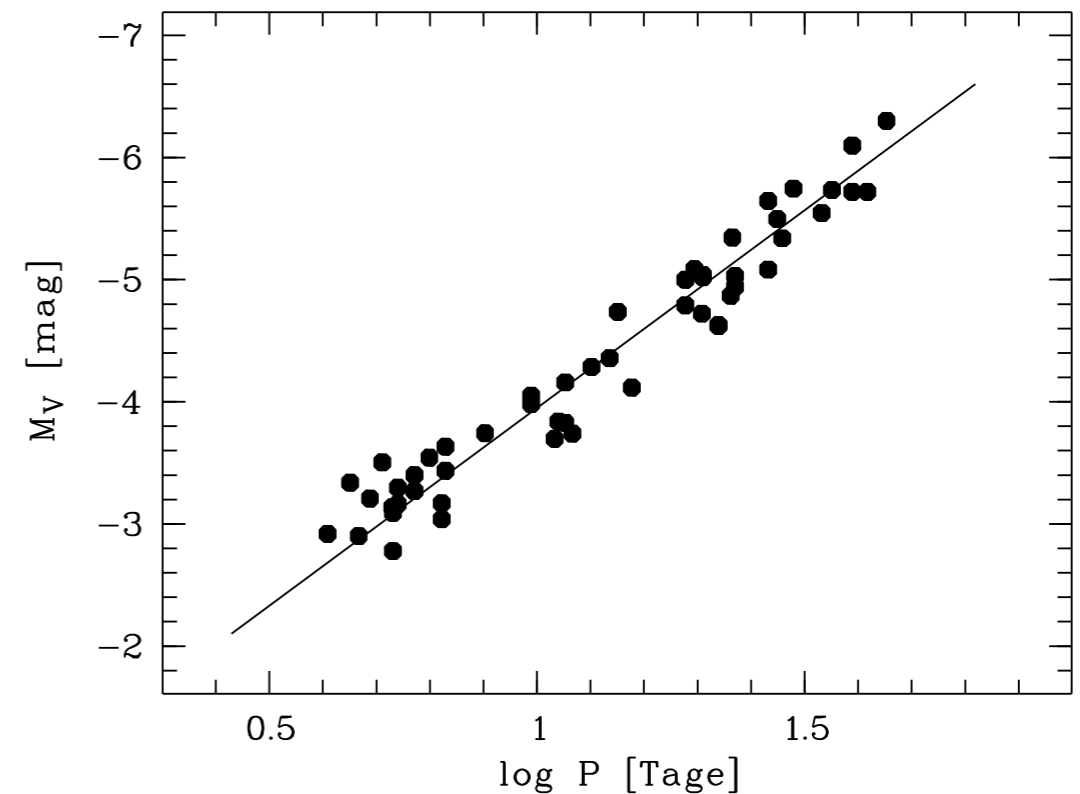
- **Historisch:**

1912: Henrietta S. Leavitt (US Astronomin am Harvard College)

fand heraus, dass die absolute Helligkeit (M) der Cepheiden proportional zum Logarithmus der Periode P ist (da $L \propto$ Sternoberfläche)

1913: Ejnar Hertzsprung (dänischer Astronom) bestimmt die Entfernung einiger Cepheiden der Milchstraße

1930~1960: Hubble und danach Sandage bestimmen die Entfernungen zu einigen Dutzend Galaxien



COURTESY OF HARVARD UNIVERSITY ARCHIVES

Entfernungsbestimmungen mit Cepheiden

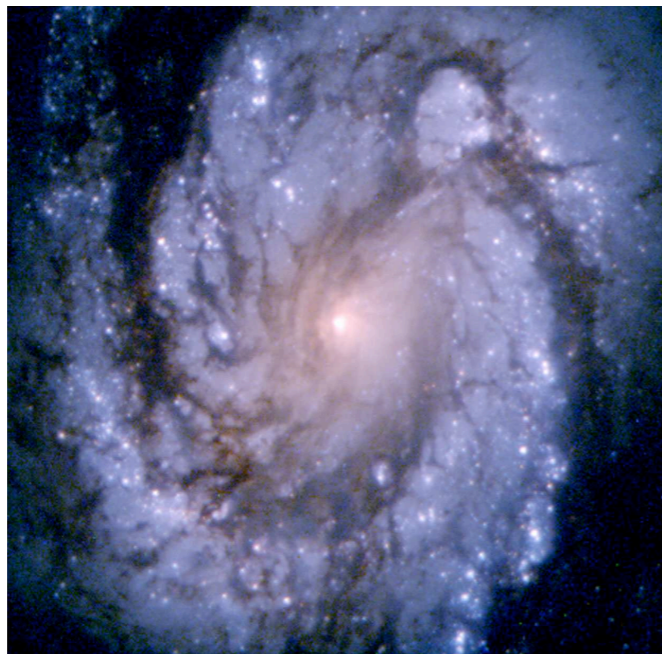
- **Direkte Meßgrößen:** Perioden P und scheinbare Helligkeiten m
- Aus den Perioden werden die **absoluten Helligkeiten M** berechnet

=> **Entfernungsmodul:**
$$m - M = -5 + 5 \log \frac{d}{1 \text{ pc}} \Rightarrow d$$

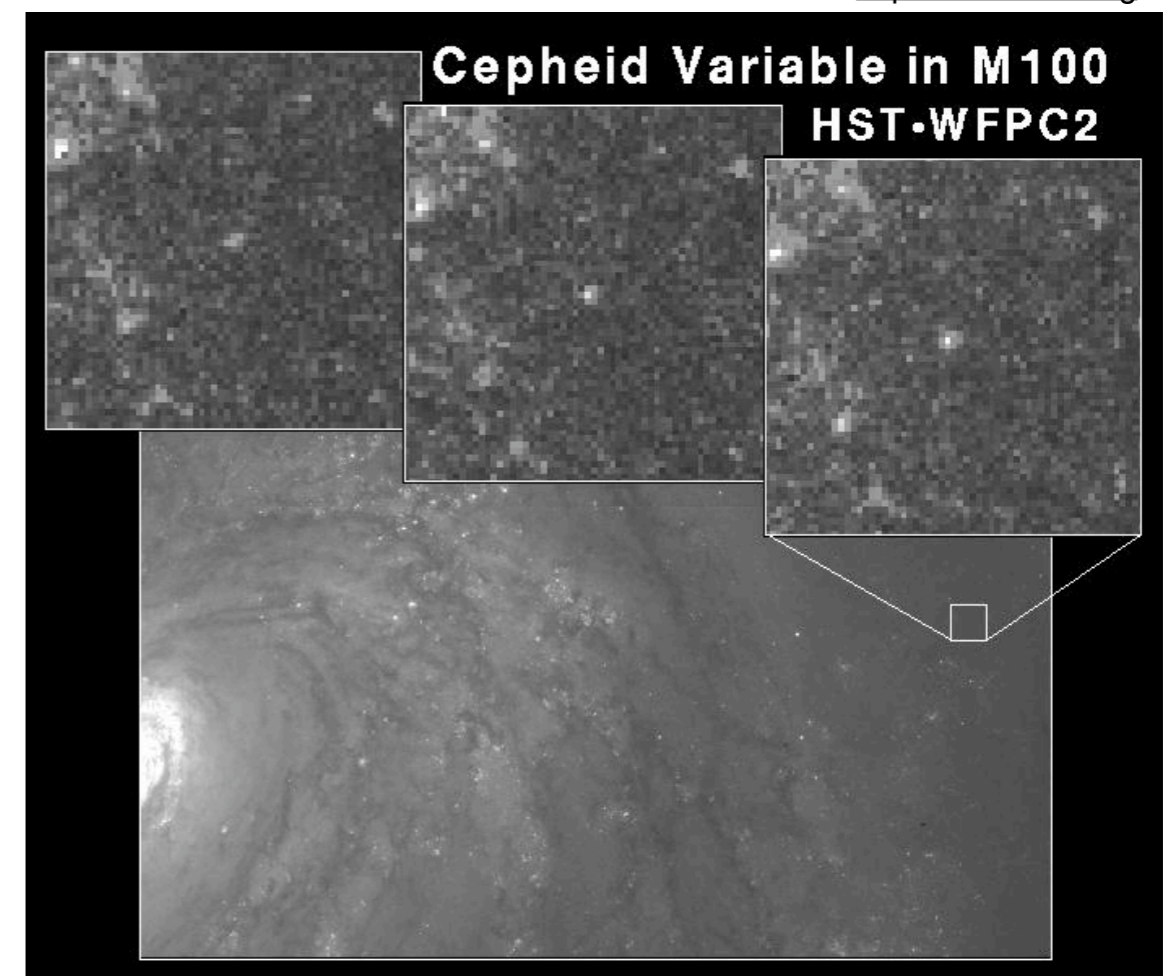
- Cepheiden sind Überriesen mit Massen $M \sim 5 \dots 10 \times M_{\odot}$

=> sie sind in großen Entfernungen sichtbar,
sogar in weit entfernten Galaxien!

- **Beispiel:** Spiralgalaxie M100: $d = (56 \times 10^6 \pm 6) \text{ Lyr}$



<http://hubblesite.org/>



Periode-Dichte Beziehung

- Die radialen Oszillationen eines Sterns sind das Ergebnis von Schallwellen die im Sterninneren resonieren. Die Pulsationsperiode ist:

$$\Pi \approx 2\pi t_H = \sqrt{\frac{3\pi}{G\bar{\rho}}} \qquad \bar{\rho} = M \cdot \left[\frac{4}{3} \pi R_0^3 \right]^{-1}$$

=> Periode-Dichte Beziehung:

$$\Pi \sqrt{\bar{\rho}} = \text{const.}$$

- Π wird wesentlich durch den Sternradius R bestimmt; mit R ist auch die Leuchtkraft L bestimmt, da der Cepheiden-Streifen nur eine relativ kleine Breite $\Delta \log(T_{\text{eff}})$ in der Effektivtemperatur hat

=> Zusammenhang zwischen P und L

- ZB für typische Cepheiden:

$$M = 5 M_{\odot}$$

$$R = 50 R_{\odot}$$

$$\Rightarrow \Pi \approx 10 d$$

Mira-Sterne

- sehr kühle Riesensterne auf dem asymptotischen Riesenast (AGB)
- große Amplituden, große Perioden der Lichtkurven; Unregelmäßigkeiten in den Lichtkurven sind recht häufig

- Sterne auf AGB: H und He-brennende Schalen, C-O-Kern

- Ursprung der **thermischen Pulse**:

C-O-Kern kontrahiert → Hülle expandiert → H-Brennen stoppt

He-Brennen geht nach außen, Vorrat endet → He-Brennen stoppt

Äußere Regionen kühlen sich ab und H-Hülle kontrahiert

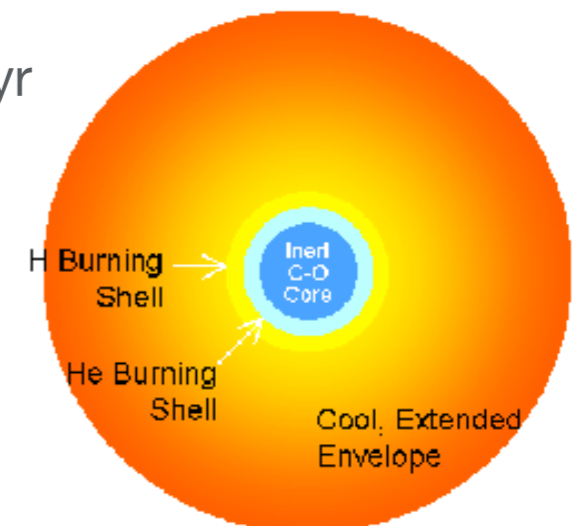
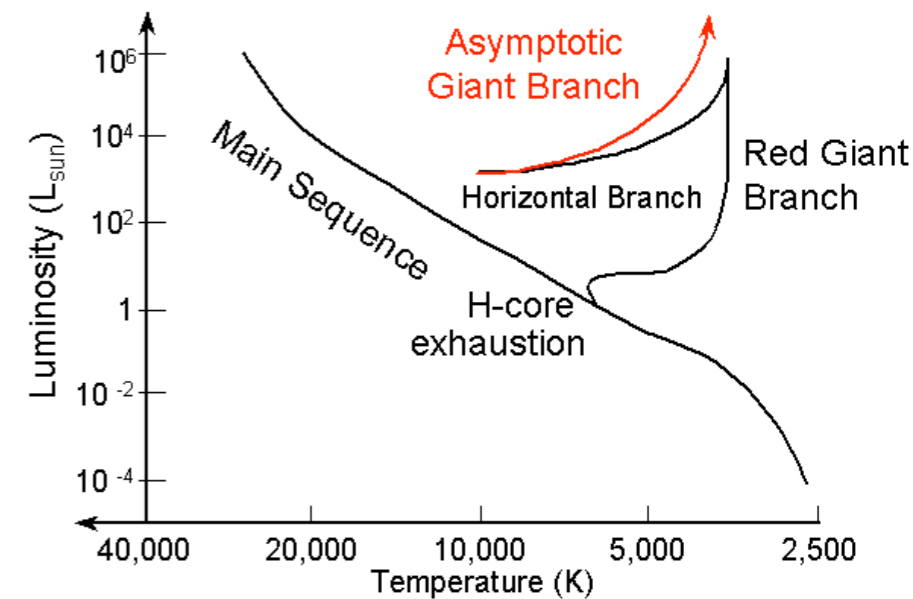
H-Hülle heizt sich durch die Gravitationsenergie auf, H-Brennen startet

H-Fusion generiert neues He und He-Fusion startet

- Thermische Pulse werden alle 100 - 1000 Jahre getriggert, und dauern 1-50 yr

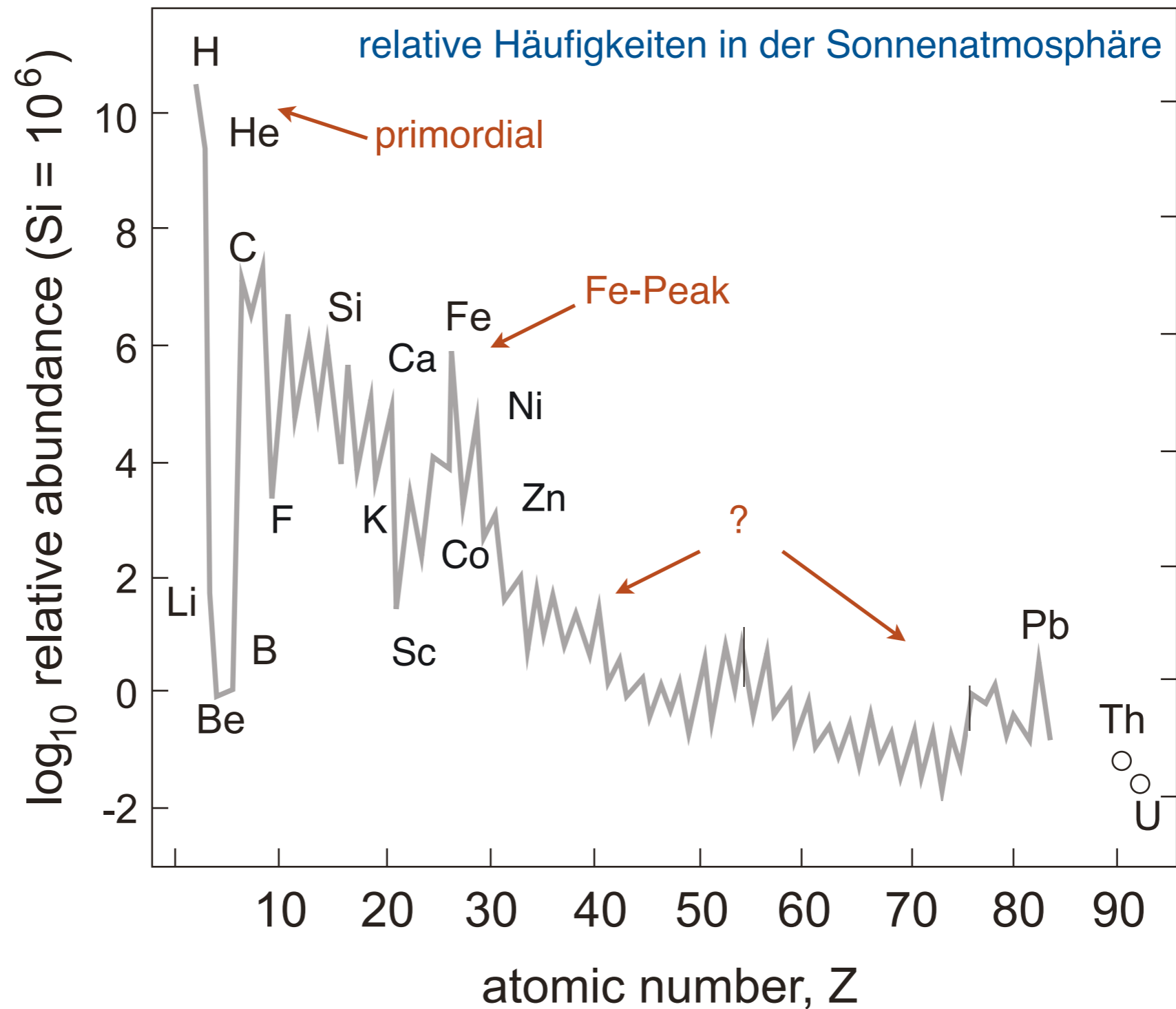
- Sie induzieren radiale Oszillationen an der Oberfläche mit Perioden ~ 1 Jahr

Details sind noch nicht gut verstanden!



Entstehung von schweren Elementen

- in thermischen Pulsen



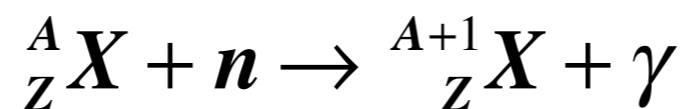
Der s-Prozess

- die Bildung der Elemente schwerer als Fe erfordert Energiezufuhr (endotherme Reaktionen)
- trotzdem werden schwere Elemente kontinuierlich produziert!
- 1952: Paul Merrill entdeckt Technetium (Tc, Z=43) in der Atmosphäre eines Roten Riesens. Tc hat keine stabilen Isotope, das langlebigste ist ^{98}Tc mit $T_{1/2} = 4.2 \times 10^6 \text{ yr}$ ($^{97}\text{Tc} \rightarrow T_{1/2} = 2.6 \times 10^6 \text{ yr}$, $^{99}\text{Tc} \rightarrow T_{1/2} = 2.1 \times 10^5 \text{ yr}$)

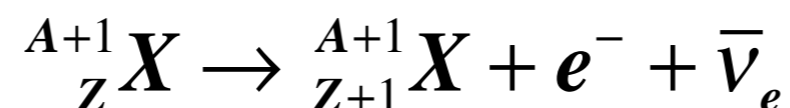
=>Tc muss in der Roten-Riesen-Phase des Sterns entstanden sein!

Wie ist es entstanden? Für hohe Z → steiler Anstieg der Coulomb-Barriere → Reaktionen mit geladenen Teilchen werden immer schwieriger!

- Neutronen sind neutral, sie werden nicht durch die Coulomb-Barriere verhindert!
- 1956: Idee von Suess und Urey; Details der Nukleosynthese: Burbidge, Burbidge, Fowler und Hoyle (B²FH, 1957) und unabhängig davon, Cameron (1957)
- Fe + Elemente in der Fe-Gruppe sind “Keime”; Elemente entstehen durch n-Einfang + β-Zerfall, wobei $\tau_{n\gamma} \gg \tau_{\beta} \Rightarrow$ **s-Prozess** (“slow”, n-Einfangsraten sind viel langsamer als die Beta-Zerfallsraten):



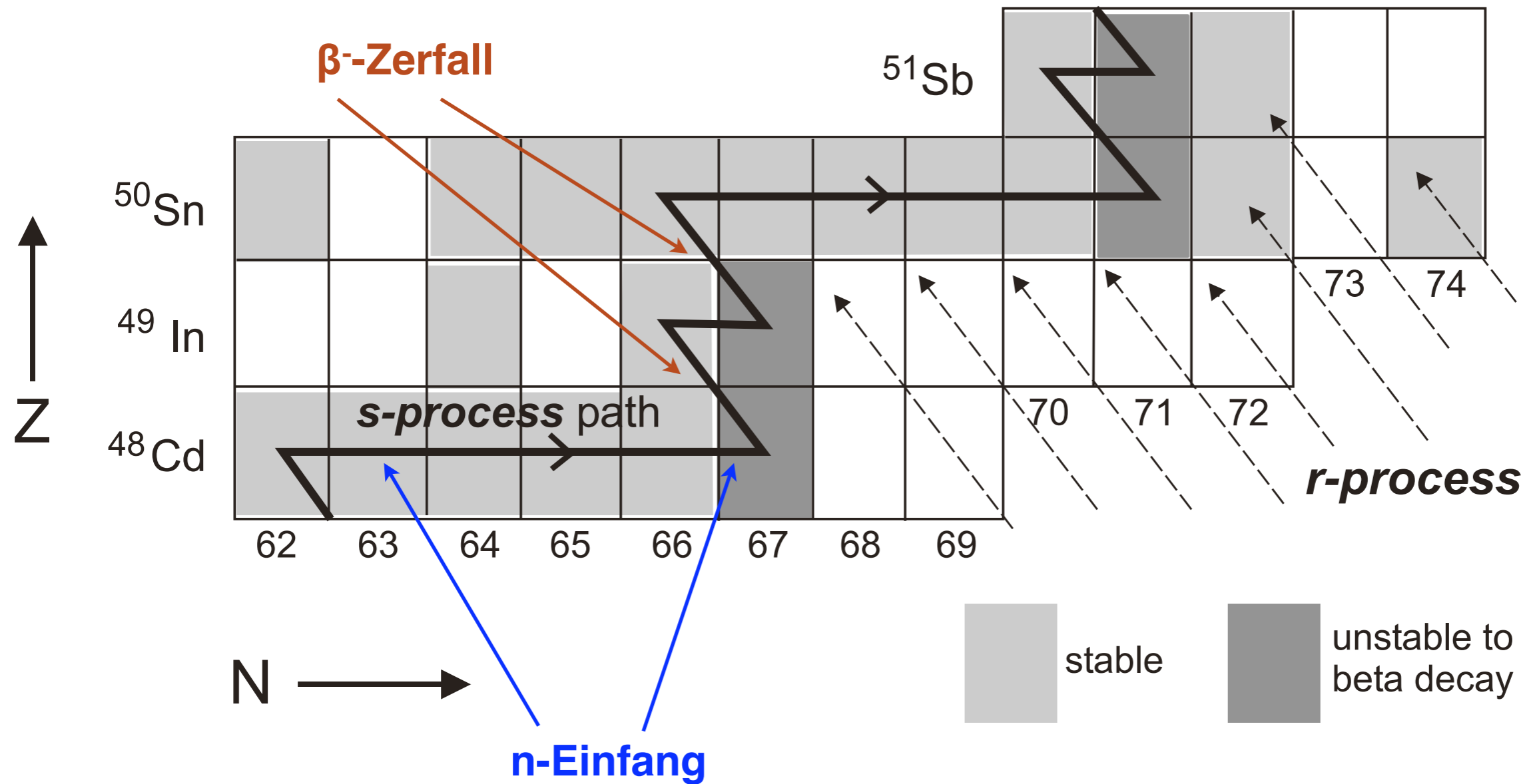
n-Einfang



β-Zerfall, falls Produkt instabil

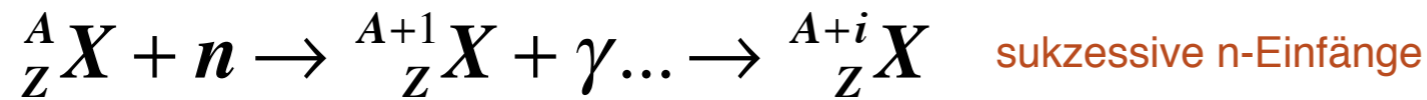
Der s-Prozess

- findet in der Nähe des “Beta-Stabilitätstals” statt, bei n-Dichten von $\approx 10^8$ Neutronen cm^{-3}
- Beispiel:

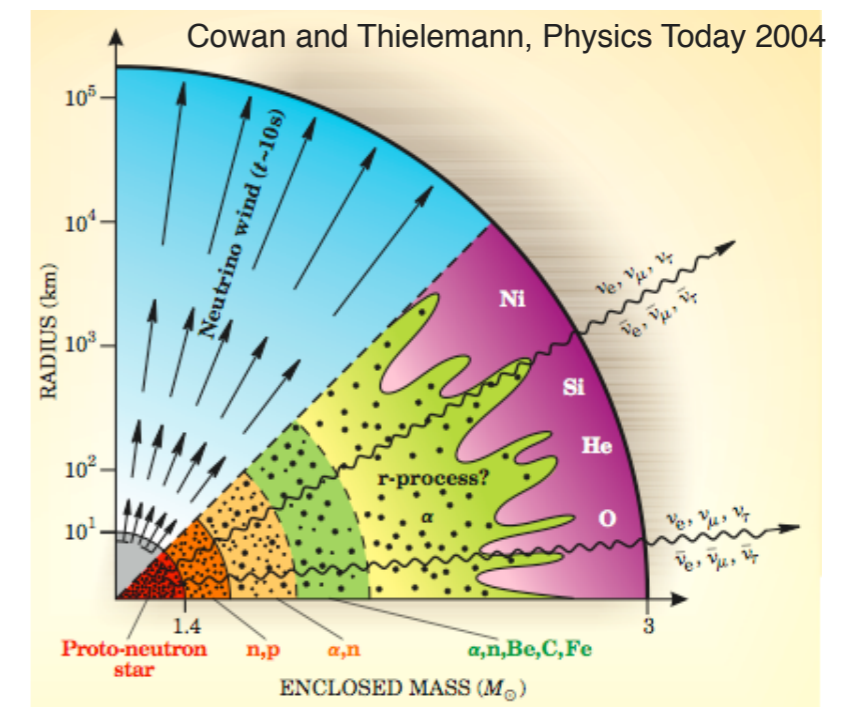
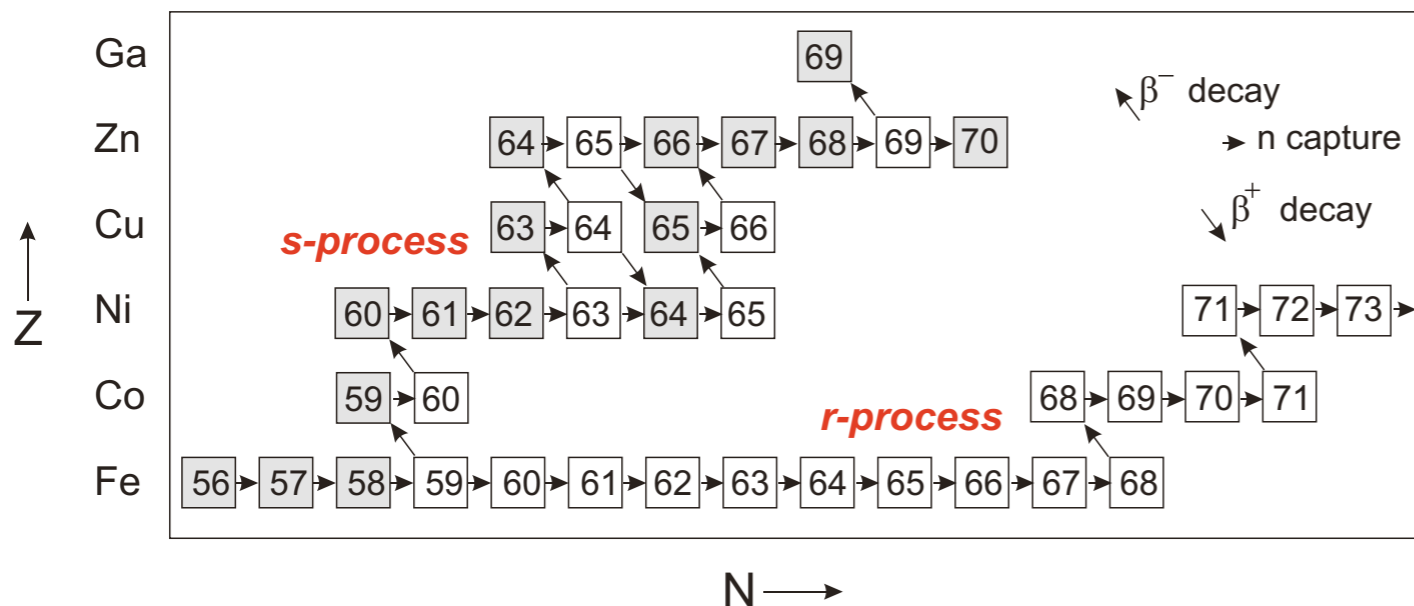


Der r-Prozess

- wenn: $\tau_{n\gamma} \ll \tau_{\beta}$ n-Einfangsraten sind viel schneller als die Beta-Zerfallsraten
 \Rightarrow bei hohen n-Flüssen, $N_n \geq 10^{24}$ Neutronen $\text{cm}^{-3} \Rightarrow$ in einer Supernova Explosion



- Prozess findet auf der n-reichen Seite des Beta-Stabilitätstals statt
- bei den magischen n-Zahlen ($N_n = 50, 82, 126$) haben die Isotope mit (N_{n+1}) kleine n-Bindungsenergien und recht lange $T_{1/2} \Rightarrow$ die Kerne mit geschlossenen n-Zahlen bilden "Wartepunkte" entlang des r-Prozess-Pfades



Zusammenfassung: s- und r-Prozess

