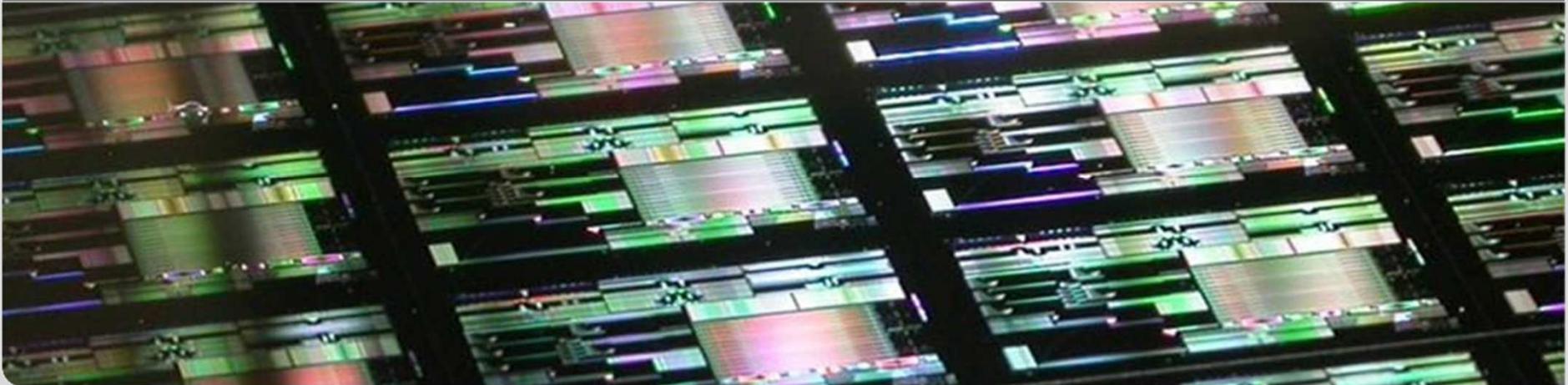


HLB Übung 6

WS 2015/2016



Wiederholung: Übersicht unterschiedlicher Dichten

Symbol	Anwendung
n_p	Elektronendichte n im p-dotierten Halbleiter (Minoritätsträger) Analog n_n, p_n, p_p manchmal auch ohne Indizes
n_{th}	Elektronendichte im thermischen Gleichgewicht
n' oder Δn	Elektronen Überschussträgerdichte; es gilt $n = n_{th} + n'$
n_i	Intrinsische Ladungsträgerdichte Materialkonstante die nur von der Temperatur und der Bandlücke abhängt $n_i^2 = n_{th} p_{th} = N_L N_V e^{-\frac{W_G}{kT}}$
n_D	Donatoren-Dotierdichte
$n_D^+ = n_D [1 - f_D(W_D)]$	Dichte der ionisierten Donatoren Für Störstellenerschöpfung gilt $n_D^+ = n_D$
N_L	Äquivalente Zustandsdichte des Leitungsbandes (Nur falls Boltzmann-Verteilung gilt) $n_{th} = N_L e^{-\frac{W_L - W_V}{kT}}$

Allgemein gilt:

$$np = n_i^2 e^{\frac{W_{Fn} - W_{Fp}}{kT}} = n_i^2 e^{\frac{U}{U_T}}$$

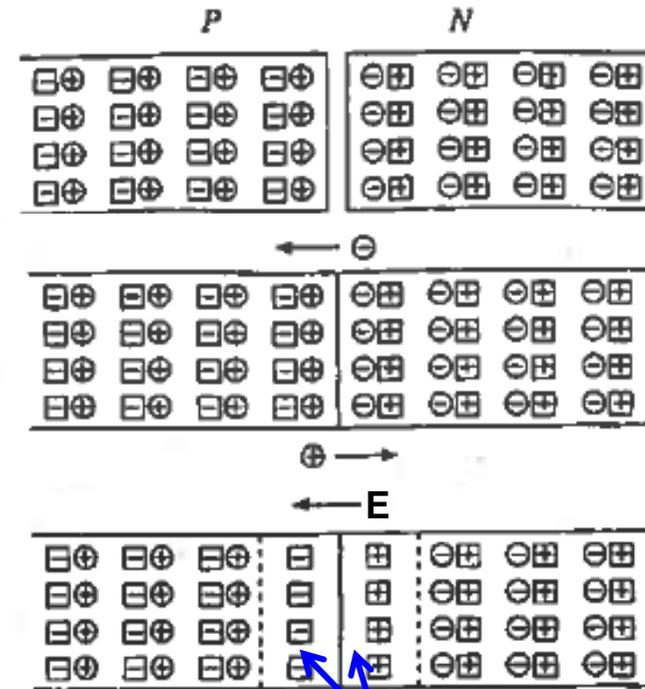
Aufgabe 1) pn-Übergang

An einer GaAs pn-Struktur stellt sich eine Diffusionsspannung von $U_D = 1,2 \text{ V}$ ein. Ohne angelegte äußere Spannung erstrecken sich nur 20% der Raumladungszone ins p-Gebiet. Die Eigenleitungsträgerdichte ist $n_i = 2,24 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$ und die Dielektrizitätskonstante $\epsilon_r = 12,9$. Es gilt Störstellenerschöpfung. Nehmen Sie an, dass die Dotierungen im p- und n-Halbleiter jeweils konstant sind (abrupter pn-Übergang) und dass die Schottky-Näherung verwendet werden kann.

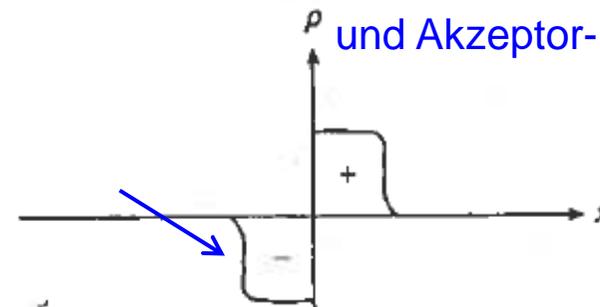
- a) Bestimmen Sie die Dotierung n_D des n-dotierten Bereiches und die Dotierung n_A des p-dotierten Bereiches.

Wiederholung: Der pn-Übergang im thermischen Gleichgewicht:

- Isolierte p- und n-Halbleiter vor der Kontaktierung
- Elektronen und Löcher diffundieren über die Grenzfläche und rekombinieren
- Neuer Gleichgewichtszustand: Ausbildung einer **Raumladungszone**; dadurch entsteht ein Potentialgradient, dessen Feldströme gerade die Diffusionsströme kompensieren



Geladene Donator- und Akzeptor-Rümpfe



Bilder: Pierret, Semiconductor device fundamentals;
Streetman, Solid-state electronic devices

Aufgabe 1) pn-Übergang

An einer GaAs pn-Struktur stellt sich eine Diffusionsspannung von $U_D = 1,2 \text{ V}$ ein. Ohne angelegte äußere Spannung erstrecken sich nur 20% der Raumladungszone ins p-Gebiet. Die Eigenleitungsträgerdichte ist $n_i = 2,24 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$ und die Dielektrizitätskonstante $\epsilon_r = 12,9$. Es gilt Störstellenerschöpfung. Nehmen Sie an, dass die Dotierungen im p- und n-Halbleiter jeweils konstant sind (abrupter pn-Übergang) und dass die Schottky-Näherung verwendet werden kann.

- a) Bestimmen Sie die Dotierung n_D des n-dotierten Bereiches und die Dotierung n_A des p-dotierten Bereiches.

Diffusionsspannung:
$$U_D = U_T \ln \left(\frac{n_A n_D}{n_i^2} \right)$$

Länge der Raumladungszone:

$$l = l_n + l_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_r}{e} U_D \left(\frac{1}{n_D} + \frac{1}{n_A} \right)}$$
$$l_n = l \frac{n_A}{n_A + n_D} \quad l_p = l \frac{n_D}{n_A + n_D}$$

- b) Berechnen Sie die Gesamtlänge l der Raumladungszone.

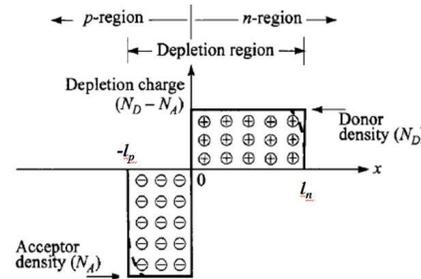
Aufgabe 1) pn-Übergang

An einer GaAs pn-Struktur stellt sich eine Diffusionsspannung von $U_D = 1,2 \text{ V}$ ein. Ohne angelegte äußere Spannung erstrecken sich nur 20% der Raumladungszone ins p-Gebiet. Die Eigenleitungsträgerdichte ist $n_i = 2,24 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$ und die Dielektrizitätskonstante $\epsilon_r = 12,9$. Es gilt Störstellenerschöpfung. Nehmen Sie an, dass die Dotierungen im p- und n-Halbleiter jeweils konstant sind (abrupter pn-Übergang) und dass die Schottky-Näherung verwendet werden kann.

c) Berechnen Sie den Betrag der maximalen elektrischen Feldstärke.

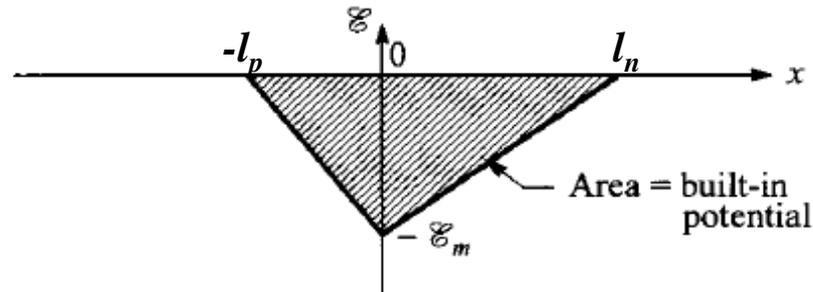
Wiederholung: pn-Übergang

- Raumladungszone ρ



- Elektrisches Feld

$$\epsilon E = \int \rho dx$$



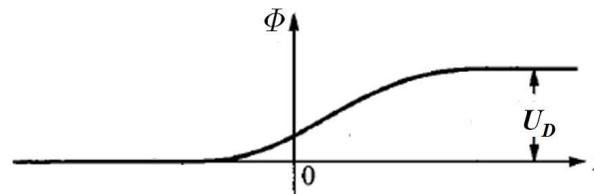
Integrieren



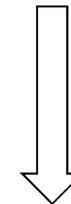
- Potential

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi \rightarrow \frac{d\varphi}{dx} = -E$$

$$\varphi = -\int E dx$$

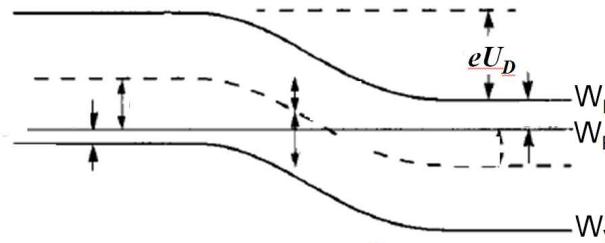


Integrieren



- Bandverlauf

$$W_L(x) = W_L - e\Phi(x)$$



Aufgabe 1) pn-Übergang

An einer GaAs pn-Struktur stellt sich eine Diffusionsspannung von $U_D = 1,2 \text{ V}$ ein. Ohne angelegte äußere Spannung erstrecken sich nur 20% der Raumladungszone ins p-Gebiet. Die Eigenleitungsträgerdichte ist $n_i = 2,24 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$ und die Dielektrizitätskonstante $\epsilon_r = 12,9$. Es gilt Störstellenerschöpfung. Nehmen Sie an, dass die Dotierungen im p- und n-Halbleiter jeweils konstant sind (abrupter pn-Übergang) und dass die Schottky-Näherung verwendet werden kann.

- c) Berechnen Sie den Betrag der maximalen elektrischen Feldstärke.
- d) Überprüfen Sie ob die Annahme der Schottky-Näherung gerechtfertigt ist. Vergleichen Sie dazu die Debye-Länge im p- und n-Halbleiter mit den jeweiligen Längen der Raumladungszonen.

$$L_{Dn} = \sqrt{\frac{kT\epsilon_0\epsilon_r}{e^2n}}$$

$$L_{Dp} = \sqrt{\frac{kT\epsilon_0\epsilon_r}{e^2p}}$$

Aufgabe 2) pn-Übergang mit stetiger Dotierung

Das Dotierungsprofil in einer symmetrisch dotierten pn-Schicht hat einen stetigen Übergang (siehe Fig. 1). Die Weite der Raumladungszone ist gegeben durch l und die Weite des linearen Bereichs durch w . An dem pn-Übergang liegt eine so hohe Sperrspannung an, dass sich die Raumladungszone bis in die homogen dotierten Bereiche ($l > w$) ausdehnt. Die Diffusionsspannung ist vernachlässigbar. Die Schottky-Näherung kann verwendet werden.

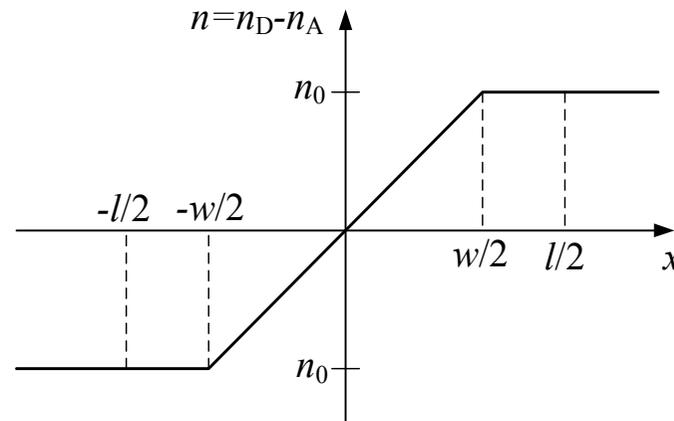


Fig. 1: Dotierprofil des symmetrischen, stetigen pn-Übergangs. l ist die Weite der Raumladungszone, w die Weite des Bereichs mit linearer Dotierstoffkonzentrationsänderung

- a) Berechnen und skizzieren Sie den Verlauf der Raumladung und der Feldstärke.

Aufgabe 2) pn-Übergang mit stetiger Dotierung

Das Dotierungsprofil in einer symmetrisch dotierten pn-Schicht hat einen stetigen Übergang (siehe Fig. 1). Die Weite der Raumladungszone ist gegeben durch l und die Weite des linearen Bereichs durch w . An dem pn-Übergang liegt eine so hohe Sperrspannung an, dass sich die Raumladungszone bis in die homogen dotierten Bereiche ($l > w$) ausdehnt. Die Diffusionsspannung ist vernachlässigbar. Die Schottky-Näherung kann verwendet werden.

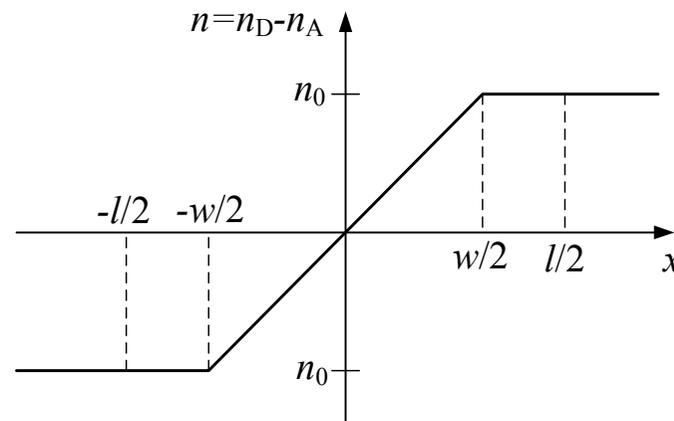


Fig. 1: Dotierprofil des symmetrischen, stetigen pn-Übergangs. l ist die Weite der Raumladungszone, w die Weite des Bereichs mit linearer Dotierstoffkonzentrationsänderung

- b) Berechnen Sie die Potentialdifferenz U zwischen p- und n- Seite bei gegebener Raumladungszonebreite $l > w$. Bestimmen Sie daraus die Weite der Raumladungszone als Funktion der Spannung.

Aufgabe 2) pn-Übergang mit stetiger Dotierung

Das Dotierungsprofil in einer symmetrisch dotierten pn-Schicht hat einen stetigen Übergang (siehe Fig. 1). Die Weite der Raumladungszone ist gegeben durch l und die Weite des linearen Bereichs durch w . An dem pn-Übergang liegt eine so hohe Sperrspannung an, dass sich die Raumladungszone bis in die homogen dotierten Bereiche ($l > w$) ausdehnt. Die Diffusionsspannung ist vernachlässigbar. Die Schottky-Näherung kann verwendet werden.

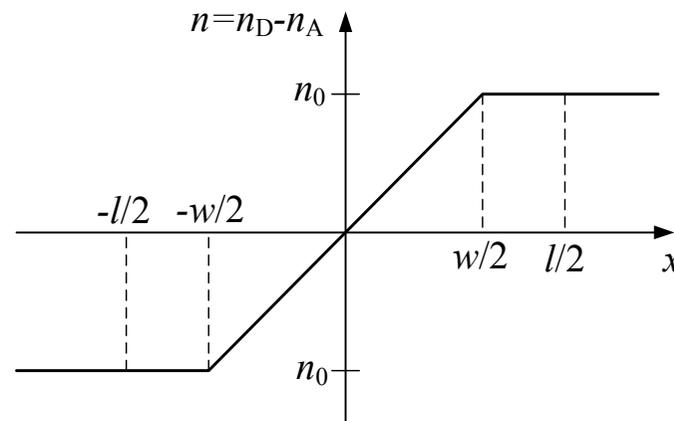


Fig. 1: Dotierprofil des symmetrischen, stetigen pn-Übergangs. l ist die Weite der Raumladungszone, w die Weite des Bereichs mit linearer Dotierstoffkonzentrationsänderung

c) Geben Sie die maximale Feldstärke in Abhängigkeit von der Spannung an.

Aufgabe 2) pn-Übergang mit stetiger Dotierung

Das Dotierungsprofil in einer symmetrisch dotierten pn-Schicht hat einen stetigen Übergang (siehe Fig. 1). Die Weite der Raumladungszone ist gegeben durch l und die Weite des linearen Bereichs durch w . An dem pn-Übergang liegt eine so hohe Sperrspannung an, dass sich die Raumladungszone bis in die homogen dotierten Bereiche ($l > w$) ausdehnt. Die Diffusionsspannung ist vernachlässigbar. Die Schottky-Näherung kann verwendet werden.

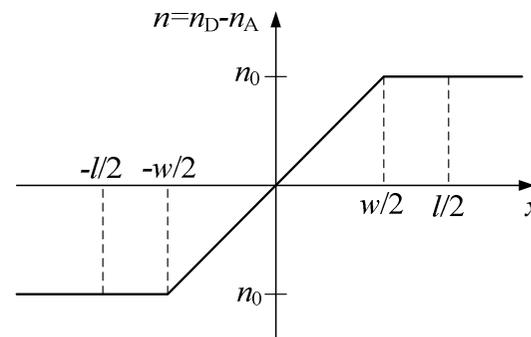


Fig. 1: Dotierprofil des symmetrischen, stetigen pn-Übergangs. l ist die Weite der Raumladungszone, w die Weite des Bereichs mit linearer Dotierstoffkonzentrationsänderung

- d) Überprüfen Sie die erhaltenen Formeln durch Vergleich mit den Formeln für den abrupten pn-Übergang ($w \rightarrow 0$) und weisen Sie anhand der Skizze aus a) nach, dass bei gleicher maximaler Feldstärke am abrupten pn-Übergang eine kleinere Spannung anliegt als am stetigen Übergang.

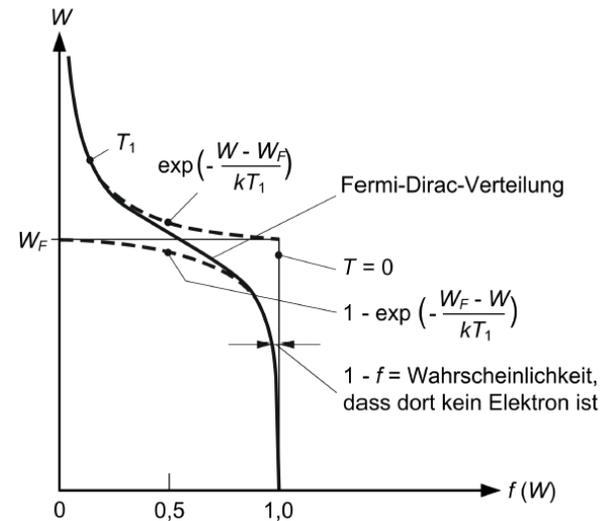
Aufgabe 2) pn-Übergang mit stetiger Dotierung

	Stetiger Übergang ($w > 0$)	Abrupter Übergang ($w \rightarrow 0$)
Raumladung	$\rho(x) = \frac{2en_0}{w}x$ $0 \leq x \leq \frac{w}{2}$	$\rho(x) = en_0$
Elektrisches Feld	$E(x) = -\frac{en_0}{\epsilon_0\epsilon_r} \left(\frac{l}{2} - \frac{w}{4} - \frac{x^2}{w} \right)$ $0 \leq x \leq \frac{w}{2}$	$E(x) = \frac{en_0}{\epsilon_0\epsilon_r} \left(x - \frac{l}{2} \right)$
Angelegte Spannung	$U = \frac{en_0}{4\epsilon_r\epsilon_0} \left(l^2 - \frac{w^2}{3} \right)$	$U = \frac{en_0}{4\epsilon_r\epsilon_0} l^2$
Länge der Raumladungszone	$l = \sqrt{\frac{4\epsilon_r\epsilon_0 U}{en_0} + \frac{w^2}{3}}$	$l = \sqrt{\frac{4\epsilon_r\epsilon_0 U}{en_0}}$
Max. Elektrisches Feld	$E_{\max} = -\frac{en_0}{\epsilon_0\epsilon_r} \left(\sqrt{\frac{\epsilon_0\epsilon_r U}{en_0} + \frac{w^2}{12}} - \frac{w}{4} \right)$	$E_{\max} = -\frac{en_0}{\epsilon_0\epsilon_r} \left(\sqrt{\frac{\epsilon_0\epsilon_r U}{en_0}} \right)$

Wiederholung: Fermi-Niveau und Temperaturabhängigkeit

- Fermi-Dirac Statistik

$$f_{FD}(W) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{W - W_F}{kT}\right)}$$



- „höchste Energie, die ein Teilchen in einem Vielteilchensystem gleichartiger Fermionen (sog. Fermi-Gas) haben kann, wenn das System als Ganzes in seinem Grundzustand ist.“
- „Alle Zustände mit Energien zwischen dem tiefstmöglichen Niveau und der Fermi-Energie sind dann mit Teilchen voll besetzt, darüber keiner“

Im Halbleiter:

- Energie bei der ein Elektronenzustand mit Wahrscheinlichkeit $\frac{1}{2}$ besetzt ist (Wenn es an dieser Stelle einen Zustand gäbe)

Wiederholung: Fermi-Niveau und Temperaturabhängigkeit

- Für intrinsischen Halbleiter

$$W_{F.} = \frac{1}{2}(W_V + W_L) + kT \ln \sqrt{\frac{N_V}{N_L}} = \frac{1}{2}(W_V + W_L) + \frac{3}{4}kT \ln \left(\frac{m_p}{m_n} \right)$$

Für $T=0 \rightarrow$ Fermi-Energie in der Mitte des Bandes.

Für $T>0 \rightarrow$ Fermi-Energie liegt näher am Band mit kleinerer äquivalenten Zustandsdichte

