

Hauptsätze

0. Hauptsatz (therm. Gleichgewicht)

$$T_a = T_b; T_b = T_c \Rightarrow T_a = T_c$$

1. Hauptsatz (Wärme = Energie, R. Mayer 1842, kcal → J)

thermodynamische Verallgemeinerung der Energieerhaltung

innere Energie: **U** [J]

Enthalpie: **H = U + p V** [J]; spez. Enthalpie **h** = $\frac{H}{M}$ in $[\frac{J}{g}]$

...

3. Hauptsatz (Nernst, Unerreichbarkeit des absoluten Nullpunkts)

Entropie **S** geht gegen 0 für $T \rightarrow 0$

(nicht jedoch die Energie !)

Hauptsätze

2. Hauptsatz (Aussage über Richtung des Prozessverlaufs)

Entropie S [J/K]; $\delta S = \frac{\delta Q_{ref}}{T}$ bzw. $\delta Q = T \cdot \delta S$

coefficient of performance: $\varepsilon = COP = \frac{Q_0}{W} = \frac{\dot{Q}_0}{P}$

**ideal: Carnot-
Kühlfaktor**

$$COP_{rev} = \varepsilon_c = \frac{\dot{Q}_0}{P_{min}} = \frac{T_0}{(T_u - T_0)}$$

zusätzlich zu beachten:

**Effizienz (carnot fraction; efficiency;
FOM – figure of merit)**

$$\eta = \frac{COP_{real}}{COP_{ideal}}$$

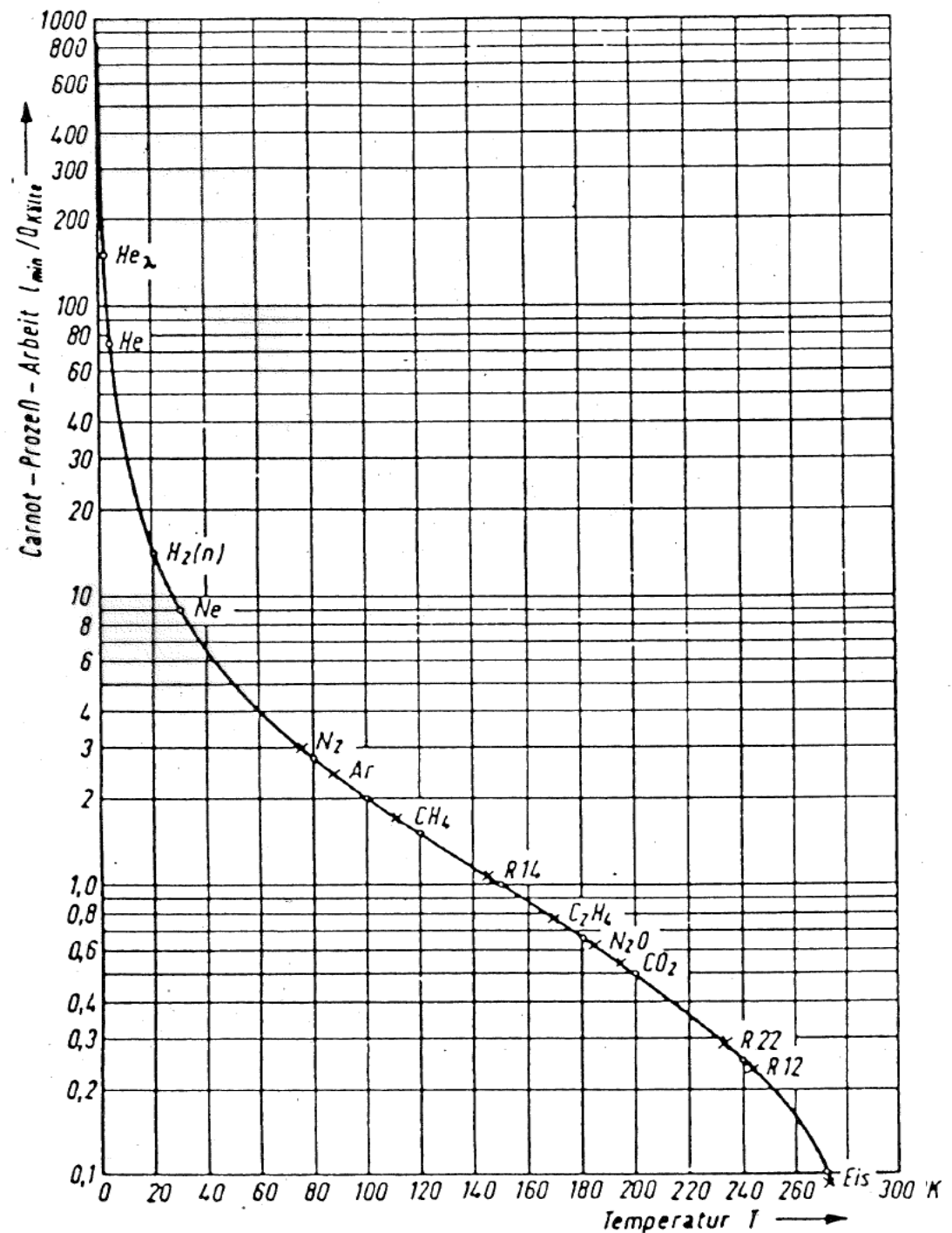
$\eta < 1$ (Kryotechnik typisch: $\eta = 1 \dots 35 \%$)

uneinheitliche Symbole („ ν “, „ ζ “) und Benennungen (Leistungszahl, Wirkungsgrad) führen häufig zu Verwechslungen!

Hauptsätze

Minimaler Energiebedarf zur
Kälteerzeugung nach dem
Carnot-Prozess

Umgebungstemperatur $T_u = 300 \text{ K}$



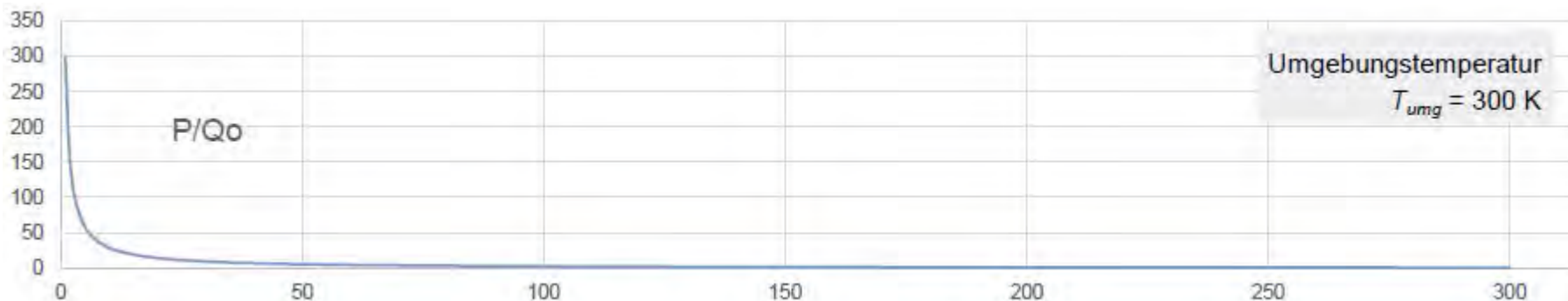
Hauptsätze

Das Carnot-Diktat:

$$\text{Leistungszahl } \varepsilon_c = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{\dot{Q}_0}{P_{\min}} = \frac{T_0}{(T_u - T_0)}$$

für $T_u = 288 \text{ K}$:

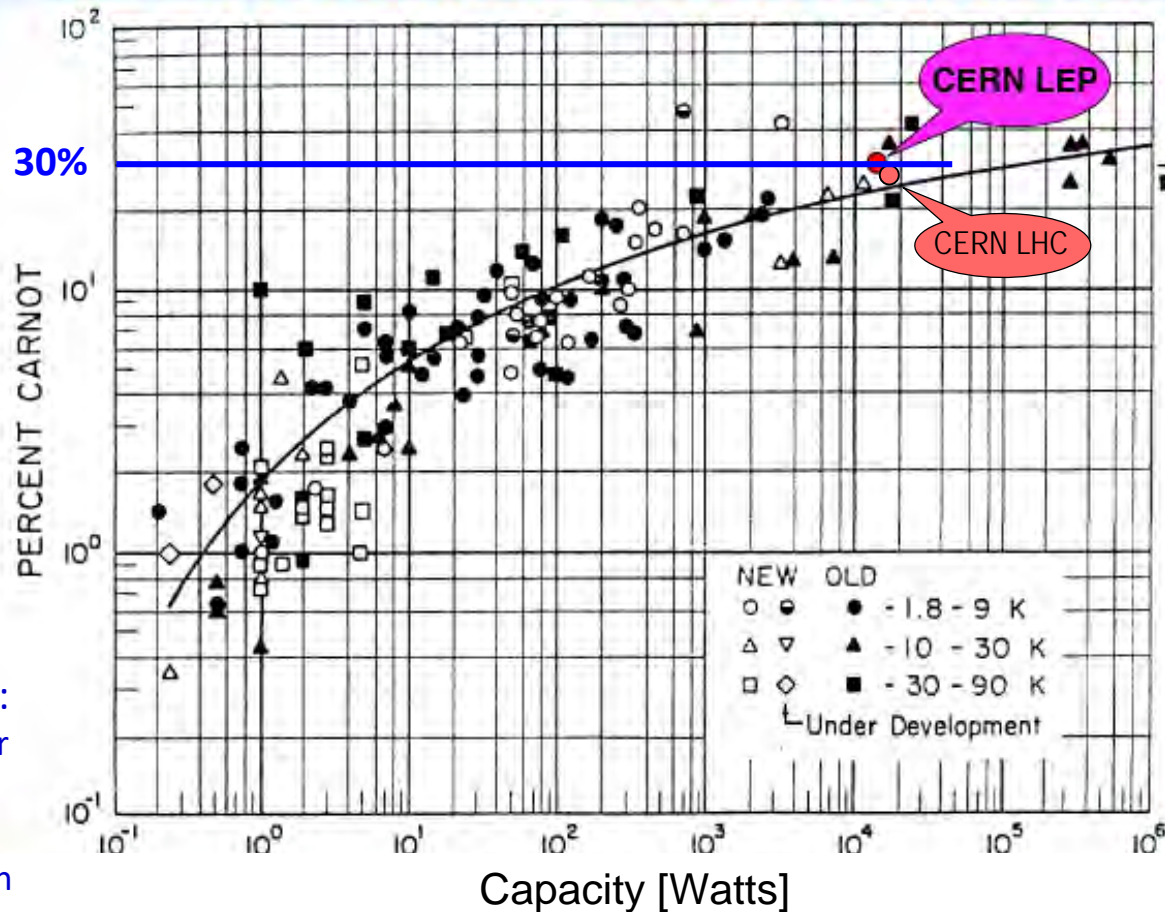
$T_0 \text{ [K]}$	ε_c	[W/W]
144	1	1
77	0,365	3
20	0,075	13
4	0,014	71
1,8	0,006	160
0,01	0,00003	30 000



Hauptsätze

Darstellung:
Guy Gisteau;
Serge Claudet

LE DIAGRAMME DE STROBRIDGE



Strobridge:
Analyse aller
bekannten
kryogenen
Kälteanlagen
/ Kühler

$$\eta = \frac{COP_{real}}{COP_{ideal}}$$

= Carnot fraction

Carnot fraction:
hängt
hauptsächlich von
Anlagengröße ab,
weniger von T_{kalt}

Helium-Kälteanlage 2 ... 4 K: typ. 1000 5000 W/W