F. Herrmann

Zur statistischen Thermodynamik

1. Molekularkinetische Ebene
2. Statistische Ebene
3. Phänomenologische Ebene
4. Folgerungen

1. Molekularkinetische Ebene

1. Molekularkinetische Ebene

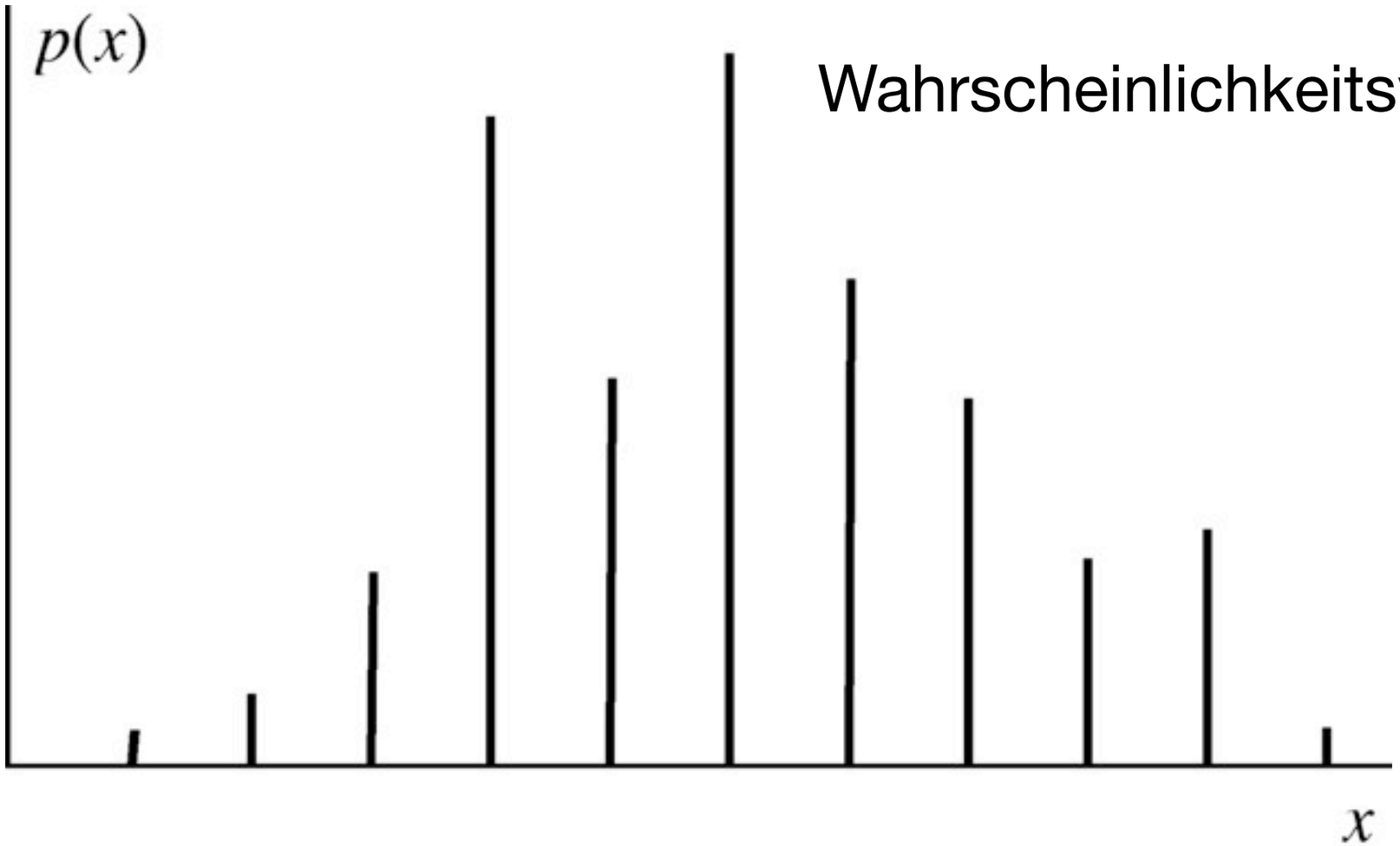
geeignet, wenn alle Teilchen dasselbe machen

1. Molekularkinetische Ebene
2. Statistische Ebene
3. Phänomenologische Ebene
4. Folgerungen

2. Statistische Ebene

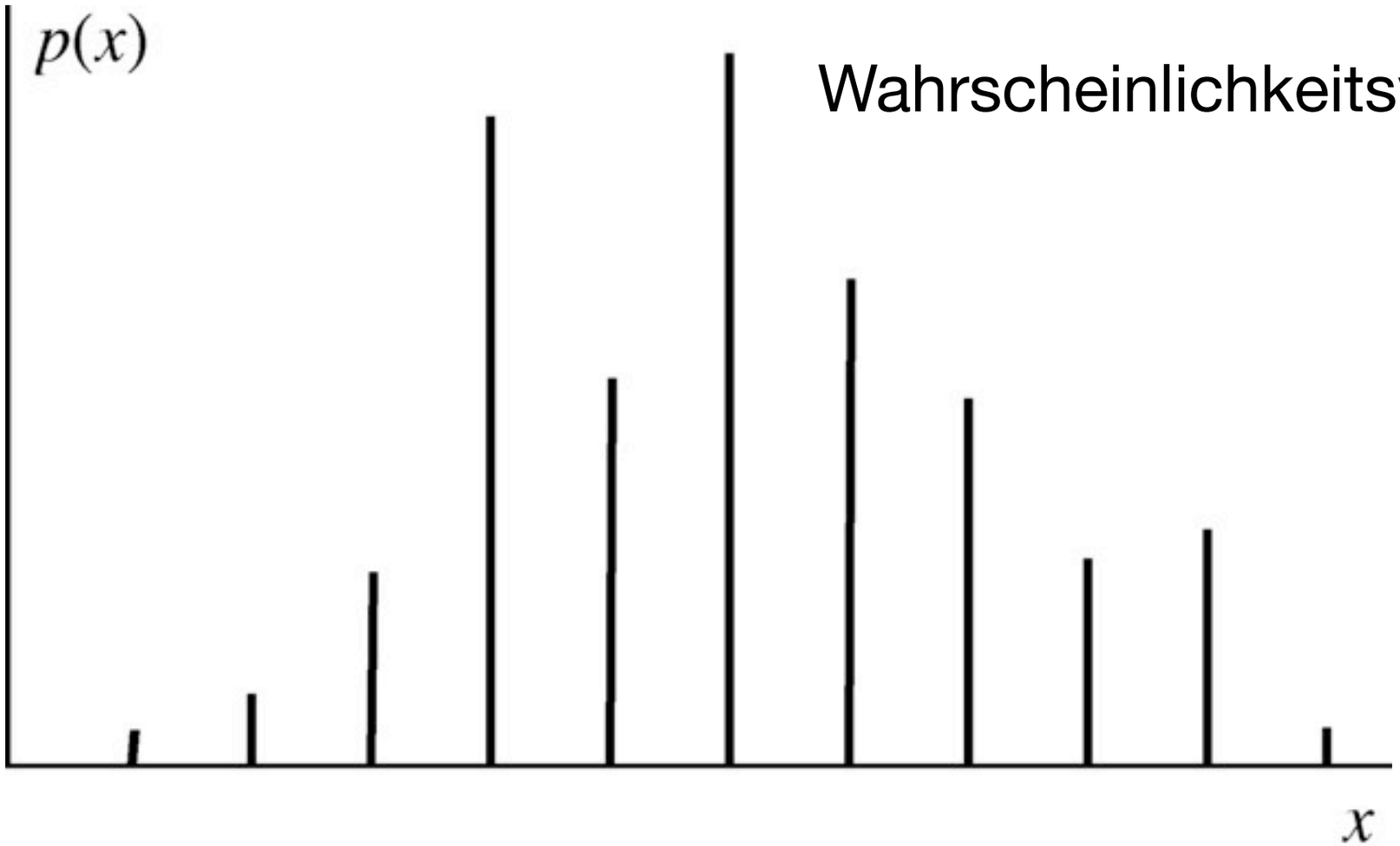
2. Statistische Ebene

2. Statistische Ebene



Wahrscheinlichkeitsverteilung

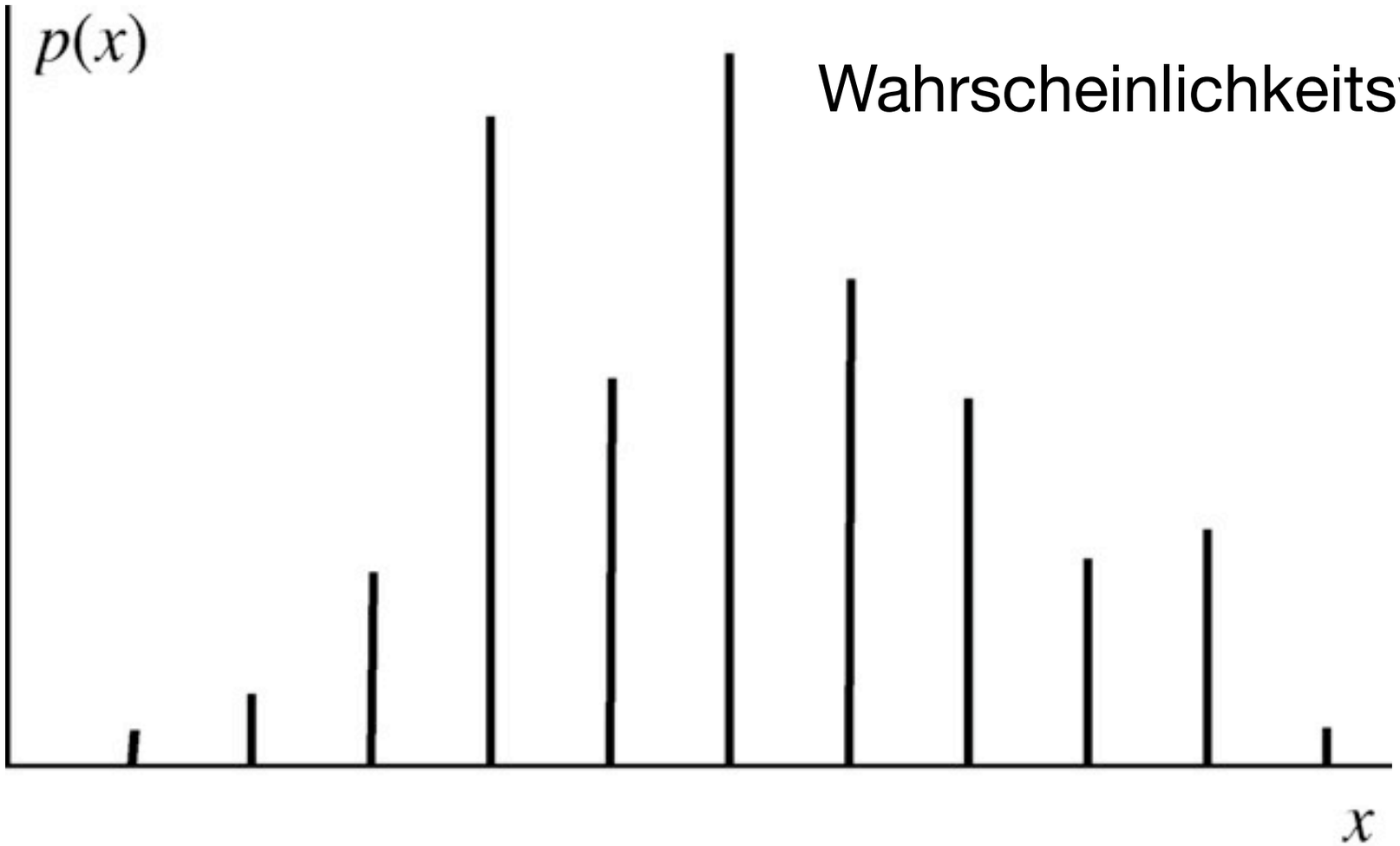
2. Statistische Ebene



Wahrscheinlichkeitsverteilung

Mittelwert: $\bar{x} = \sum_i p(x_i) x_i$

2. Statistische Ebene

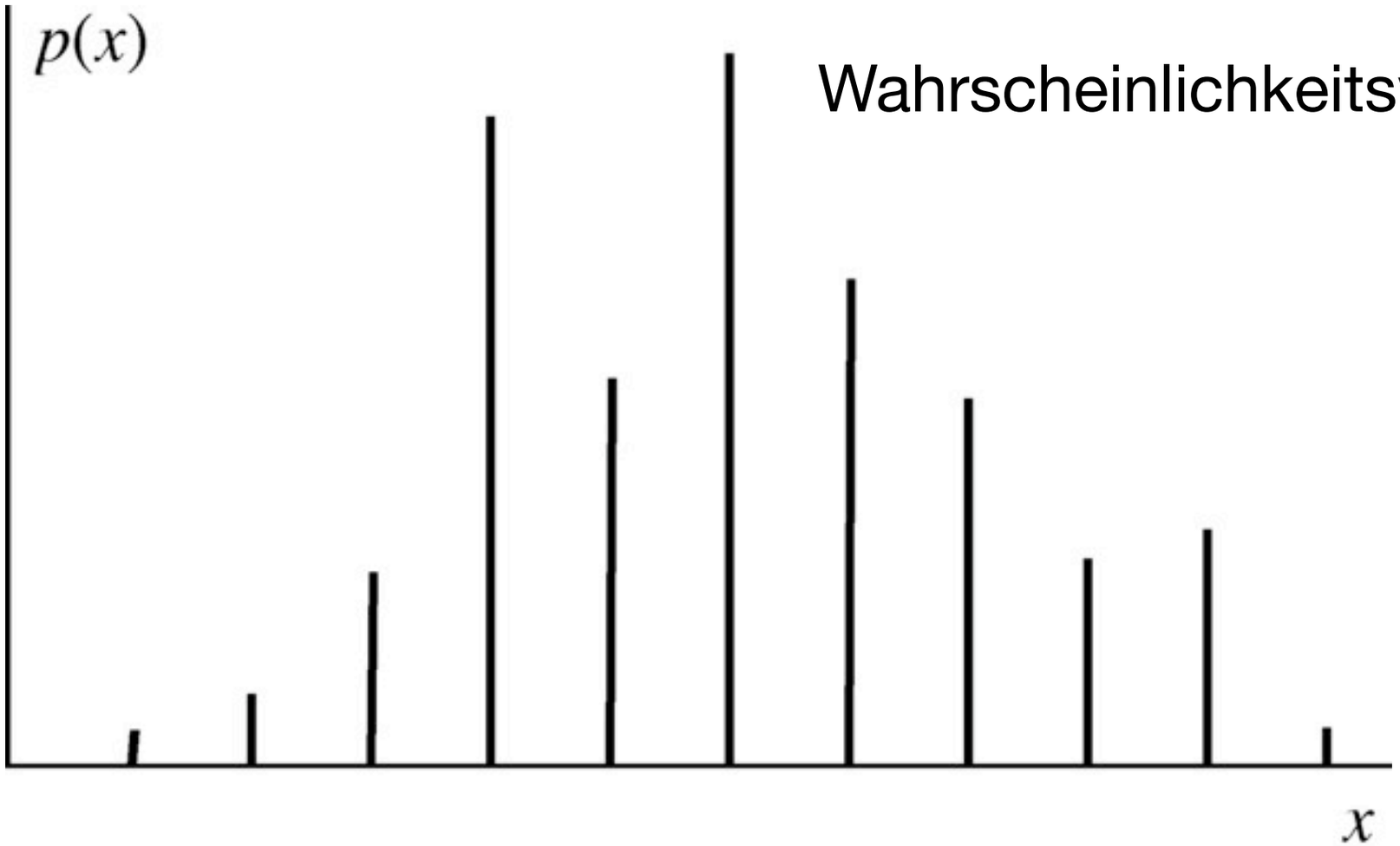


Wahrscheinlichkeitsverteilung

Mittelwert: $\bar{x} = \sum_i p(x_i) x_i$

Streuung: $\overline{(\Delta x)^2} = \sum_i p(x_i)(x_i - \bar{x})^2$

2. Statistische Ebene



Wahrscheinlichkeitsverteilung

Mittelwert: $\bar{x} = \sum_i p(x_i) x_i$

Streuung: $\overline{(\Delta x)^2} = \sum_i p(x_i)(x_i - \bar{x})^2$

$$\eta = -\sum_i p(x_i) \ln p(x_i)$$

Mittelwert: $\bar{x} = \sum_i p(x_i) x_i$

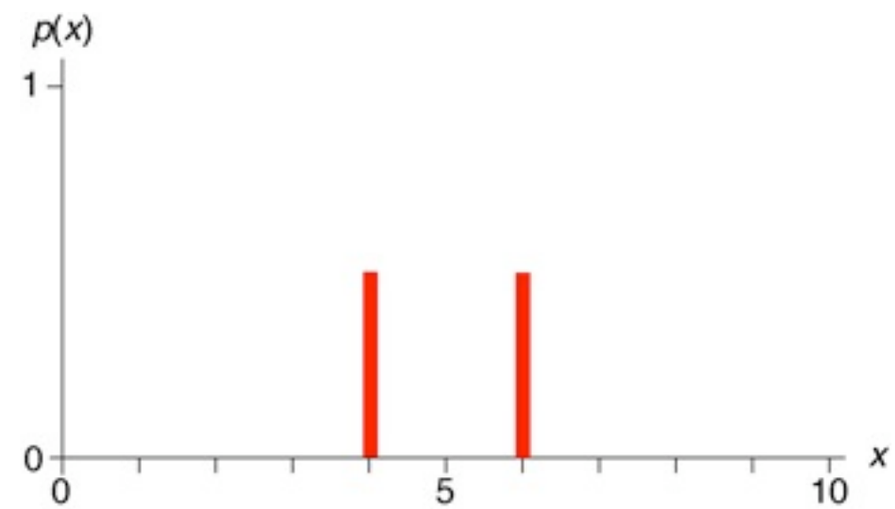
Streuung: $\overline{(\Delta x)^2} = \sum_i p(x_i)(x_i - \bar{x})^2$

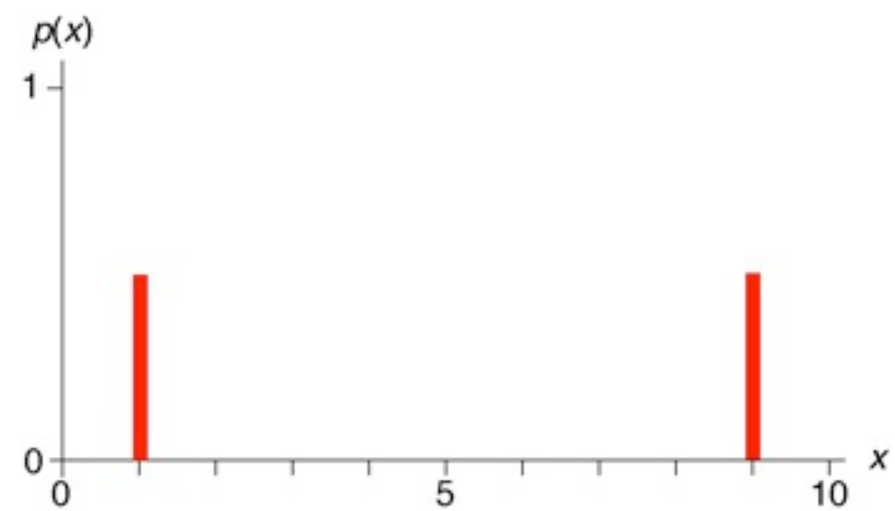
$$\eta = -\sum_i p(x_i) \ln p(x_i)$$

Mittelwert: $\bar{x} = \sum_i p(x_i) x_i$

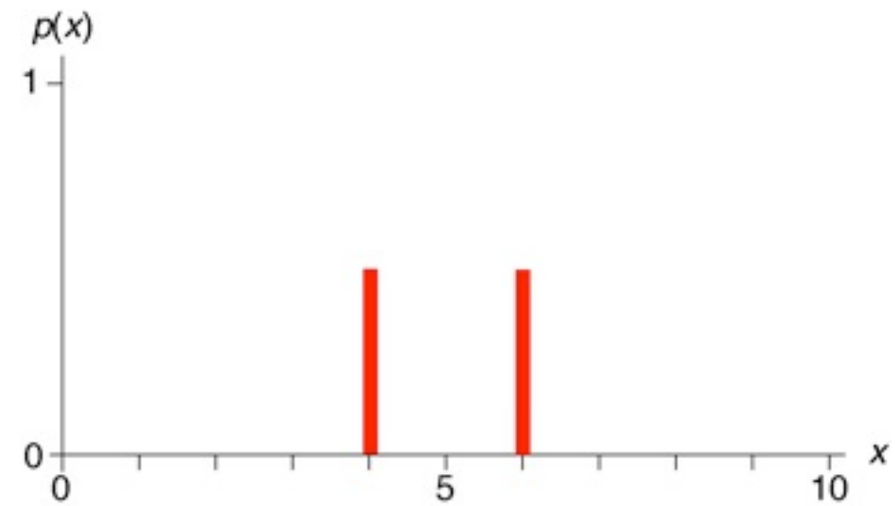
Streuung: $\overline{(\Delta x)^2} = \sum_i p(x_i)(x_i - \bar{x})^2$

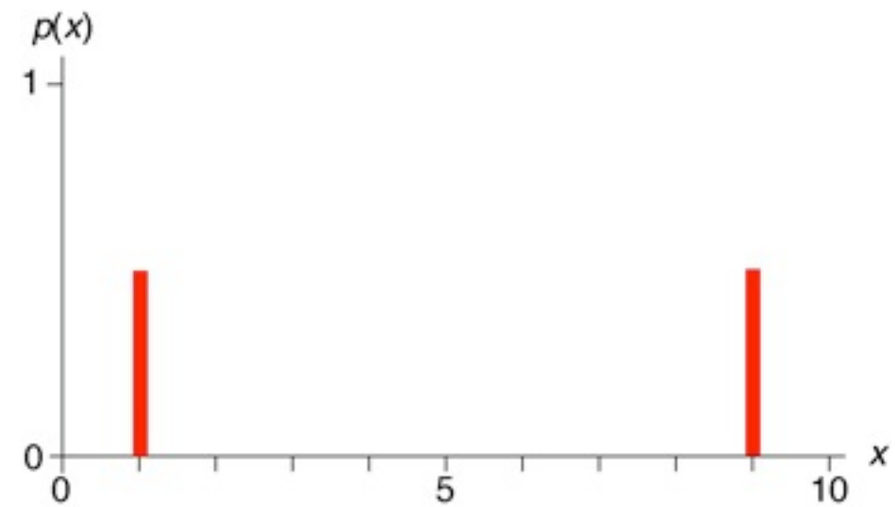
$$\eta = -\sum_i p(x_i) \ln p(x_i)$$





$$\eta = -\sum_i p(x_i) \ln p(x_i)$$





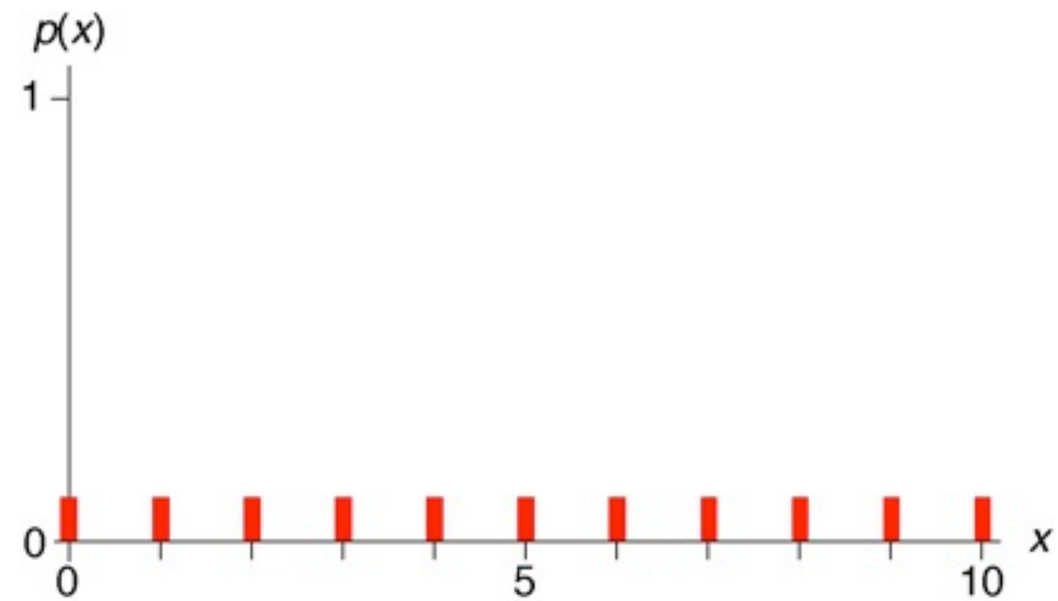
$$\eta = -\sum_i p(x_i) \ln p(x_i)$$

$$\eta = -\sum_i p(x_i) \ln p(x_i)$$

Zwei Spezialfälle:

$$\eta = -\sum_i p(x_i) \ln p(x_i)$$

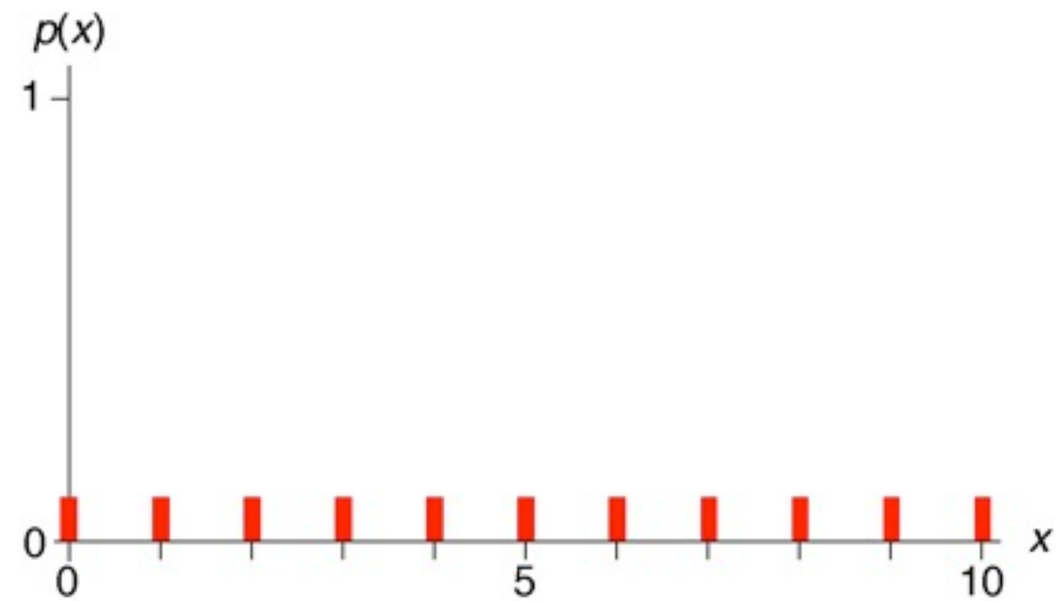
Zwei Spezialfälle:



$$\eta = -\sum_i p(x_i) \ln p(x_i)$$

Zwei Spezialfälle:

$$p_1 = p_2 = p_3 = \ldots = p_\Omega = 1/\Omega$$

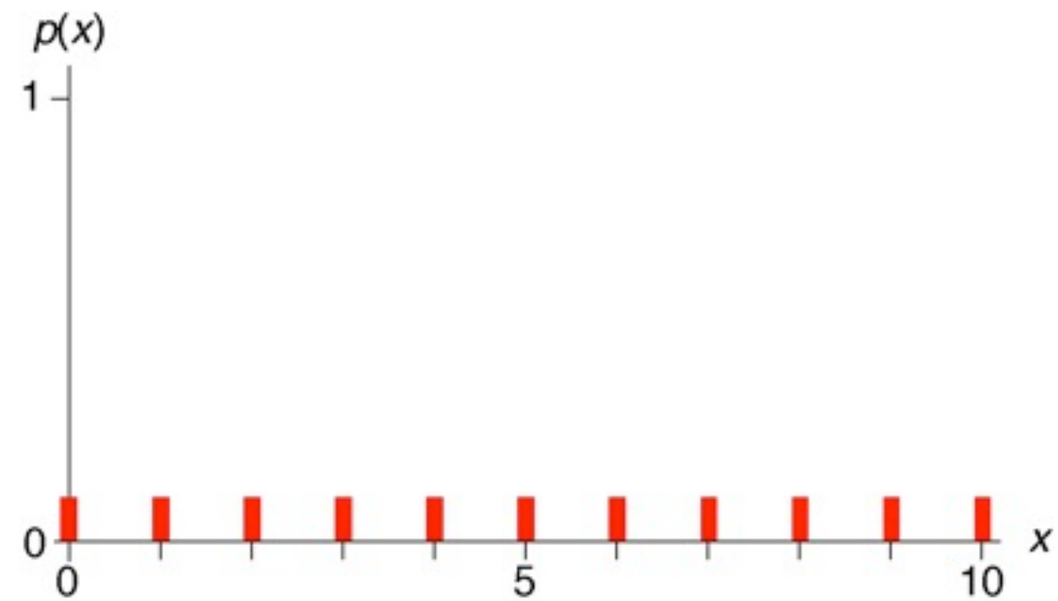


$$\eta = -\sum_i p(x_i) \ln p(x_i)$$

Zwei Spezialfälle:

$$p_1 = p_2 = p_3 = \ldots = p_\Omega = 1/\Omega$$

$$\eta = -\sum_{i=1}^{\Omega} \frac{1}{\Omega} \ln \frac{1}{\Omega} = -\ln \frac{1}{\Omega} = \ln \Omega$$

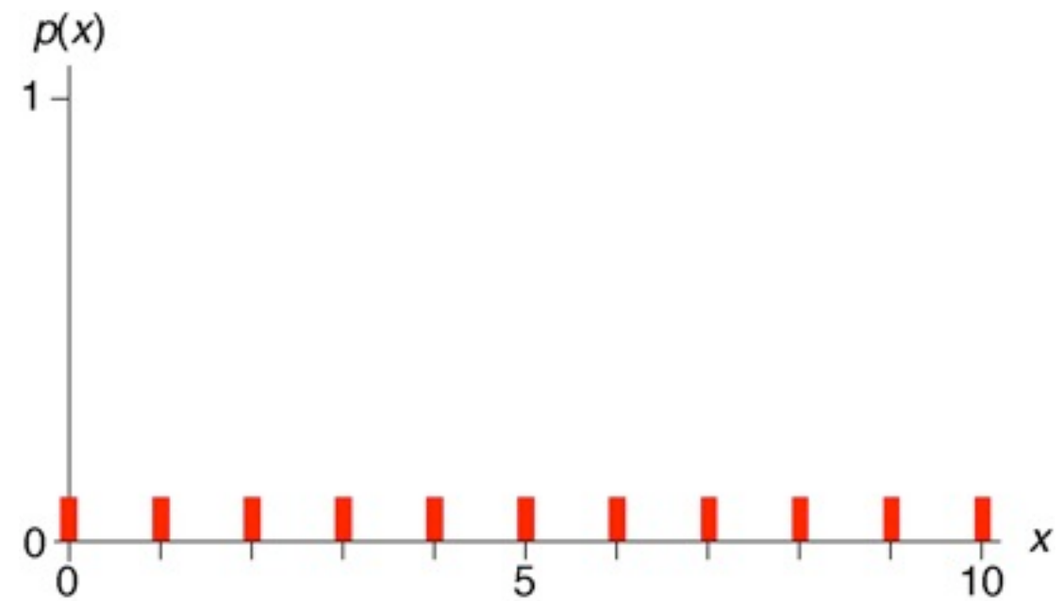


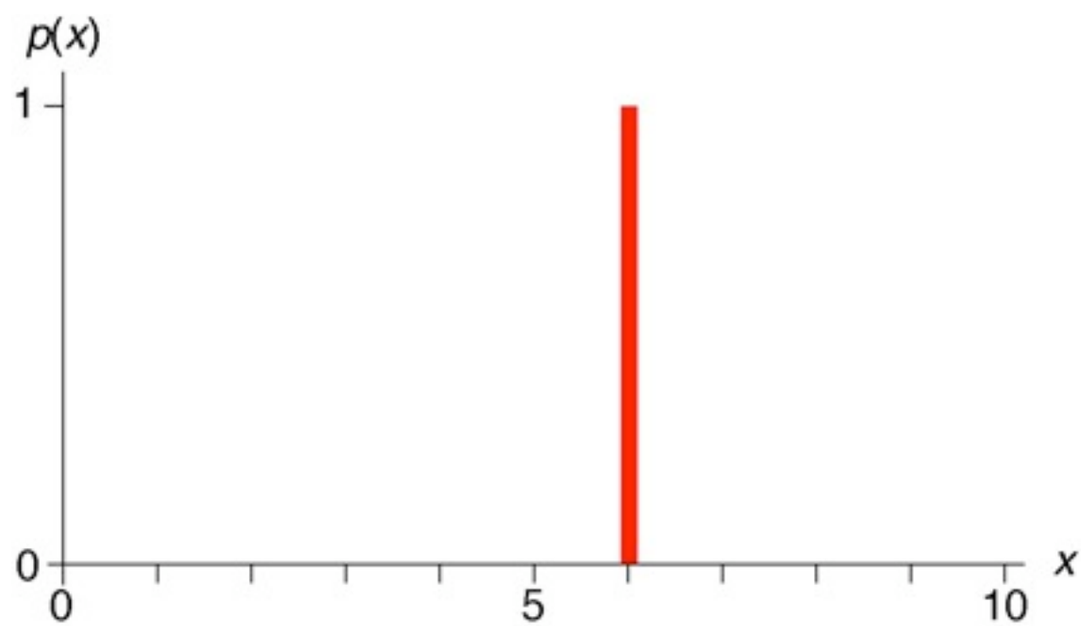
$$\eta = -\sum_i p(x_i) \ln p(x_i)$$

Zwei Spezialfälle:

$$p_1 = p_2 = p_3 = \ldots = p_\Omega = 1/\Omega$$

$$\eta = -\sum_{i=1}^{\Omega} \frac{1}{\Omega} \ln \frac{1}{\Omega} = -\ln \frac{1}{\Omega} = \ln \Omega$$



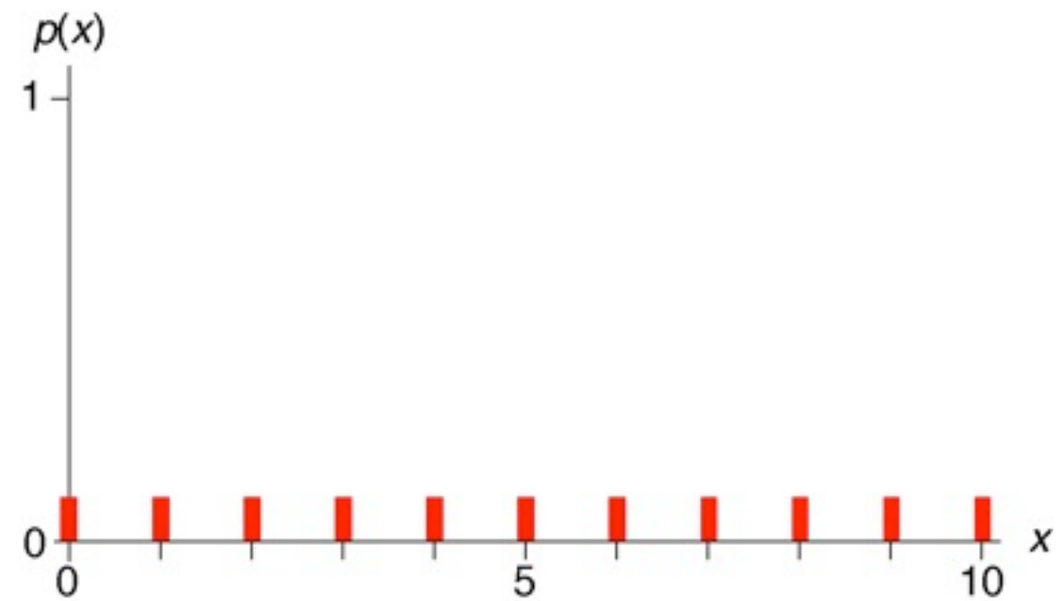


$$\eta = -\sum_i p(x_i) \ln p(x_i)$$

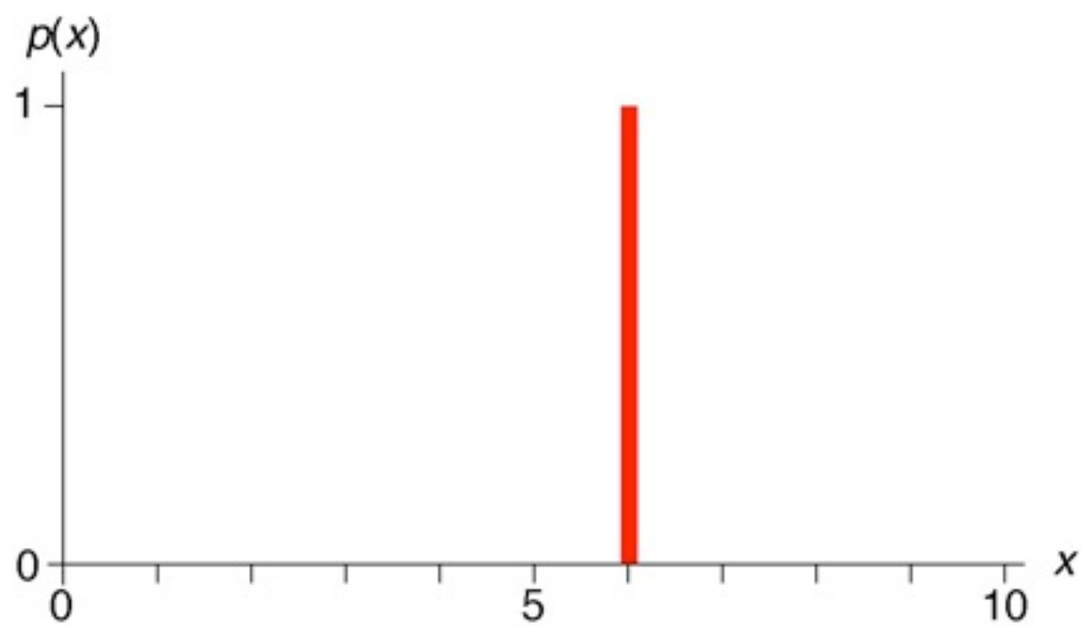
Zwei Spezialfälle:

$$p_1 = p_2 = p_3 = \ldots = p_\Omega = 1/\Omega$$

$$\eta = -\sum_{i=1}^{\Omega} \frac{1}{\Omega} \ln \frac{1}{\Omega} = -\ln \frac{1}{\Omega} = \ln \Omega$$



$$\eta = 0 \cdot \ln 0 + \ldots + 1 \cdot \ln 1 + 0 \cdot \ln 0 + \ldots$$

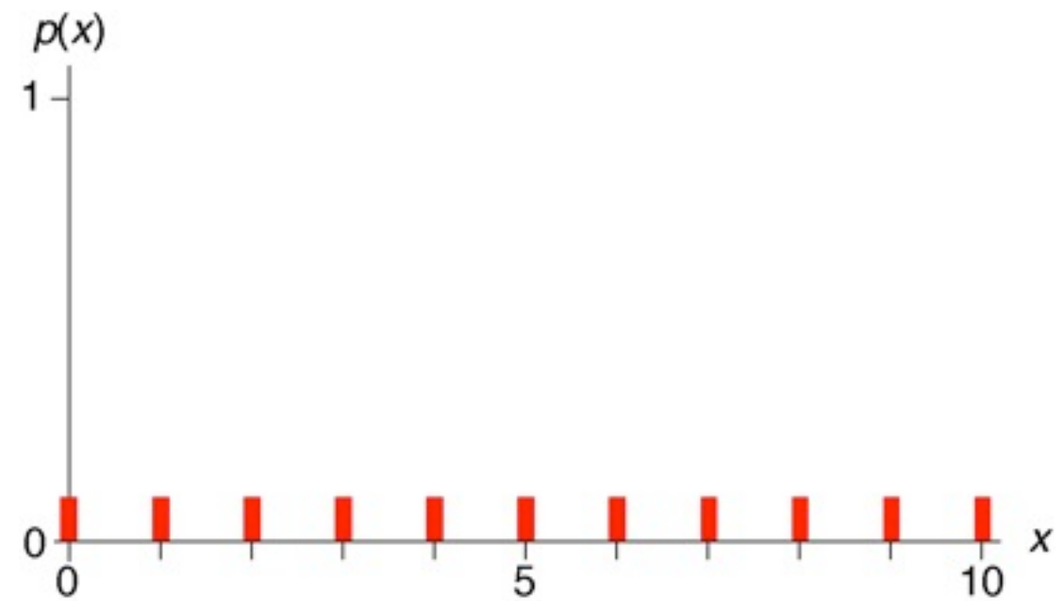


$$\eta = -\sum_i p(x_i) \ln p(x_i)$$

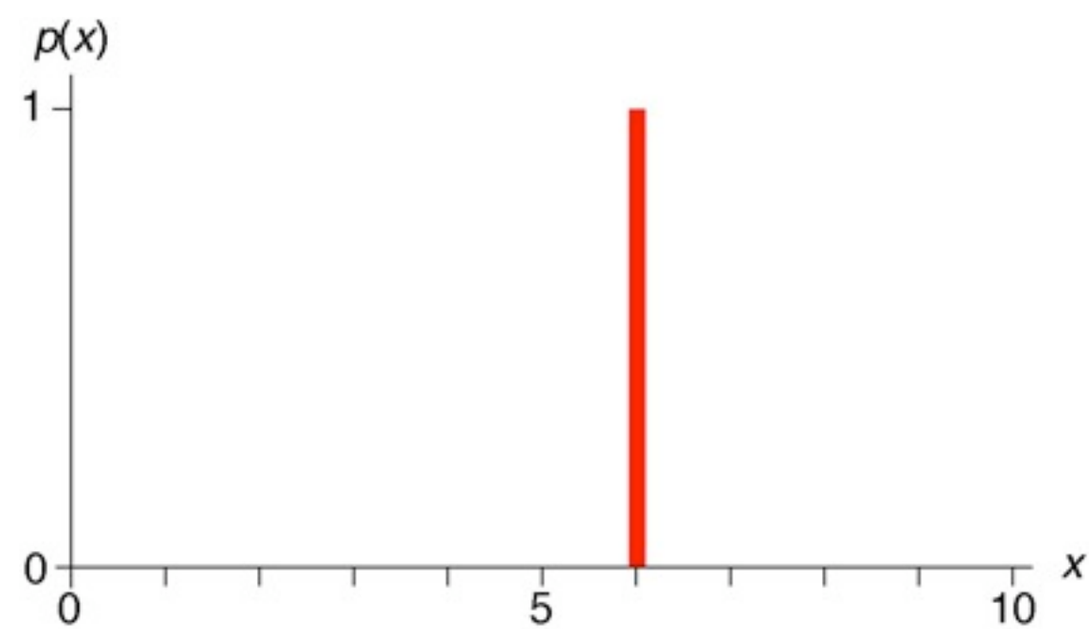
Zwei Spezialfälle:

$$p_1 = p_2 = p_3 = \ldots = p_\Omega = 1/\Omega$$

$$\eta = -\sum_{i=1}^{\Omega} \frac{1}{\Omega} \ln \frac{1}{\Omega} = -\ln \frac{1}{\Omega} = \ln \Omega$$



$$\eta = 0 \cdot \ln 0 + \ldots + \underline{1 \cdot \ln 1} + 0 \cdot \ln 0 + \ldots$$

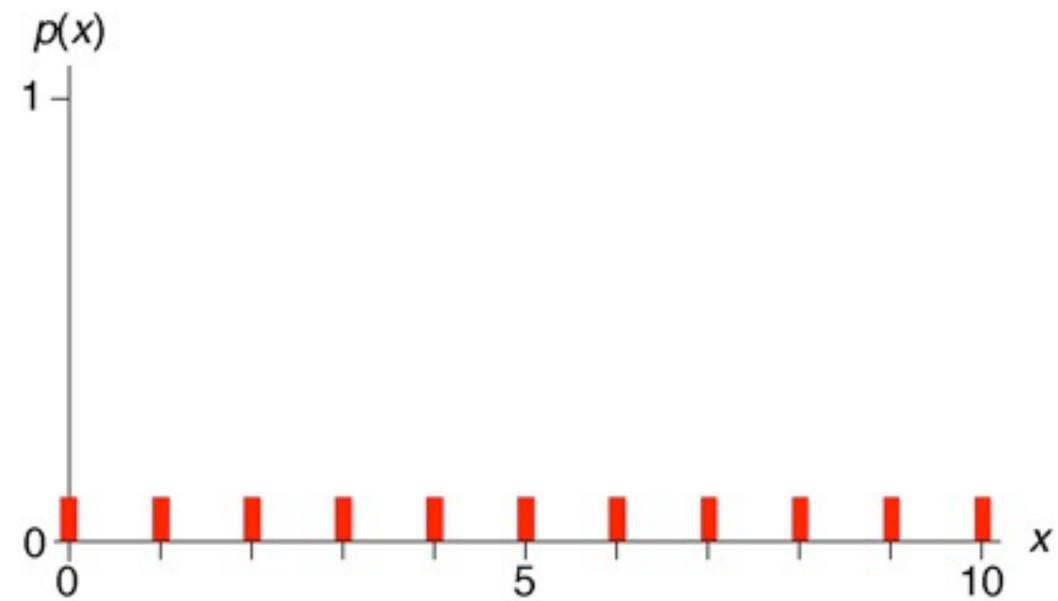


$$\eta = -\sum_i p(x_i) \ln p(x_i)$$

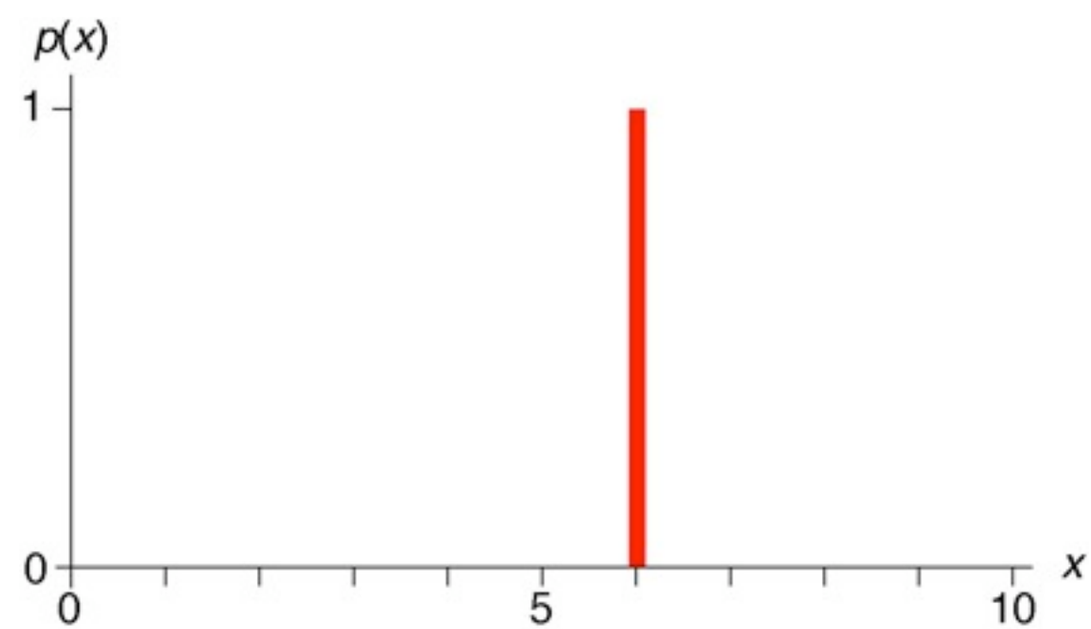
Zwei Spezialfälle:

$$p_1 = p_2 = p_3 = \ldots = p_\Omega = 1/\Omega$$

$$\eta = -\sum_{i=1}^{\Omega} \frac{1}{\Omega} \ln \frac{1}{\Omega} = -\ln \frac{1}{\Omega} = \ln \Omega$$



$$\eta = 0 \cdot \ln 0 + \ldots + \underbrace{1 \cdot \ln 1}_{=0} + 0 \cdot \ln 0 + \ldots$$

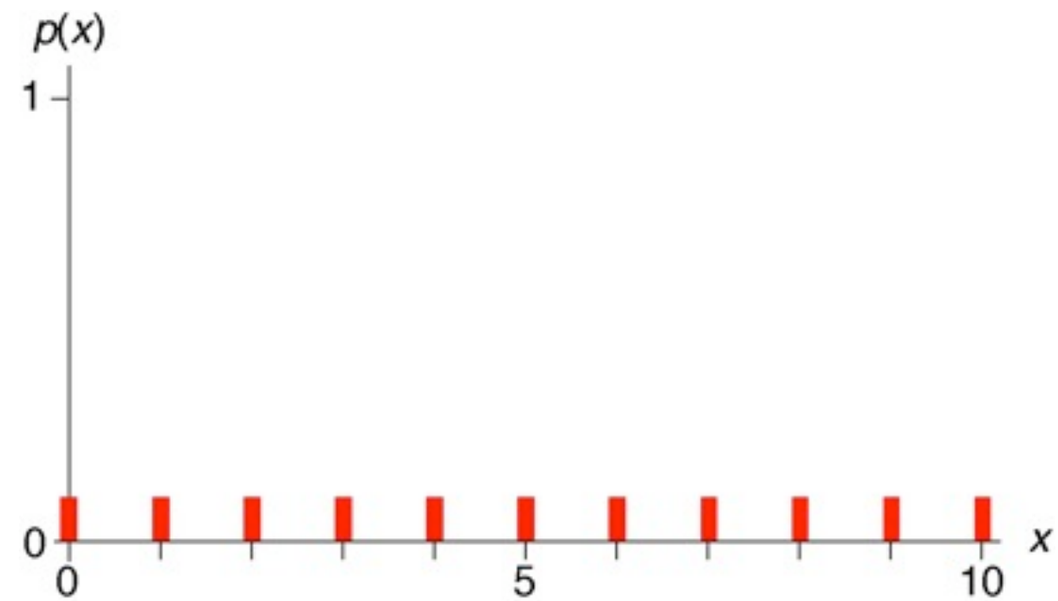


$$\eta = -\sum_i p(x_i) \ln p(x_i)$$

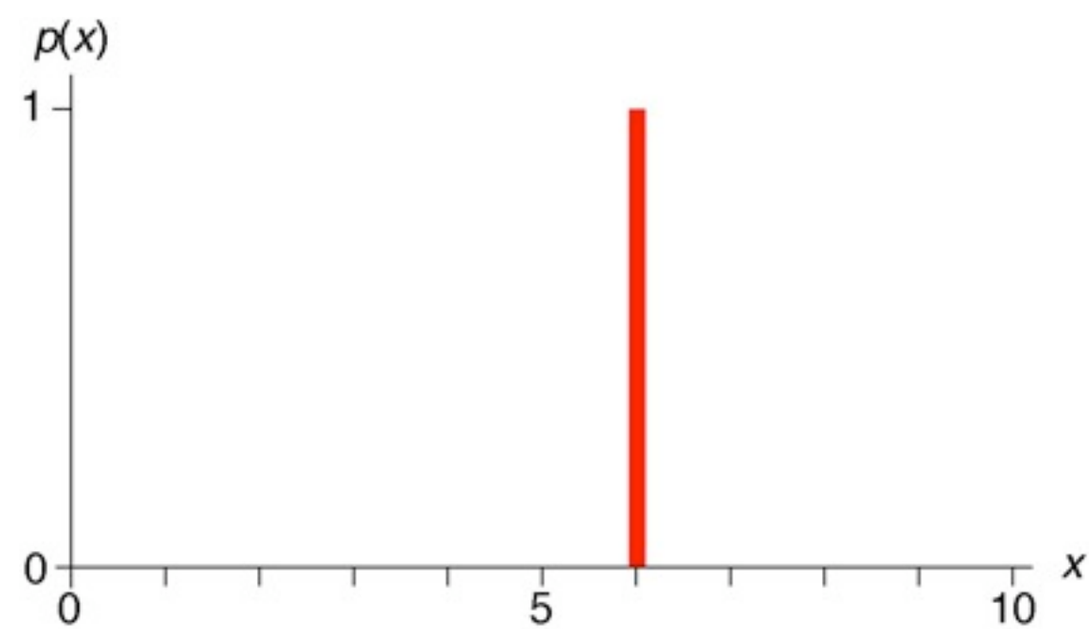
Zwei Spezialfälle:

$$p_1 = p_2 = p_3 = \ldots = p_\Omega = 1/\Omega$$

$$\eta = -\sum_{i=1}^{\Omega} \frac{1}{\Omega} \ln \frac{1}{\Omega} = -\ln \frac{1}{\Omega} = \ln \Omega$$



$$\eta = \underbrace{0 \cdot \ln 0}_{} + \ldots + \underbrace{1 \cdot \ln 1}_{= 0} + \underbrace{0 \cdot \ln 0}_{} + \ldots$$

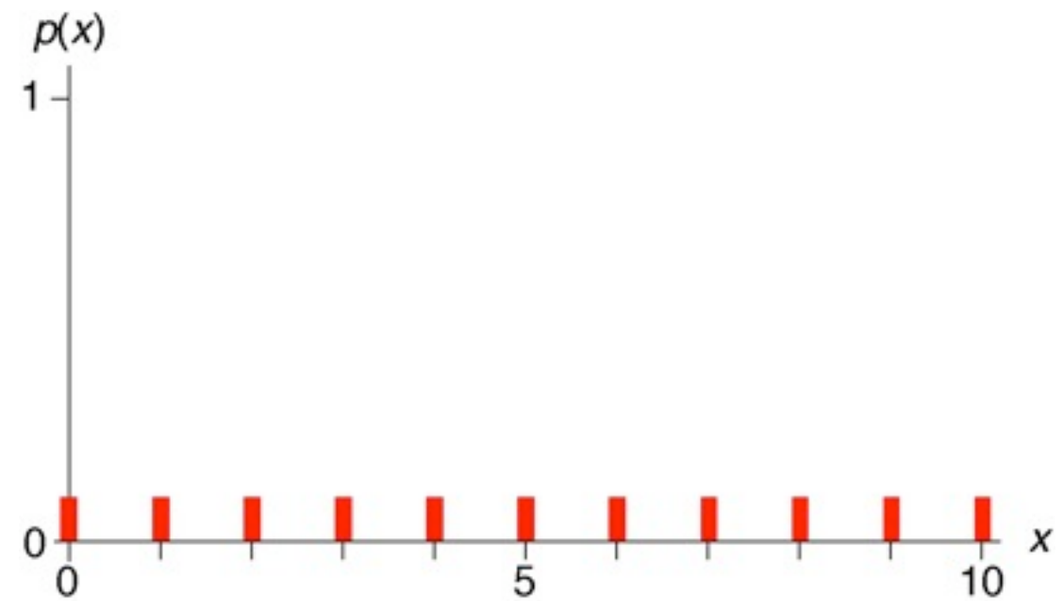


$$\eta = -\sum_i p(x_i) \ln p(x_i)$$

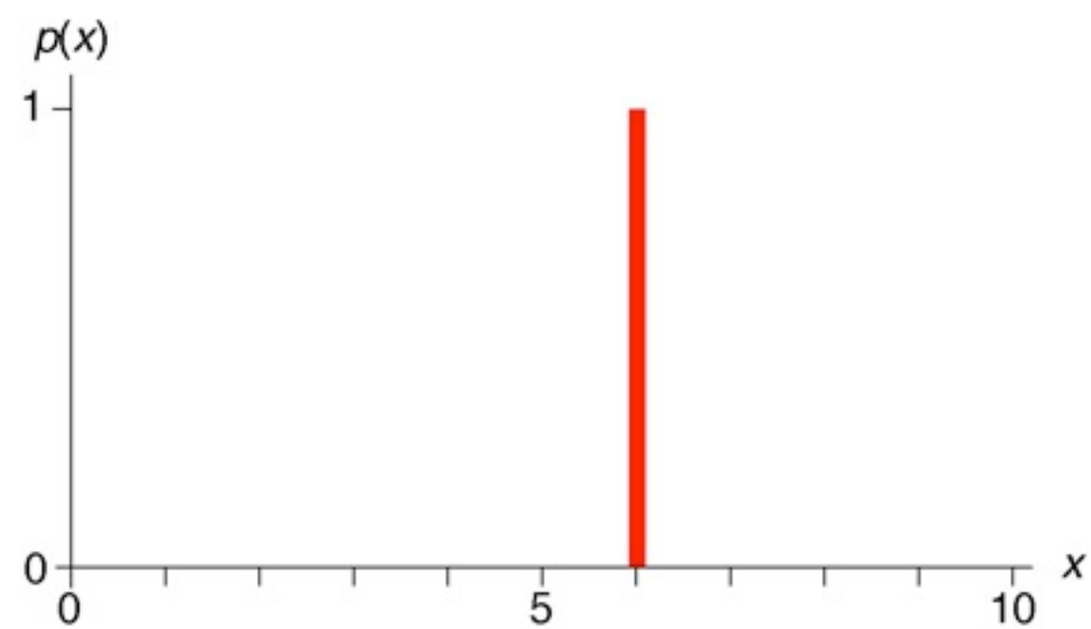
Zwei Spezialfälle:

$$p_1 = p_2 = p_3 = \ldots = p_\Omega = 1/\Omega$$

$$\eta = -\sum_{i=1}^{\Omega} \frac{1}{\Omega} \ln \frac{1}{\Omega} = -\ln \frac{1}{\Omega} = \ln \Omega$$



$$\eta = \underbrace{0 \cdot \ln 0}_{=0} + \ldots + \underbrace{1 \cdot \ln 1}_{=0} + \underbrace{0 \cdot \ln 0}_{=0} + \ldots$$

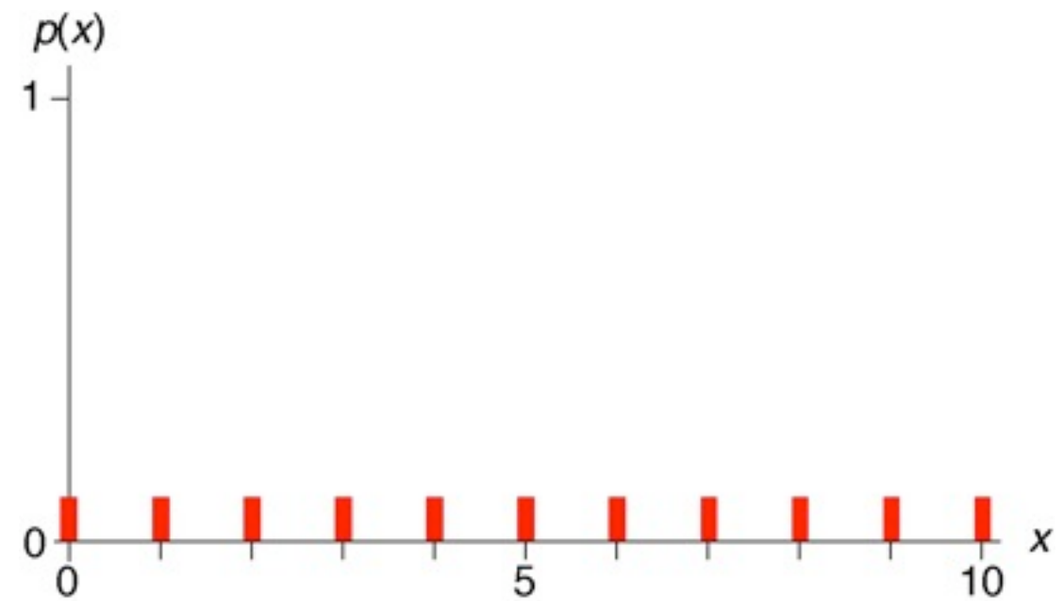


$$\eta = -\sum_i p(x_i) \ln p(x_i)$$

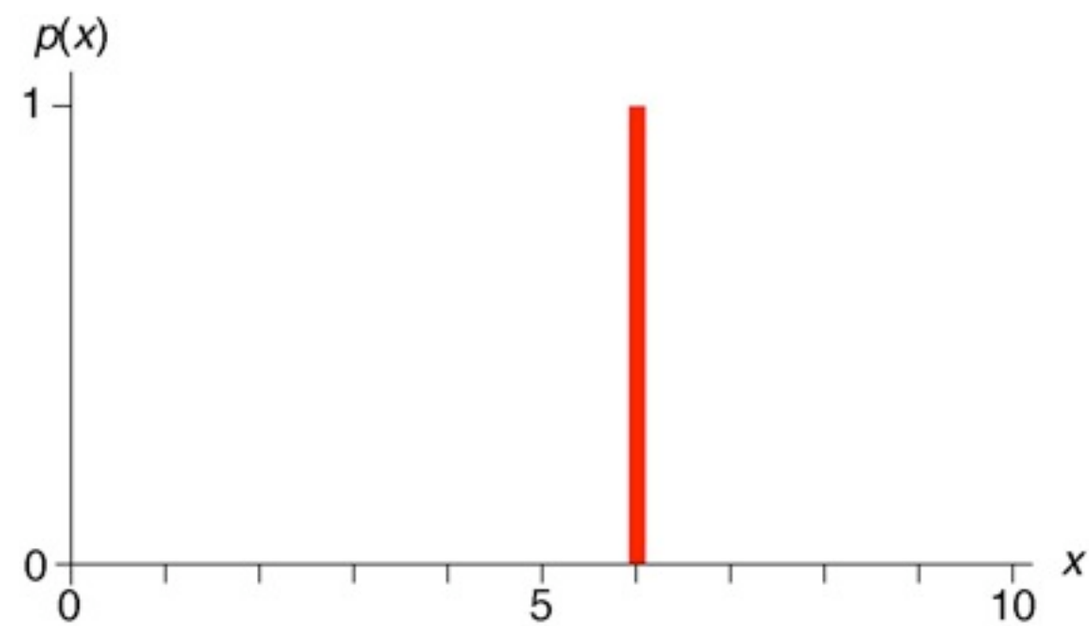
Zwei Spezialfälle:

$$p_1 = p_2 = p_3 = \ldots = p_\Omega = 1/\Omega$$

$$\eta = -\sum_{i=1}^{\Omega} \frac{1}{\Omega} \ln \frac{1}{\Omega} = -\ln \frac{1}{\Omega} = \ln \Omega$$



$$\eta = \underbrace{0 \cdot \ln 0}_{=0} + \ldots + \underbrace{1 \cdot \ln 1}_{=0} + \underbrace{0 \cdot \ln 0}_{=0} + \ldots = 0$$



Makrozustand:

Makrozustand: definiert durch *p, T, V,...*

Makrozustand: definiert durch *p, T, V,...*

Mikrozustand:

Makrozustand: definiert durch *p, T, V,...*

Mikrozustand: definiert durch mikroskopische Koordinaten aller Teilchen (Ort, Impuls, Drehimpuls,...

Makrozustand: definiert durch *p, T, V,...*

Mikrozustand: definiert durch mikroskopische Koordinaten aller Teilchen (Ort, Impuls, Drehimpuls,...

Gibbssches Ensemble:

Makrozustand: definiert durch *p, T, V,...*

Mikrozustand: definiert durch mikroskopische Koordinaten aller Teilchen (Ort, Impuls, Drehimpuls,...

Gibbssches Ensemble: sehr große Zahl gleichartig präparierter Systeme

Makrozustand: definiert durch *p, T, V,...*

Mikrozustand: definiert durch mikroskopische Koordinaten aller Teilchen (Ort, Impuls, Drehimpuls,...

Gibbssches Ensemble: sehr große Zahl gleichartig präparierter Systeme

statt mit Wahrscheinlichkeiten operiert man mit Häufigkeiten

η ist bis auf einen Faktor gleich der physikalischen Entropie.

η ist bis auf einen Faktor gleich der physikalischen Entropie.

$$S = -k \sum_{i=1}^{\Omega} p_i \ln p_i$$

η ist bis auf einen Faktor gleich der physikalischen Entropie.

$$S = -k \sum_{i=1}^{\Omega} p_i \ln p_i$$

$k = 1{,}380 \cdot 10^{-23}$ J/K (Boltzmann-Konstante)

η ist bis auf einen Faktor gleich der physikalischen Entropie.

$$S = -k \sum_{i=1}^{\Omega} p_i \ln p_i$$

$k = 1{,}380 \cdot 10^{-23}$ J/K (Boltzmann-Konstante)

Summieren über alle *Mikrozustände*

η ist bis auf einen Faktor gleich der physikalischen Entropie.

$$S = -k \sum_{i=1}^{\Omega} p_i \ln p_i$$

$k = 1{,}380 \cdot 10^{-23}$ J/K (Boltzmann-Konstante)

Summieren über alle *Mikrozustände*

Falls

$p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = \ldots = p_\Omega$

η ist bis auf einen Faktor gleich der physikalischen Entropie.

$$S = -k \sum_{i=1}^{\Omega} p_i \ln p_i$$

$k = 1{,}380 \cdot 10^{-23}$ J/K (Boltzmann-Konstante)

Summieren über alle *Mikrozustände*

Falls

$p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = \ldots = p_\Omega$

„thermodynamisches Gleichgewicht“

η ist bis auf einen Faktor gleich der physikalischen Entropie.

$$S = -k \sum_{i=1}^{\Omega} p_i \ln p_i$$

$k = 1{,}380 \cdot 10^{-23}$ J/K (Boltzmann-Konstante)

Summieren über alle *Mikrozustände*

Falls

$p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = \ldots = p_\Omega$

„thermodynamisches Gleichgewicht“

$$S = k \ln \Omega$$

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{(ka)^3}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E-b}{ka}}$$

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{(ka)^3}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E-b}{ka}}$$

1. Verteilung hängt von nur zwei Parametern ab: *a* und *b*

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{(ka)^3}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E-b}{ka}}$$

1. Verteilung hängt von nur zwei Parametern ab: a und b

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{(ka)^3}} \cdot e^{-\frac{E-b}{ka}}$$

1. Verteilung hängt von nur zwei Parametern ab: a und b

2. Die Parameter haben einen einfache Entsprechung auf der dritten Ebene:
a = Temperatur
b = chemisches Potenzial

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{(ka)^3}} \cdot e^{-\frac{E-b}{ka}}$$

1. Verteilung hängt von nur zwei Parametern ab: a und b

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{(kT)^3}} \cdot e^{-\frac{E-\mu}{kT}}$$

2. Die Parameter haben einen einfache Entsprechung auf der dritten Ebene:
a = Temperatur
b = chemisches Potenzial

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{(ka)^3}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E-b}{ka}}$$

1. Verteilung hängt von nur zwei Parametern ab: a und b

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{(kT)^3}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E-\mu}{kT}}$$

2. Die Parameter haben einen einfache Entsprechung auf der dritten Ebene:
a = Temperatur
b = chemisches Potenzial

Verfahren der statistischen Physik:

Man steckt eine Verteilung hinein: Gleichverteilung über die zugänglichen Mikrozustände (A-priori-Wahrscheinlichkeit)

Man berechnet daraus Verteilung anderer Größen.

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{(kT)^3}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E-\mu}{kT}}$$

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{(kT)^3}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E-\mu}{kT}}$$

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{(kT)^3}} \cdot \boxed{e^{-\frac{E-\mu}{kT}}}$$

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}} \boxed{\sqrt{\frac{E}{(kT)^3}}} \cdot \boxed{e^{-\frac{E-\mu}{kT}}}$$

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{(kT)^3}} \cdot e^{-\frac{E-\mu}{kT}}$$

$$p(E) = e^{-\frac{E-\mu}{kT}}$$

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{(kT)^3}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E-\mu}{kT}}$$

$$p(E) = \mathrm{e}^{-\frac{E-\mu}{kT}}$$

$$p(E) = \mathrm{e}^{\frac{\mu}{kT}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E}{kT}}$$

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{(kT)^3}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E-\mu}{kT}}$$

$$p(E) = \mathrm{e}^{-\frac{E-\mu}{kT}}$$

$$p(E) = \mathrm{e}^{\frac{\mu}{kT}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E}{kT}}$$

Boltzmann-Faktor

$$p(E) = \mathrm{e}^{-\frac{E-\mu}{kT}}$$

$$p(E) = \mathrm{e}^{-\frac{E-\mu}{kT}}$$

$$p(E) = \frac{1}{\mathrm{e}^{\frac{E-\mu}{kT}} + 1}$$

$$p(E) = \mathrm{e}^{-\frac{E-\mu}{kT}}$$

$$p(E) = \frac{1}{\mathrm{e}^{\frac{E-\mu}{kT}} + 1}$$

$$p(E) = \frac{1}{\mathrm{e}^{\frac{E-\mu}{kT}} - 1}$$

$$p(E) = \mathrm{e}^{-\frac{E-\mu}{kT}}$$ Boltzmann

$$p(E) = \frac{1}{\mathrm{e}^{\frac{E-\mu}{kT}} + 1}$$

$$p(E) = \frac{1}{\mathrm{e}^{\frac{E-\mu}{kT}} - 1}$$

$$p(E) = \mathrm{e}^{-\frac{E-\mu}{kT}}$$ Boltzmann

$$p(E) = \frac{1}{\mathrm{e}^{\frac{E-\mu}{kT}} + 1}$$ Fermi-Dirac

$$p(E) = \frac{1}{\mathrm{e}^{\frac{E-\mu}{kT}} - 1}$$

$$p(E) = \mathrm{e}^{-\frac{E-\mu}{kT}}$$ Boltzmann

$$p(E) = \frac{1}{\mathrm{e}^{\frac{E-\mu}{kT}} + 1}$$ Fermi-Dirac

$$p(E) = \frac{1}{\mathrm{e}^{\frac{E-\mu}{kT}} - 1}$$ Bose-Einstein

hohe Verdünnung

$$p(E) = e^{-\frac{E-\mu}{kT}}$$ Boltzmann

$$p(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-\mu}{kT}} + 1}$$ Fermi-Dirac

$$p(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-\mu}{kT}} - 1}$$ Bose-Einstein

Zusammenfassung statistische Ebene:

Zusammenfassung statistische Ebene:

kein thermodynamisches Gleichgewicht:

Zusammenfassung statistische Ebene:

kein thermodynamisches Gleichgewicht:

$$S = -k \sum_{i=1}^{\Omega} p_i \ln p_i$$

Zusammenfassung statistische Ebene:

kein thermodynamisches Gleichgewicht:

$$S = -k \sum_{i=1}^{\Omega} p_i \ln p_i$$

keine Temperatur

Zusammenfassung statistische Ebene:

kein thermodynamisches Gleichgewicht:

$$S = -k \sum_{i=1}^{\Omega} p_i \ln p_i$$

keine Temperatur

kein chemisches Potenzial

Zusammenfassung statistische Ebene:

kein thermodynamisches Gleichgewicht:

$$S = -k \sum_{i=1}^{\Omega} p_i \ln p_i$$

keine Temperatur

kein chemisches Potenzial

thermodynamisches Gleichgewicht:

Zusammenfassung statistische Ebene:

kein thermodynamisches Gleichgewicht:

$$S = -k \sum_{i=1}^{\Omega} p_i \ln p_i$$

keine Temperatur

kein chemisches Potenzial

thermodynamisches Gleichgewicht:

$$S = k \cdot \ln \Omega$$

Zusammenfassung statistische Ebene:

kein thermodynamisches Gleichgewicht:

$$S = -k \sum_{i=1}^{\Omega} p_i \ln p_i$$

keine Temperatur

kein chemisches Potenzial

thermodynamisches Gleichgewicht:

$$S = k \cdot \ln \Omega$$

Verteilung wird durch zwei Parameter beschrieben:
Temperatur und chemisches Potenzial

1. Molekularkinetische Ebene
2. Statistische Ebene
3. Phänomenologische Ebene
4. Folgerungen

3. Phänomenologische Ebene

3. Phänomenologische Ebene

3. Phänomenologische Ebene

Wie viel Energie bekommt man über die Welle aus einer Gasturbine heraus?

3. Phänomenologische Ebene

Wie viel Energie bekommt man über die Welle aus einer Gasturbine heraus?

Um wie viel nimmt die Temperatur ab, wenn man in der Atmosphäre 500 m nach oben geht?

3. Phänomenologische Ebene

Wie viel Energie bekommt man über die Welle aus einer Gasturbine heraus?

Um wie viel nimmt die Temperatur ab, wenn man in der Atmosphäre 500 m nach oben geht?

Wie viel Entropie wird erzeugt, wenn man zwei Wassermengen unterschiedlicher Temperatur mischt?

3. Phänomenologische Ebene

Wie viel Energie bekommt man über die Welle aus einer Gasturbine heraus?

Um wie viel nimmt die Temperatur ab, wenn man in der Atmosphäre 500 m nach oben geht?

Wie viel Entropie wird erzeugt, wenn man zwei Wassermengen unterschiedlicher Temperatur mischt?

Wie viel Wärme wird bei einer gegebenen chemischen Reaktion erzeugt?

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{(ka)^3}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E-b}{ka}}$$

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{(ka)^3}} \cdot e^{-\frac{E-b}{ka}}$$

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{(ka)^3}} \cdot e^{-\frac{E-b}{ka}}$$

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{(ka)^3}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E-b}{ka}}$$

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{(kT)^3}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E-\mu}{kT}}$$

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{(ka)^3}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E-b}{ka}}$$

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{(kT)^3}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E-\mu}{kT}}$$

Temperatur T

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{(ka)^3}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E-b}{ka}}$$

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{(kT)^3}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E-\mu}{kT}}$$

Temperatur T

chemisches Potenzial μ

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{(ka)^3}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E-b}{ka}}$$

$$\eta = -\sum_i p(x_i) \ln p(x_i)$$

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{(kT)^3}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E-\mu}{kT}}$$

Temperatur T

chemisches Potenzial μ

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{(ka)^3}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E-b}{ka}}$$

$$\eta = -\sum_i p(x_i) \ln p(x_i)$$

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{(kT)^3}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E-\mu}{kT}}$$

Temperatur T

chemisches Potenzial μ

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{(ka)^3}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E-b}{ka}}$$

$$\eta = -\sum_i p(x_i) \ln p(x_i)$$

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{(kT)^3}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E-\mu}{kT}}$$

$$S = -k \sum_{i=1}^{\Omega} p_i \ln p_i$$

Temperatur T

chemisches Potenzial μ

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{(ka)^3}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E-b}{ka}}$$

$$\eta = -\sum_i p(x_i) \ln p(x_i)$$

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{(kT)^3}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E-\mu}{kT}}$$

$$S = -k \sum_{i=1}^{\Omega} p_i \ln p_i$$

Temperatur T

chemisches Potenzial μ

Entropie S

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{(ka)^3}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E-b}{ka}}$$

$$\eta = -\sum_i p(x_i) \ln p(x_i)$$

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{(kT)^3}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E-\mu}{kT}}$$

$$S = -k \sum_{i=1}^{\Omega} p_i \ln p_i$$

Temperatur T

chemisches Potenzial μ

Entropie S

Stoffmenge n

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{(ka)^3}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E-b}{ka}}$$

$$\eta = -\sum_i p(x_i) \ln p(x_i)$$

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{(kT)^3}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E-\mu}{kT}}$$

$$S = -k \sum_{i=1}^{\Omega} p_i \ln p_i$$

Temperatur T

chemisches Potenzial μ

Entropie S

Stoffmenge n

Druck p

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{(ka)^3}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E-b}{ka}}$$

$$\eta = -\sum_i p(x_i) \ln p(x_i)$$

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{(kT)^3}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E-\mu}{kT}}$$

$$S = -k \sum_{i=1}^{\Omega} p_i \ln p_i$$

Temperatur T

chemisches Potenzial μ

Entropie S

Stoffmenge n

Druck p

Volumen V

kein thermodynamisches
Gleichgewicht

kein thermodynamisches
Gleichgewicht

Entropie

kein thermodynamisches Gleichgewicht → thermodynamisches Gleichgewicht

Entropie

kein thermodynamisches Gleichgewicht → thermodynamisches Gleichgewicht

Entropie

kein thermodynamisches Gleichgewicht → thermodynamisches Gleichgewicht

Entropie

Temperatur

kein thermodynamisches Gleichgewicht → thermodynamisches Gleichgewicht

Entropie

Temperatur

chemisches Potenzial

1. Molekularkinetische Ebene
2. Statistische Ebene
3. Phänomenologische Ebene
4. Folgerungen

4. Folgerungen

4. Folgerungen

4. Folgerungen

Beschreibung der Natur auf verschiedenen Größenskalen oder Komplexitätsebenen.

4. Folgerungen

Beschreibung der Natur auf verschiedenen Größenskalen oder Komplexitätsebenen.

zum Kleinen:

4. Folgerungen

Beschreibung der Natur auf verschiedenen Größenskalen oder Komplexitätsebenen.

zum Kleinen:

Man sucht nach dem Unteilbaren („atomos“), dem Elementaren („Elementarteilchen“)

4. Folgerungen

Beschreibung der Natur auf verschiedenen Größenskalen oder Komplexitätsebenen.

zum Kleinen:

Man sucht nach dem Unteilbaren („atomos“), dem Elementaren („Elementarteilchen“)

Man hofft, dass die Beschreibung einfacher wird.

4. Folgerungen

Beschreibung der Natur auf verschiedenen Größenskalen oder Komplexitätsebenen.

zum Kleinen:

Man sucht nach dem Unteilbaren („atomos“), dem Elementaren („Elementarteilchen“)

Man hofft, dass die Beschreibung einfacher wird.

Illusion

4. Folgerungen

Beschreibung der Natur auf verschiedenen Größenskalen oder Komplexitätsebenen.

zum Kleinen:

Man sucht nach dem Unteilbaren („atomos“), dem Elementaren („Elementarteilchen“)

Man hofft, dass die Beschreibung einfacher wird.

Illusion

immer neue Strukturen

4. Folgerungen

Beschreibung der Natur auf verschiedenen Größenskalen oder Komplexitätsebenen.

zum Kleinen:

Man sucht nach dem Unteilbaren („atomos“), dem Elementaren („Elementarteilchen“)

Man hofft, dass die Beschreibung einfacher wird.

Illusion

immer neue Strukturen

zum Großen:

4. Folgerungen

Beschreibung der Natur auf verschiedenen Größenskalen oder Komplexitätsebenen.

zum Kleinen:

Man sucht nach dem Unteilbaren („atomos“), dem Elementaren („Elementarteilchen“)

Man hofft, dass die Beschreibung einfacher wird.

Illusion

immer neue Strukturen

zum Großen:

Man erwartet das Unübersichtliche Durcheinander.

4. Folgerungen

Beschreibung der Natur auf verschiedenen Größenskalen oder Komplexitätsebenen.

zum Kleinen:

Man sucht nach dem Unteilbaren („atomos“), dem Elementaren („Elementarteilchen“)

Man hofft, dass die Beschreibung einfacher wird.

Illusion

immer neue Strukturen

zum Großen:

Man erwartet das Unübersichtliche Durcheinander.

Man befürchtet, dass die Beschreibung komplizierter wird.

4. Folgerungen

Beschreibung der Natur auf verschiedenen Größenskalen oder Komplexitätsebenen.

zum Kleinen:

Man sucht nach dem Unteilbaren („atomos“), dem Elementaren („Elementarteilchen“)

Man hofft, dass die Beschreibung einfacher wird.

Illusion

immer neue Strukturen

zum Großen:

Man erwartet das Unübersichtliche Durcheinander.

Man befürchtet, dass die Beschreibung komplizierter wird.

Irrtum

4. Folgerungen

Beschreibung der Natur auf verschiedenen Größenskalen oder Komplexitätsebenen.

zum Kleinen:

Man sucht nach dem Unteilbaren („atomos“), dem Elementaren („Elementarteilchen“)

Man hofft, dass die Beschreibung einfacher wird.

Illusion

immer neue Strukturen

zum Großen:

Man erwartet das Unübersichtliche Durcheinander.

Man befürchtet, dass die Beschreibung komplizierter wird.

Irrtum

immer neue Gesetzmäßigkeiten

4. Folgerungen

Beschreibung der Natur auf verschiedenen Größenskalen oder Komplexitätsebenen.

zum Kleinen:

Man sucht nach dem Unteilbaren („atomos“), dem Elementaren („Elementarteilchen“)

Man hofft, dass die Beschreibung einfacher wird.

Reduktionismus

Illusion

immer neue Strukturen

zum Großen:

Man erwartet das Unübersichtliche Durcheinander.

Man befürchtet, dass die Beschreibung komplizierter wird.

Irrtum

immer neue Gesetzmäßigkeiten

4. Folgerungen

Beschreibung der Natur auf verschiedenen Größenskalen oder Komplexitätsebenen.

zum Kleinen:

Man sucht nach dem Unteilbaren („atomos“), dem Elementaren („Elementarteilchen“)

Man hofft, dass die Beschreibung einfacher wird.

Illusion

immer neue Strukturen

Reduktionismus

zum Großen:

Man erwartet das Unübersichtliche Durcheinander.

Man befürchtet, dass die Beschreibung komplizierter wird.

Irrtum

immer neue Gesetzmäßigkeiten

Emergenz

4. Folgerungen

Beschreibung der Natur auf verschiedenen Größenskalen oder Komplexitätsebenen.

zum Kleinen:

Man sucht nach dem Unteilbaren („atomos“), dem Elementaren („Elementarteilchen“)

Man hofft, dass die Beschreibung einfacher wird.

Illusion

immer neue Strukturen

Reduktionismus

zum Großen:

Man erwartet das Unübersichtliche Durcheinander.

Man befürchtet, dass die Beschreibung komplizierter wird.

Irrtum

immer neue Gesetzmäßigkeiten

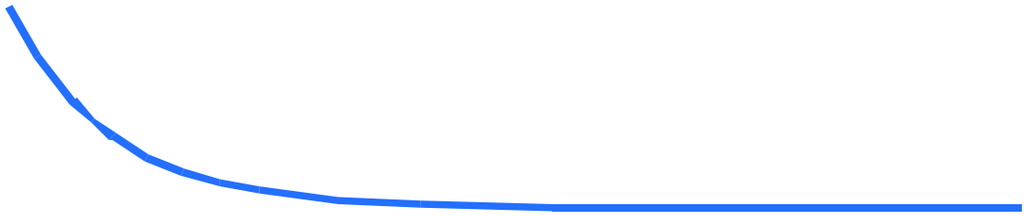
Emergenz

Robert Laughlin, Physiknobelpreis 1998,
Abschied von der Weltformel

$$p(E) = \mathrm{e}^{-\frac{E-\mu}{kT}}$$

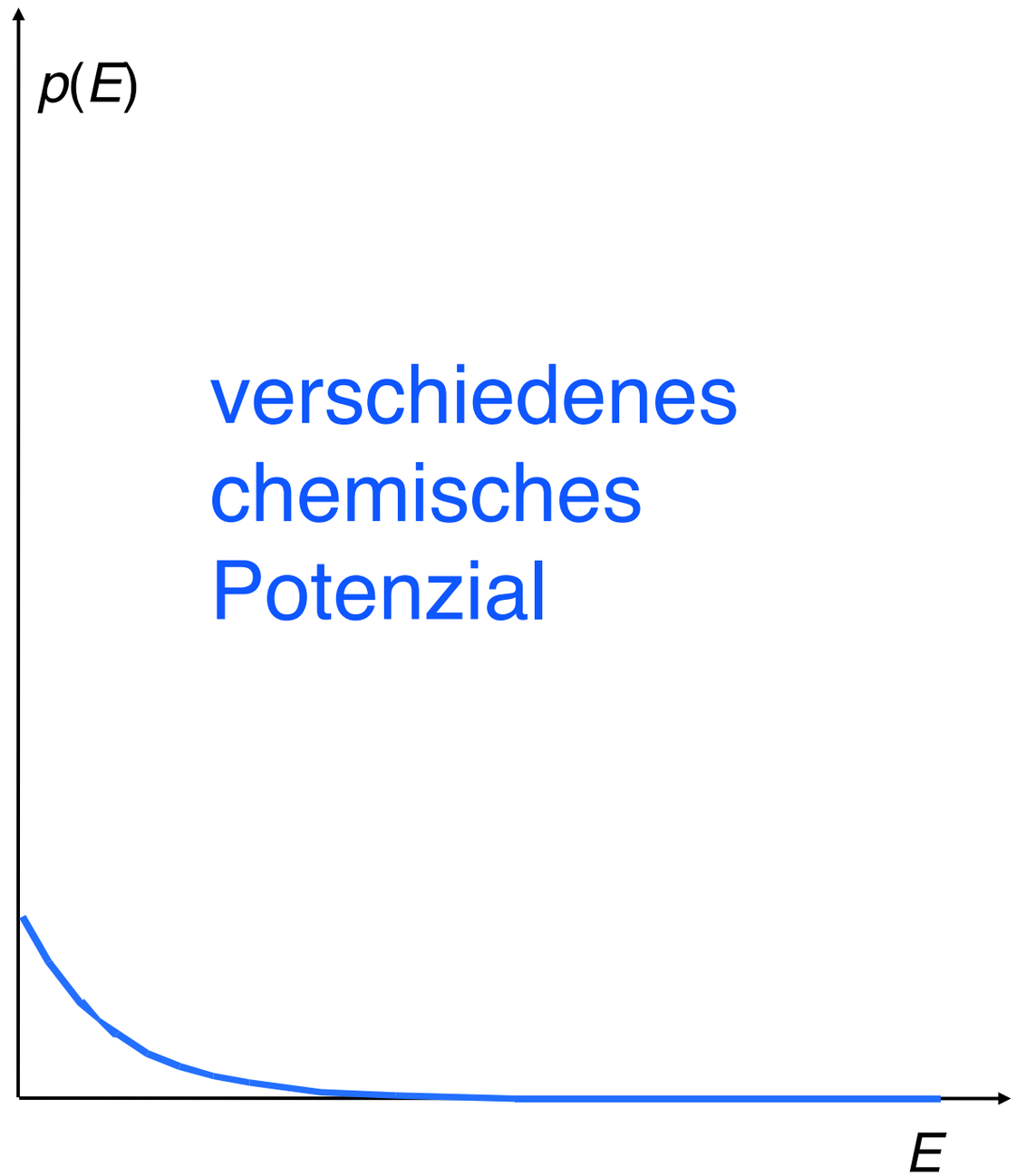
$$p(E) = \mathrm{e}^{\frac{\mu}{kT}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E}{kT}}$$

verschiedenes chemisches Potenzial



$$p(E) = \mathrm{e}^{-\frac{E-\mu}{kT}}$$

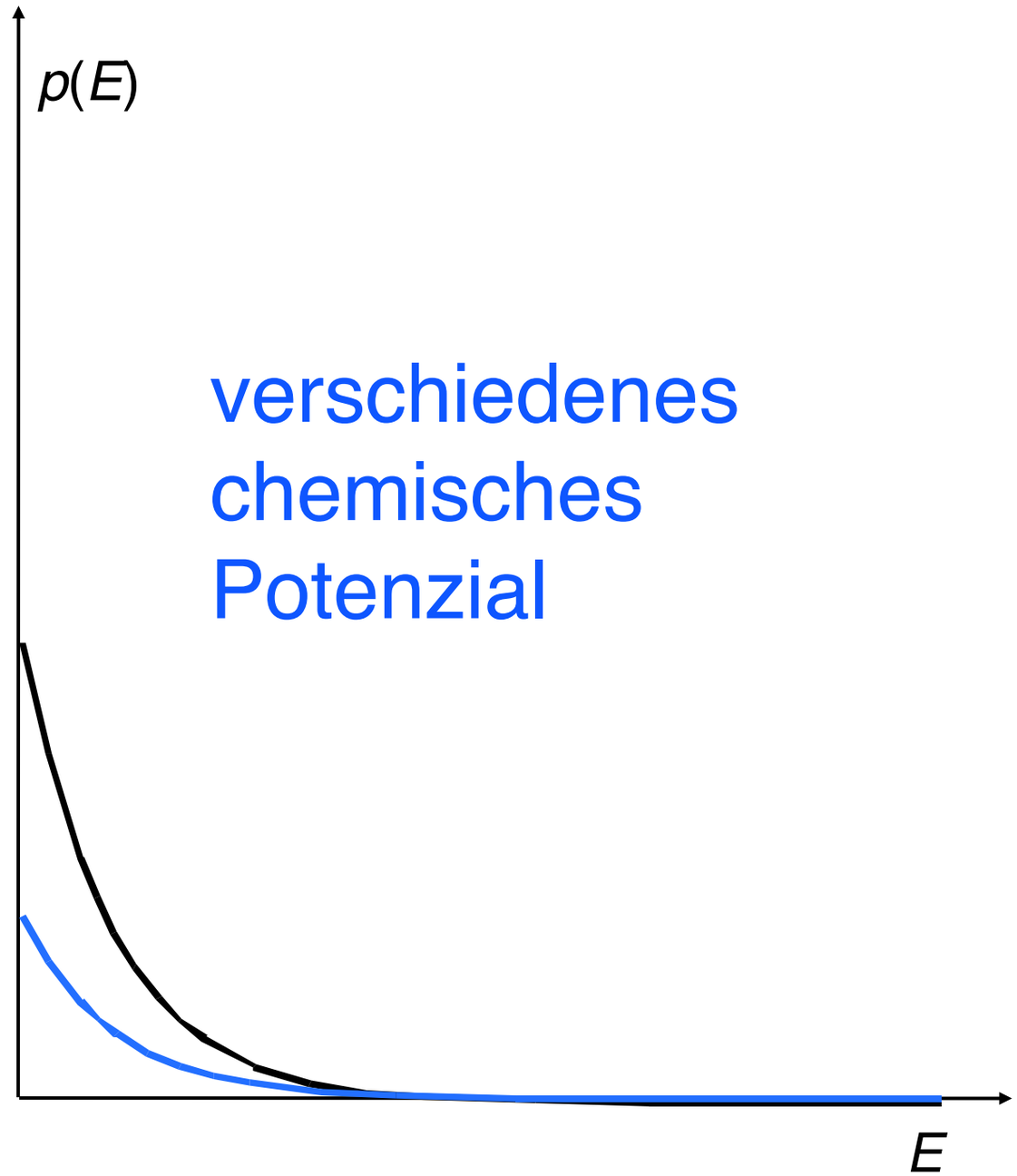
$$p(E) = \mathrm{e}^{\frac{\mu}{kT}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E}{kT}}$$



verschiedenes chemisches Potenzial

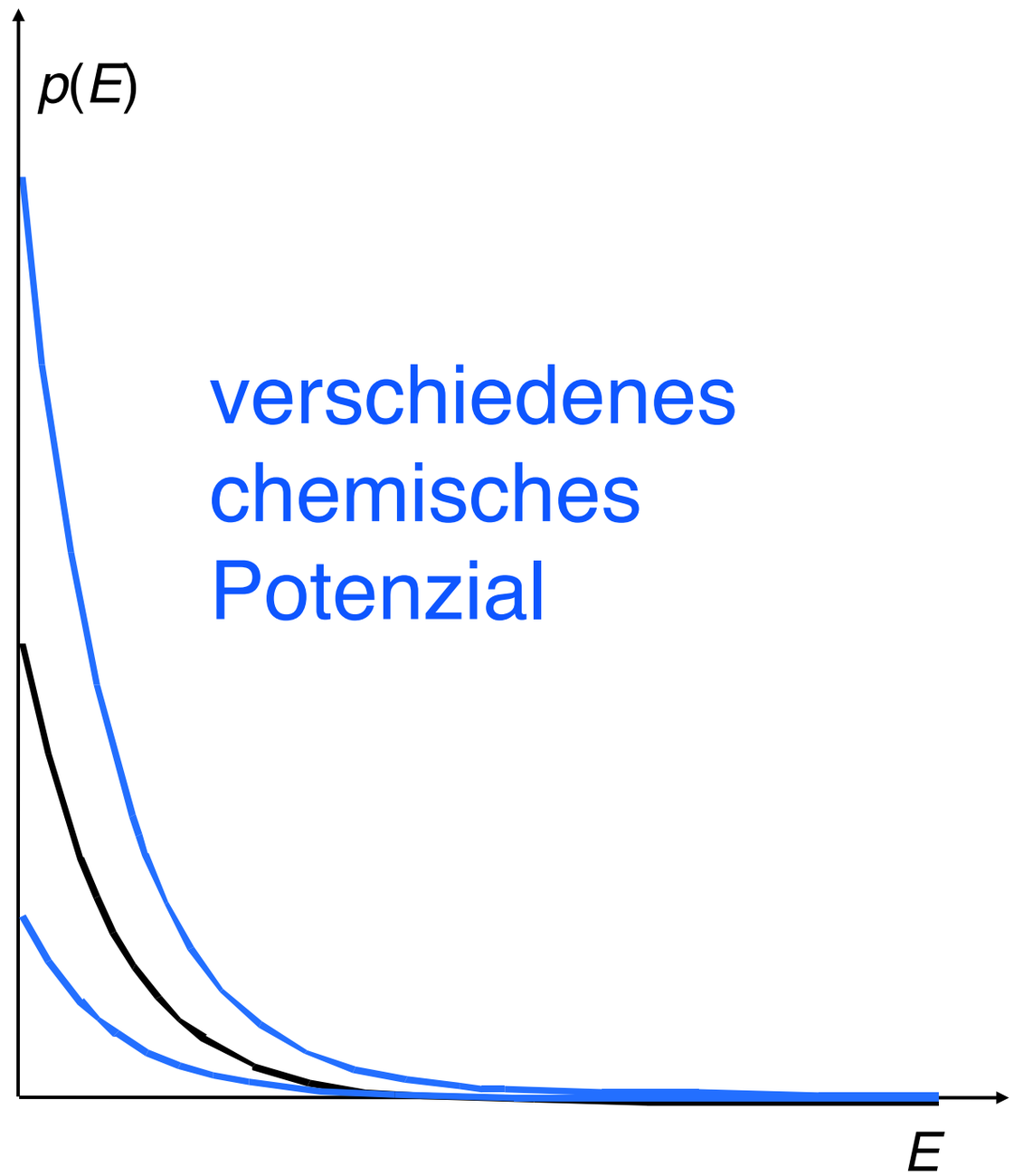
$$p(E) = \mathrm{e}^{-\frac{E-\mu}{kT}}$$

$$p(E) = \mathrm{e}^{\frac{\mu}{kT}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E}{kT}}$$



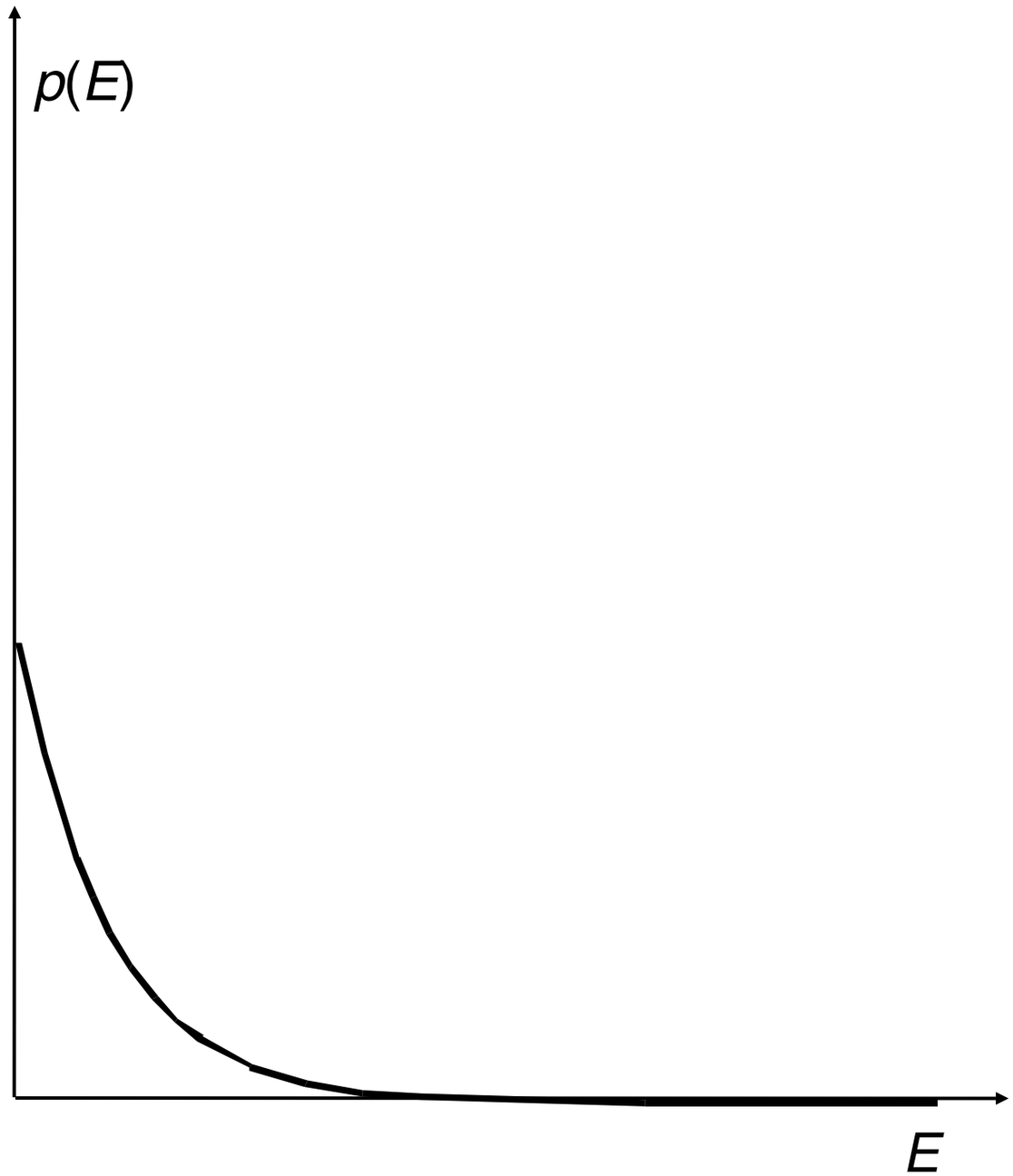
$$p(E) = \mathrm{e}^{-\frac{E-\mu}{kT}}$$

$$p(E) = \mathrm{e}^{\frac{\mu}{kT}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E}{kT}}$$



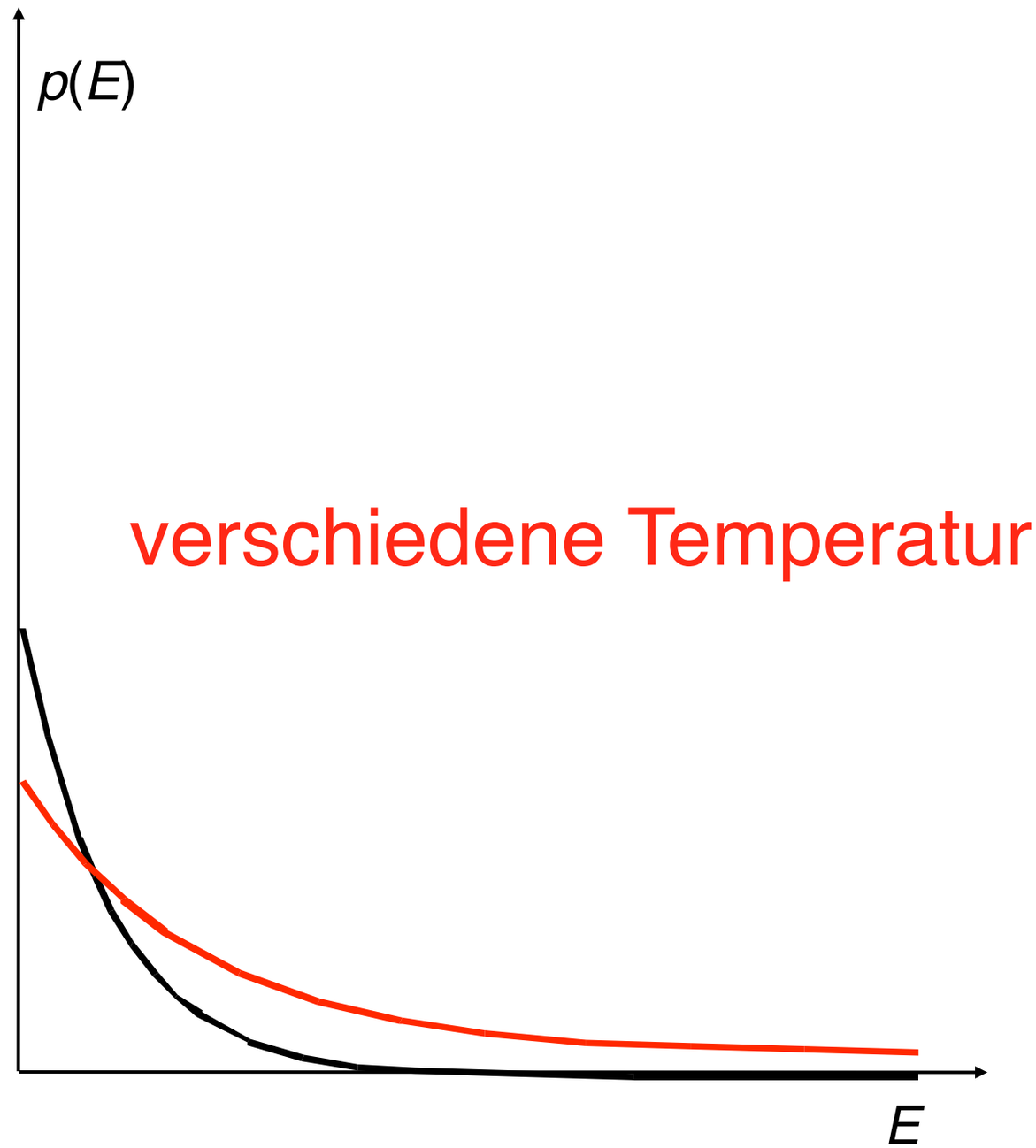
$$p(E) = \mathrm{e}^{-\frac{E-\mu}{kT}}$$

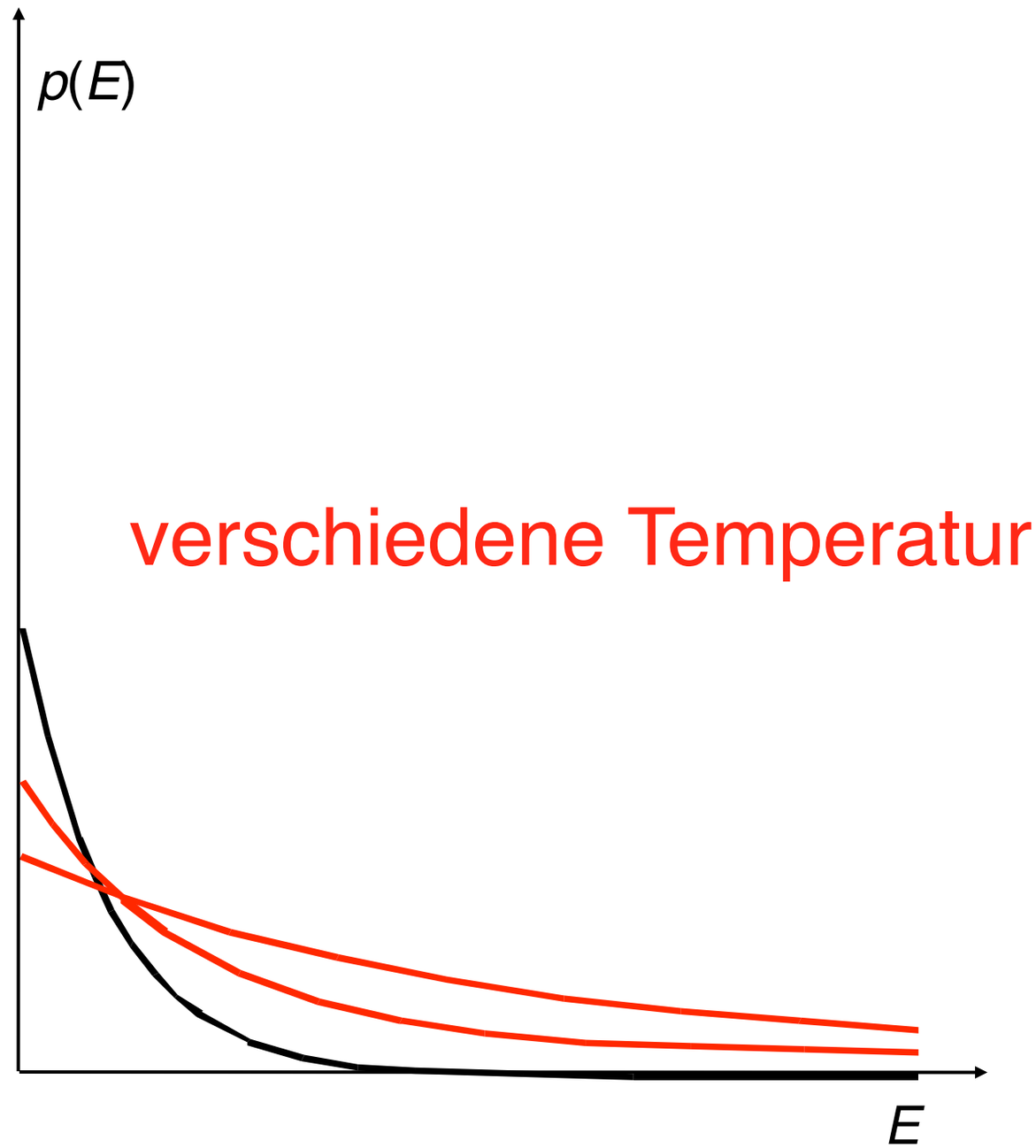
$$p(E) = \mathrm{e}^{\frac{\mu}{kT}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E}{kT}}$$



$$p(E) = \mathrm{e}^{-\frac{E-\mu}{kT}}$$

$$p(E) = \mathrm{e}^{\frac{\mu}{kT}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E}{kT}}$$



$$p(E) = \mathrm{e}^{-\frac{E-\mu}{kT}}$$

$$p(E) = \mathrm{e}^{\frac{\mu}{kT}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E}{kT}}$$