



## 2 Molekulare Deutung der Temperatur, und kinetische Gastheorie



### 2.0 Einführungsversuch: Temperatur und "Teilchenbewegung"

### 2.1 Modell des idealen Gases

### 2.2 Teilchengeschwindigkeiten, Maxwell-Boltzmann-Geschwindigkeitsverteilung

### 2.3 Reale Gase, Van-der-Waals-Gleichung

## 2 Molekulare Deutung der Temperatur, und kinetische Gastheorie



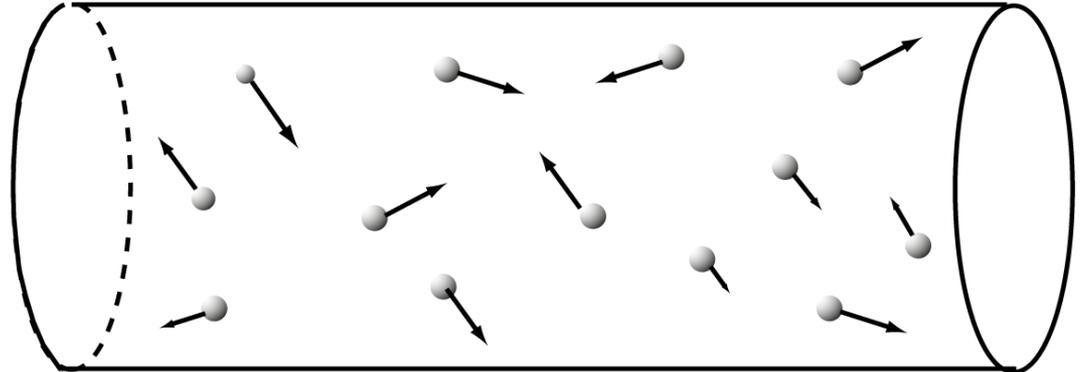
[Link zum Experiment:](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_W_Video/2-0-Diffusion-K03-1.m4v)

[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_W\\_Video/2-0-Diffusion-K03-1.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_W_Video/2-0-Diffusion-K03-1.m4v)



### 2.1 Ideale Gase (Modellvorstellung)

### Ideale Gase



### Vereinfachende Modellvorstellung:

- "punktförmige" Teilchen  
(ihr Volumen ist vernachlässigbar)
- keine Wechselwirkungen  
zwischen den Teilchen - ausgenommen
- vollkommen elastische Stöße  
(zwischen Teilchen und Wänden)



Einheit: 1 Mol;

1 Mol ist die Menge eines Stoffes, die  $N_A$  Teilchen enthält.

$$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ (Teilchen)}$$

Masse und Stoffmenge:

Die Masse von einem Mol, d.h. die Molmasse  $M$ , ist zu errechnen als:

$$M = N_A \cdot m_M;$$

$m_M$  : Molekülmasse

allgemein:

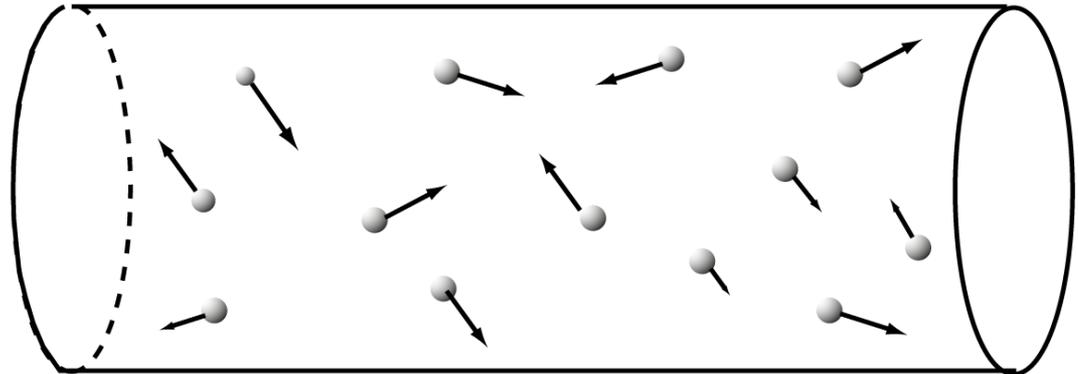
$$m = \nu \cdot M;$$

Beispiel Kohlenstoff  $^{12}\text{C}$ :

$$M_{^{12}\text{C}} = 12 \text{ g};$$



## 2.1 Ideale Gase



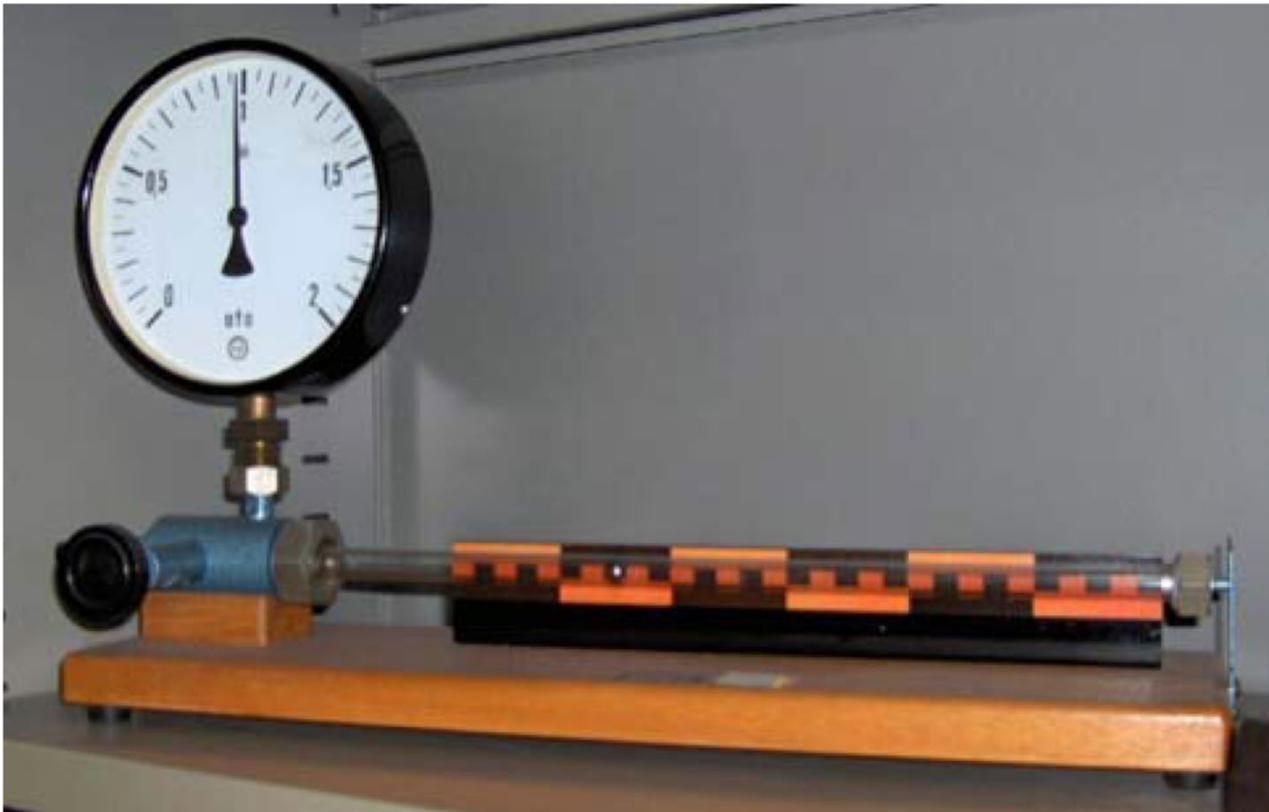
Den thermische Zustand von Gasen  
beschreiben wir durch die  
Zustandsgrößen

- Temperatur  $T$
- Volumen  $V$
- Druck  $p$

und der Stoffmenge  $n$  (oder  $\nu$ )

### Boyle-Mariotte

### Zusammenhang zwischen Druck und Volumen beim idealen Gas



[Link zum Experiment:](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_W_Video/2-2-Boyle-M-K07-1.m4v)

[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_W\\_Video/2-2-Boyle-M-K07-1.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_W_Video/2-2-Boyle-M-K07-1.m4v)

## 2 Molekulare Deutung der Temperatur, und kinetische Gastheorie





**Boyle-Mariotte'sches Gesetz:**  $p \sim \frac{1}{V}$  ; bei  $T = const.$   
und

**Gay-Lussac'sches Gesetz:**  $V \sim T$  ; bei  $p = const.$

**Zustandsgleichung für das "Ideale Gas":**

$$p \cdot V = N \cdot k_B \cdot T$$

$N$ : Anzahl der Teilchen im Gas

$k_B$ : Boltzmann-Konstante

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$n$ : Stoffmenge

$R$ : Allg. Gaskonst.



**Weitere Formulierung:**

$$\frac{p \cdot V}{T} = \frac{p_0 \cdot V_0}{T_0} = \frac{p_n \cdot V_n}{T_n}$$

Als allgemeinen Bezugszustand wählt man den "**Normzustand**":

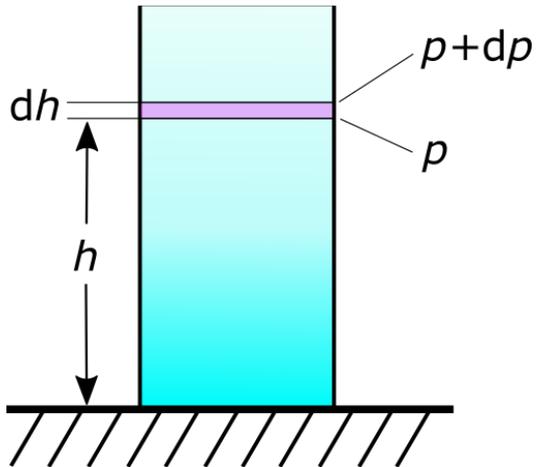
Normtemperatur:  $T_n = 273,15 \text{ K}$

Normdruck:  $p_n = 101325 \text{ Pa}$

Das Volumen hängt dann von der Stoffmenge ab,  
das sind **pro Mol 22,41 Liter**

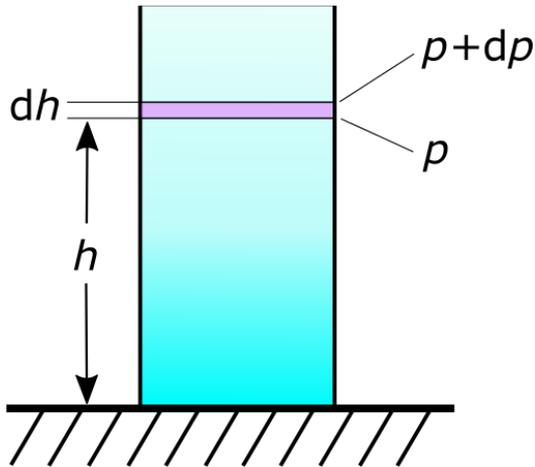
## Atmosphärischer Luftdruck ist Schweredruck der Lufthülle

Die Dichte ist dabei nicht konstant. Es gilt:  $\frac{\rho}{p} = \frac{\rho_0}{p_0}$



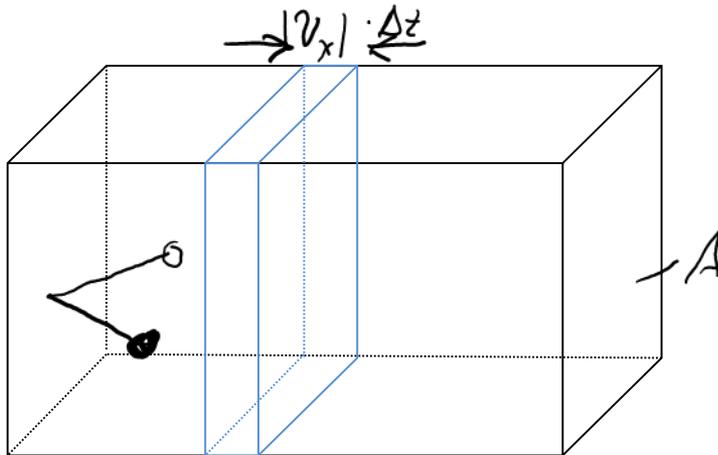
## Atmosphärischer Luftdruck ist Schweredruck der Lufthülle

Die Dichte ist dabei nicht konstant. Es gilt:  $\frac{\rho}{p} = \frac{\rho_0}{p_0}$



$$p = p_0 \cdot e^{-\frac{\rho_0 \cdot g}{p_0} \cdot h}$$

Barometrische Höhenformel



Impulsänderung:  $2 m |v_x|$   
(in x-Richtung)

$N$  Teilchen  
Impulsänderung

$$|\Delta \vec{p}| = 2 m |v_x| \left( \frac{N}{V} \cdot A \cdot |v_x| \cdot \Delta t \right)$$

$$= m |v_x|^2 \cdot A \cdot \frac{N}{V} \cdot \Delta t$$

## 2 Molekulare Deutung der Temperatur, und kinetische Gastheorie



## 2 Molekulare Deutung der Temperatur, und kinetische Gastheorie





$$\frac{3}{2} k_B T = \langle E_{kin} \rangle$$

Die Temperatur  $T$  ist ein Maß für die **mittlere kinetische Energie  $\langle E_{kin} \rangle$**  der Teilchen (bei einem idealen Gas).



### Beispiele bei 0°C

Gas	$\langle v \rangle$ in m/s	$c_{\text{Schall}}$ in m/s
H <sub>2</sub>	1700	1161
N <sub>2</sub>	453	309
Xe	209	155



### 2.2 Teilchengeschwindigkeiten, Maxwell-Boltzmann-Geschwindigkeitsverteilung

## "Rüttelmaschine"

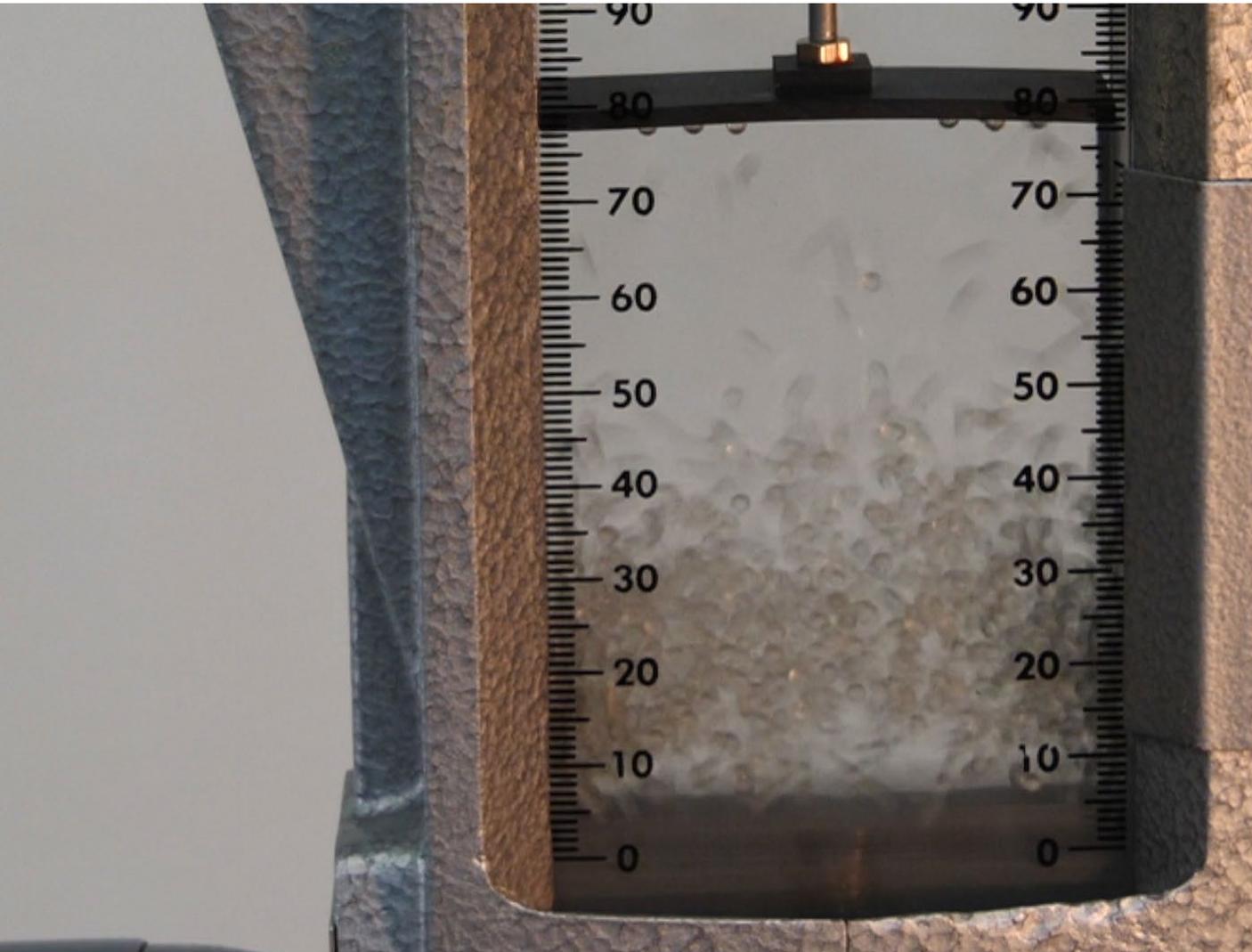


## 2 Molekulare Deutung der Temperatur, und kinetische Gastheorie



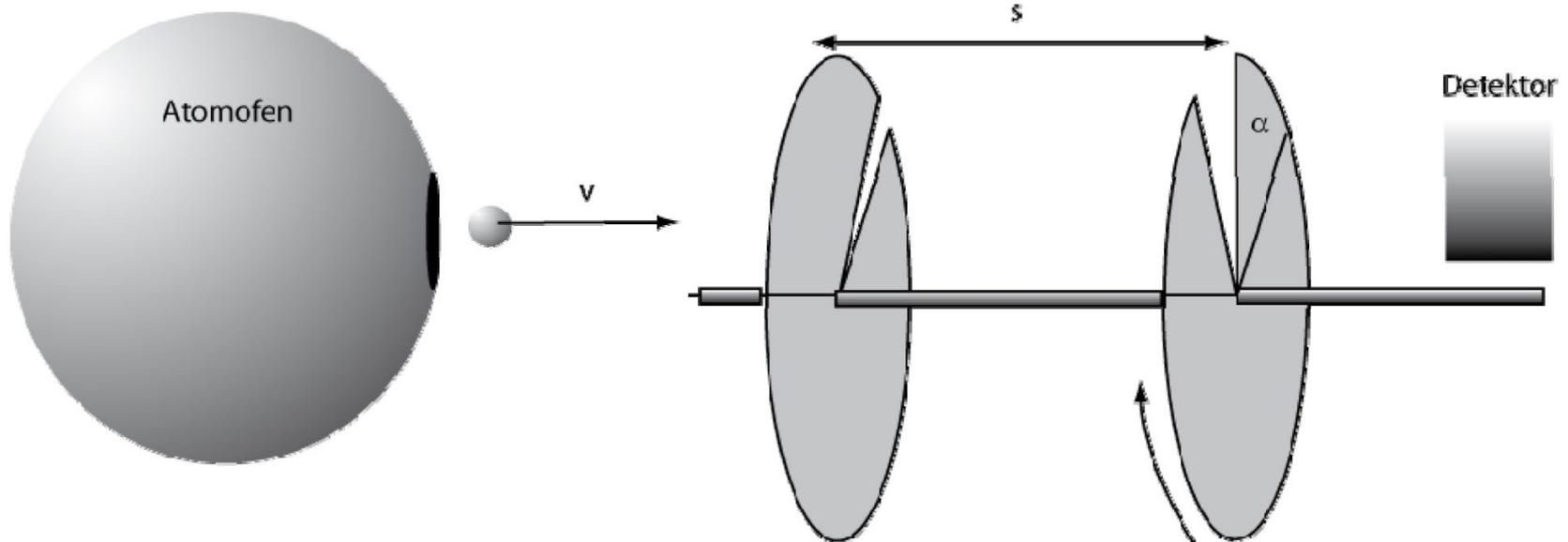
[Link zum Experiment:](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_W_Video/2-2-Ruettel-Versuch-1.m4v)

[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_W\\_Video/2-2-Ruettel-Versuch-1.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_W_Video/2-2-Ruettel-Versuch-1.m4v)



## Maxwell-Boltzmann-Verteilung

Experimentelle Bestimmung der Geschwindigkeitsverteilung

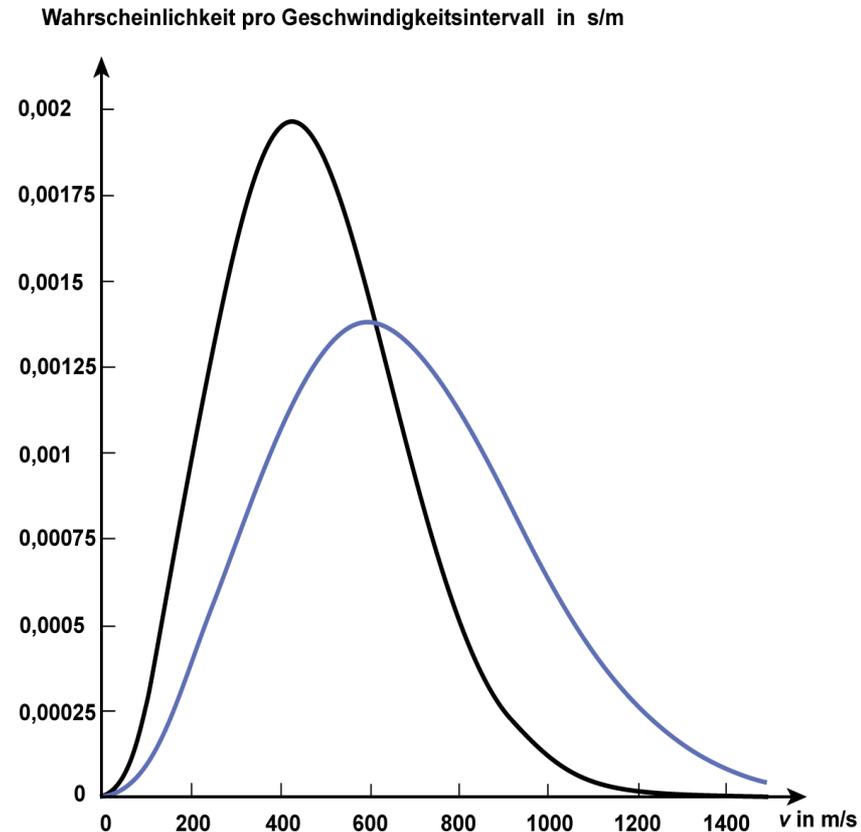


$$v = \frac{s}{t} = \frac{s}{\alpha / \omega} = \frac{s\omega}{\alpha}$$



## Maxwell-Boltzmann-Verteilung

$$f(v) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{m}{2k_B T} \right)^{3/2} \cdot v^2 \cdot e^{-mv^2/(2k_B T)}$$



Verteilungsfunktion für die Teilchengeschwindigkeiten

## Maxwell-Boltzmann-Verteilung

Verteilungskurve für Stickstoff bei 300 K  
und bei 600 K

wahrscheinlichste Geschwindigkeit:

$$v_{max} = \sqrt{\frac{2k_B T}{m}}$$

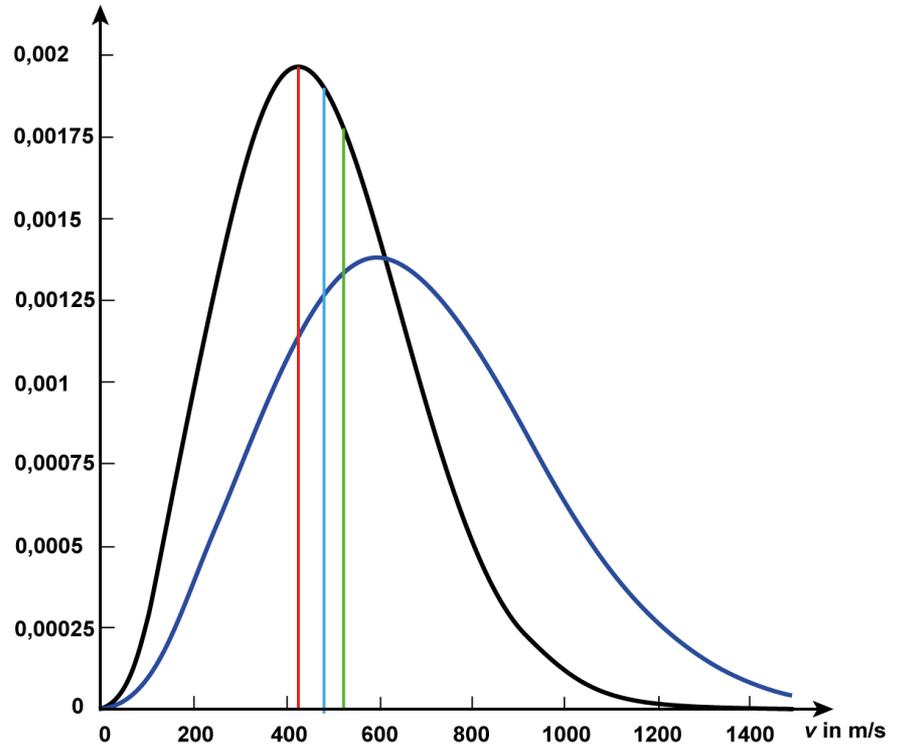
mittlere Geschwindigkeit:

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}}$$

mittleres Geschwindigkeitsquadrat:

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3k_B T}{m}}$$

Wahrscheinlichkeit pro Geschwindigkeitsintervall in s/m



### Abführen "schneller Teilchen" - Verdunstungskälte



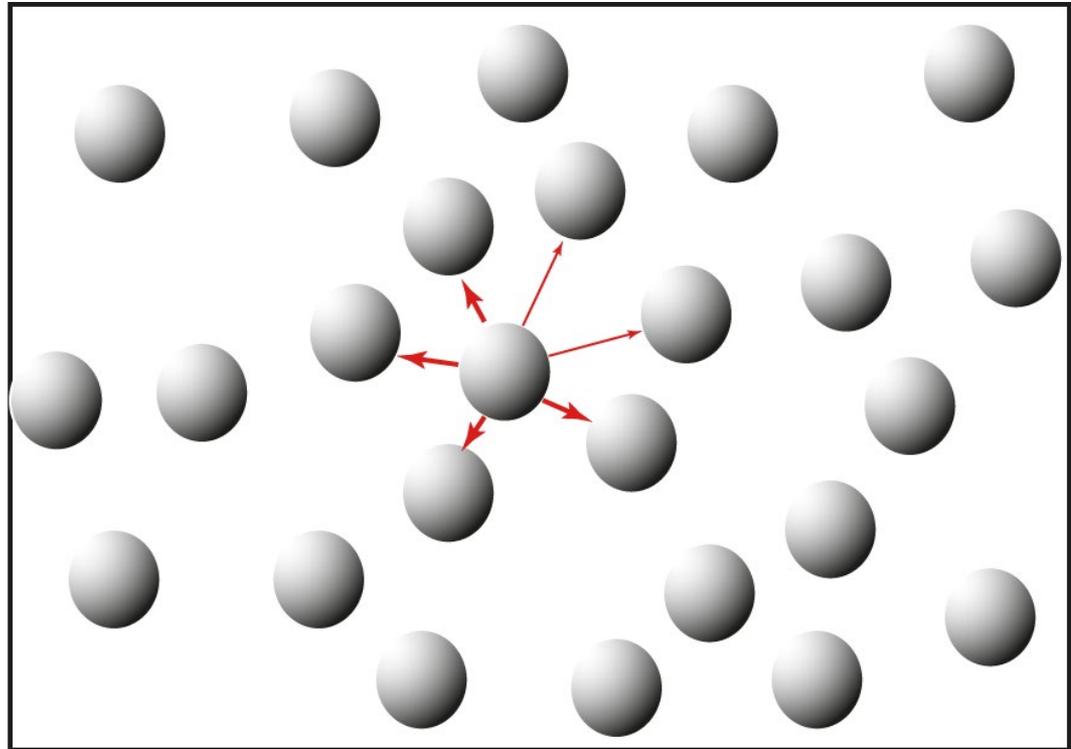
[Link zum Experiment:](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_W_Video/2-2-Verdunstungskaelte-Vogel-K-1.m4v)

[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_W\\_Video/2-2-Verdunstungskaelte-Vogel-K-1.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_W_Video/2-2-Verdunstungskaelte-Vogel-K-1.m4v)



### 2.3 Reale Gase, Van-der-Waals-Gleichung

### Reale Gase



Berücksichtigt werden müssen:

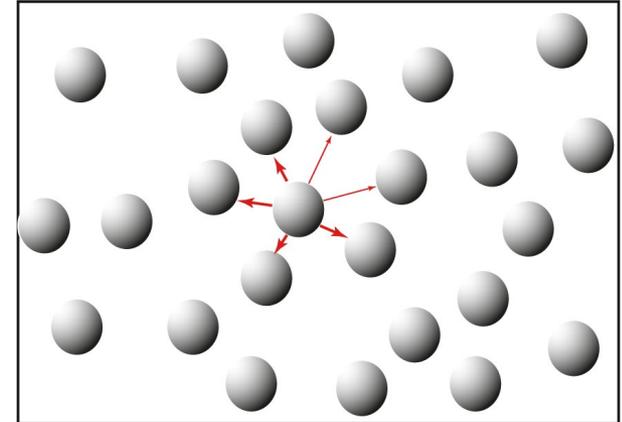
- Teilchenvolumen
- Anziehende Kräfte zwischen den Teilchen



## Reale Gase – Van-der-Waals-Gleichung



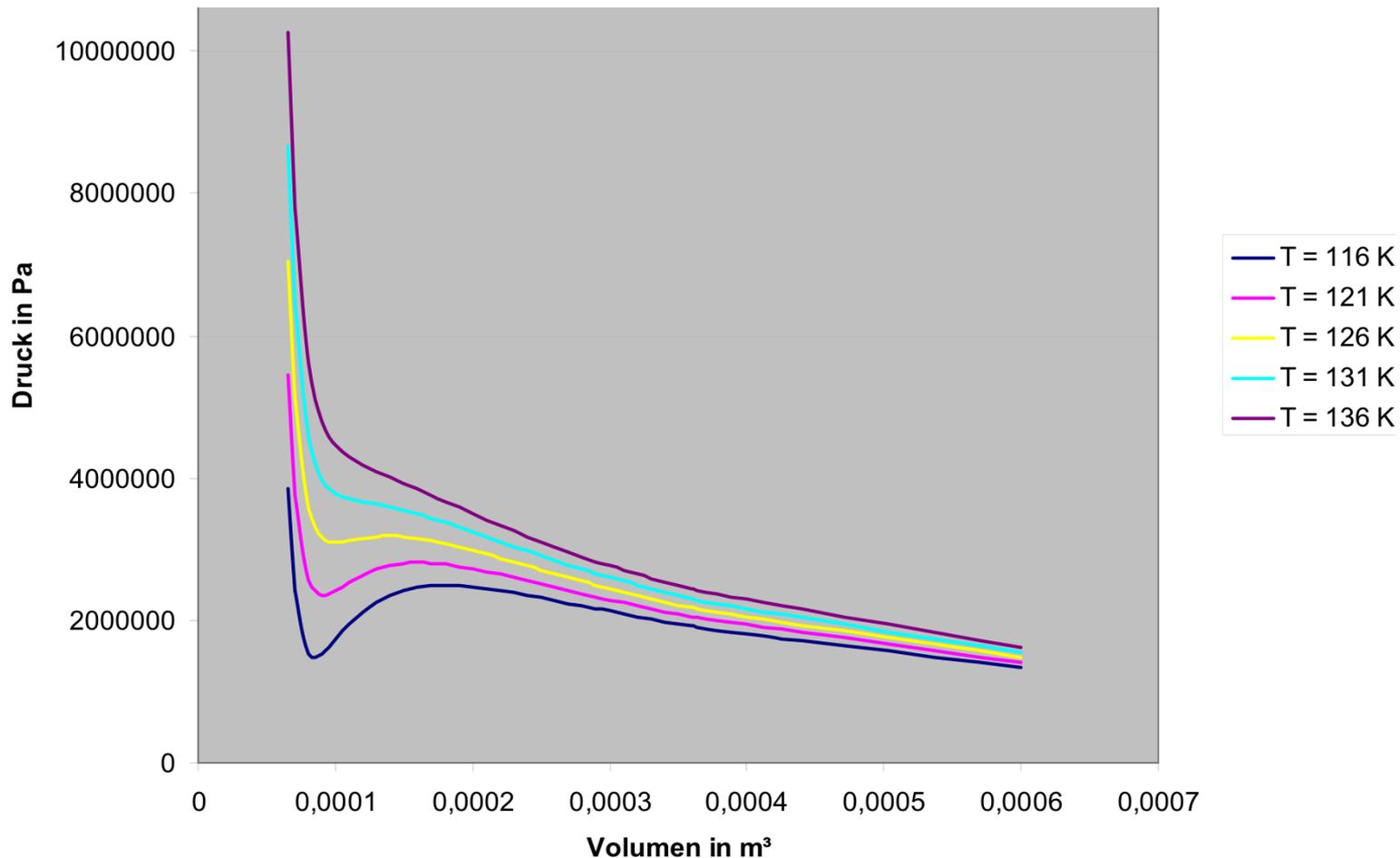
$$(p + \frac{a}{V^2}) \cdot (V - b) = n R T$$





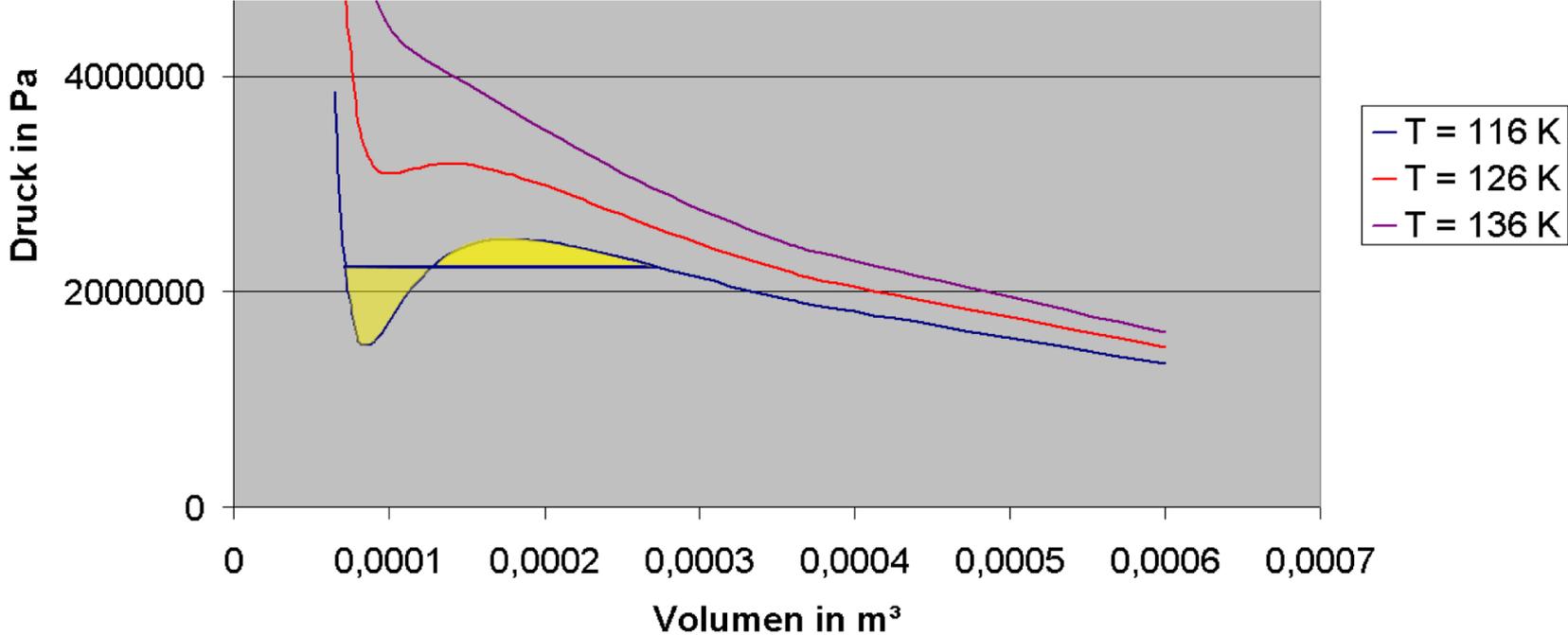
## Reale Gase – Van-der-Waals-Gleichung

$$\left(p + \frac{a}{V^2}n\right) \cdot (V - bn) = nRT$$



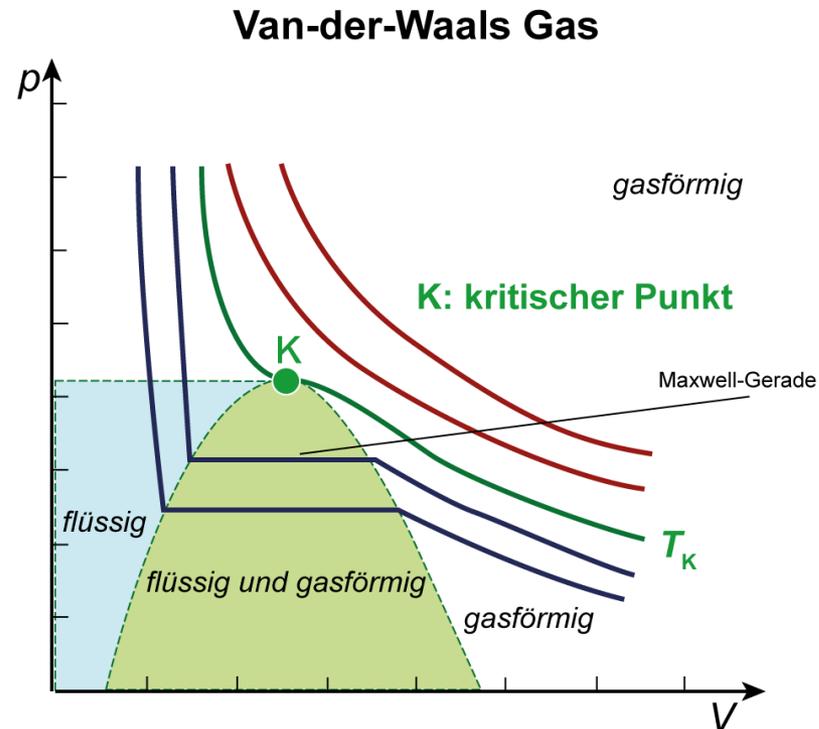
## Reale Gase – Van-der-Waals-Gleichung

$$\left(p + \frac{a}{V^2}n\right) \cdot (V - bn) = nRT$$



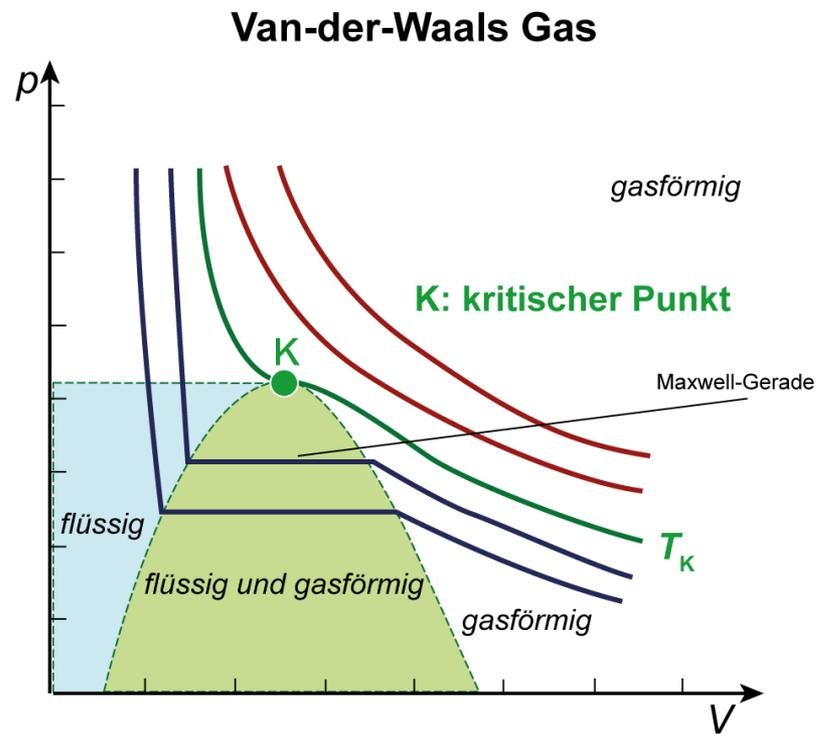
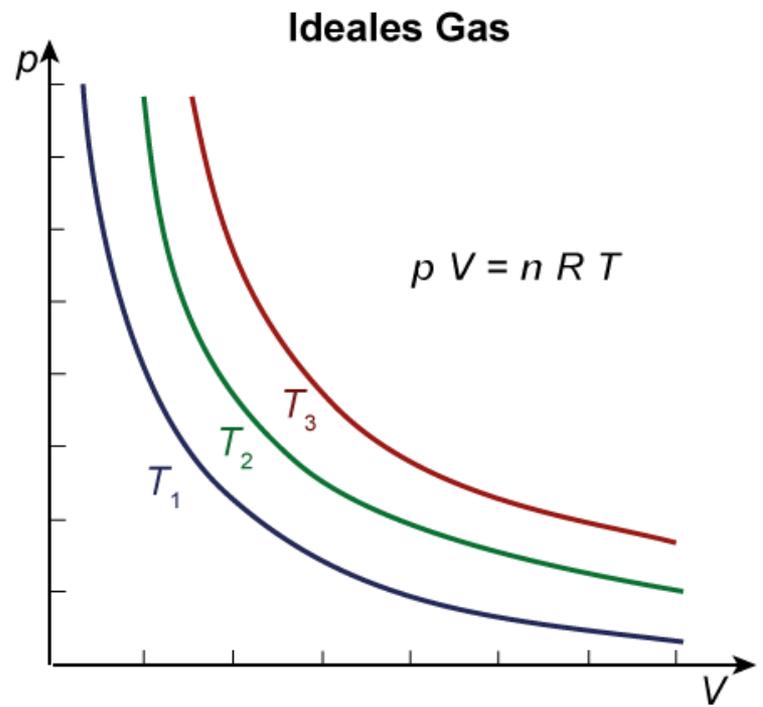


## Reale Gase – Van-der-Waals-Gleichung



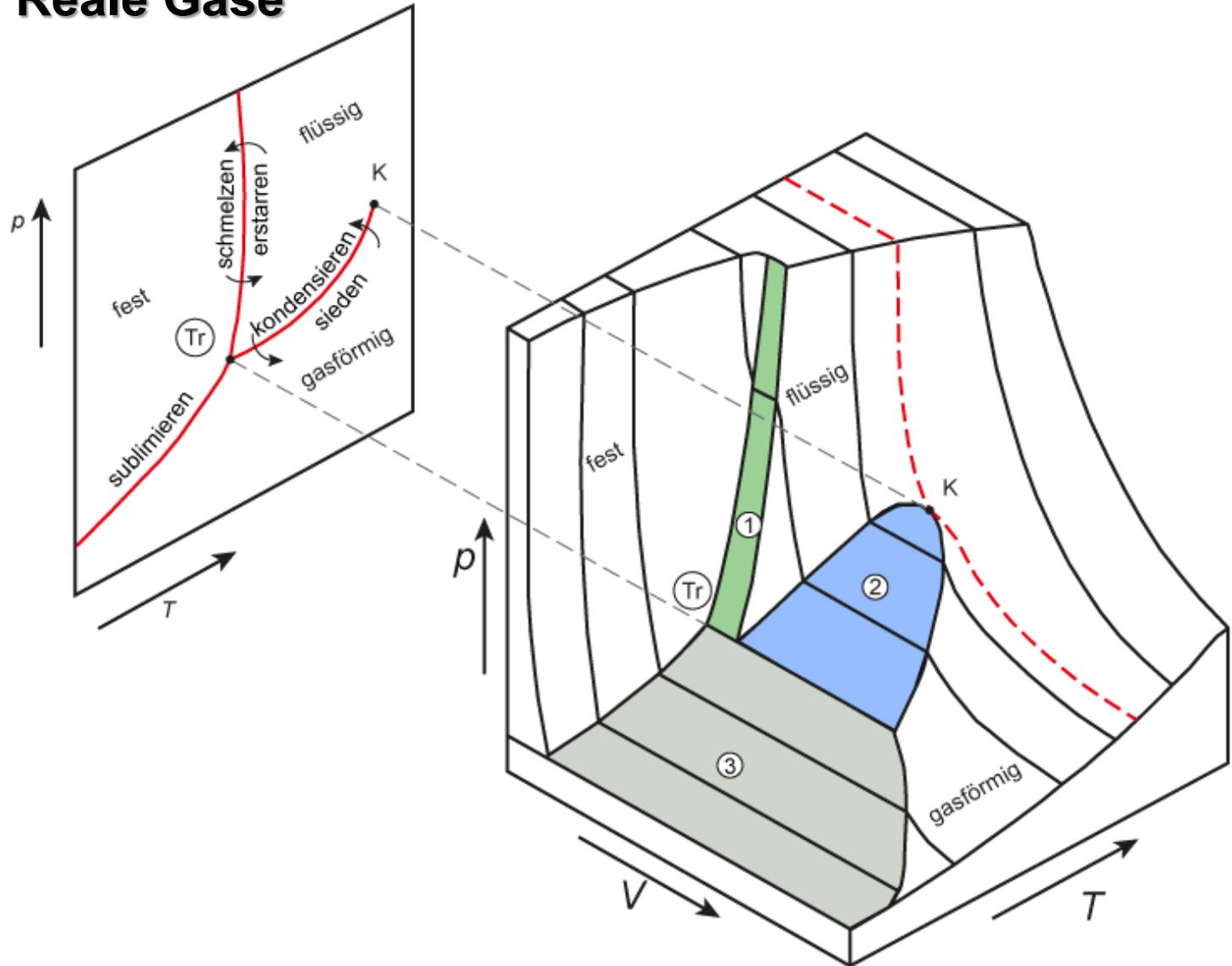
$$\left(p + \frac{a}{V^2}n\right) \cdot (V - bn) = n R T$$

## Reale Gase – Van-der-Waals-Gleichung

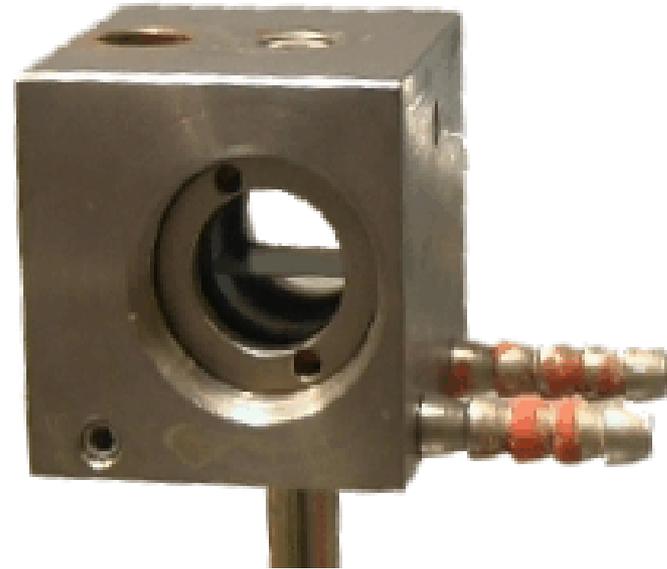


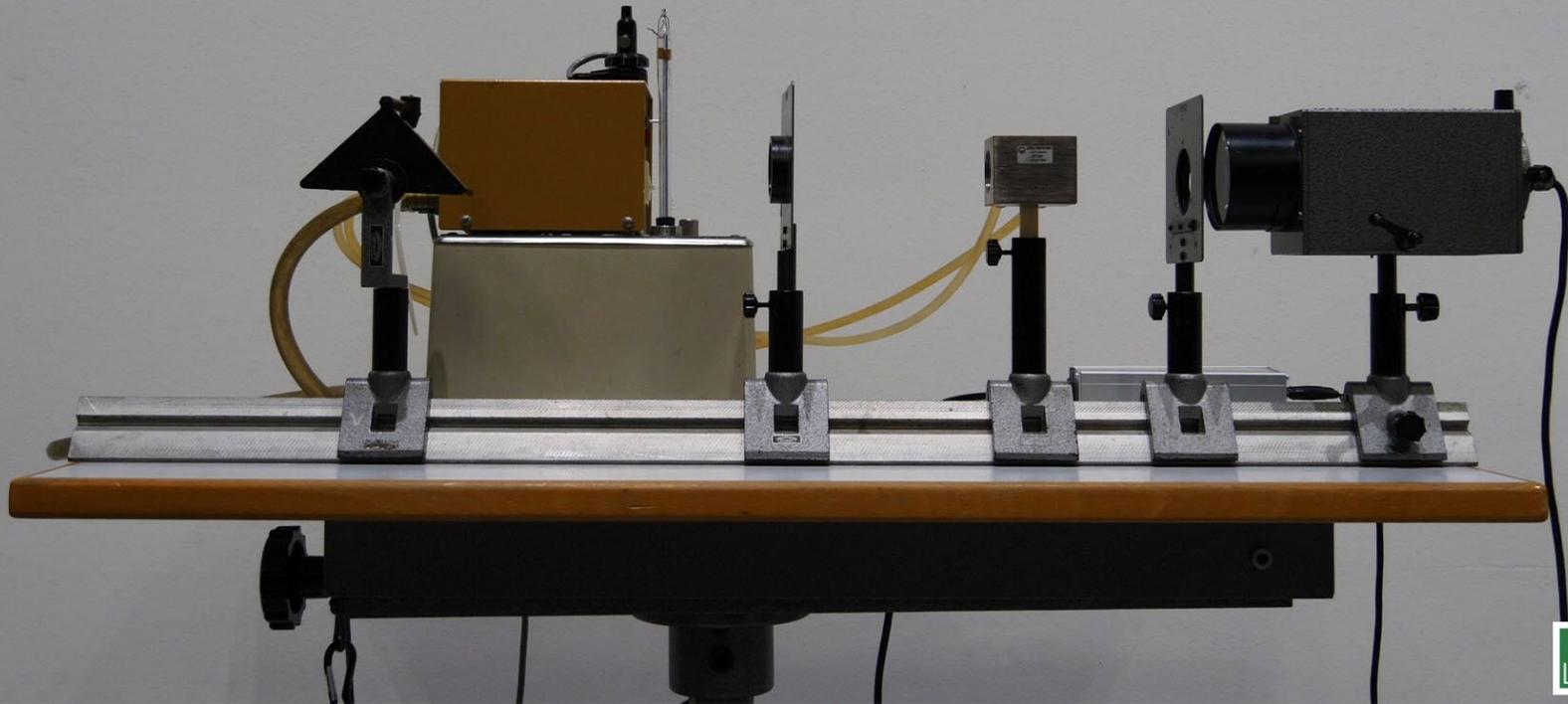
$$\left( p + \frac{a}{V^2} n \right) \cdot (V - bn) = n R T$$

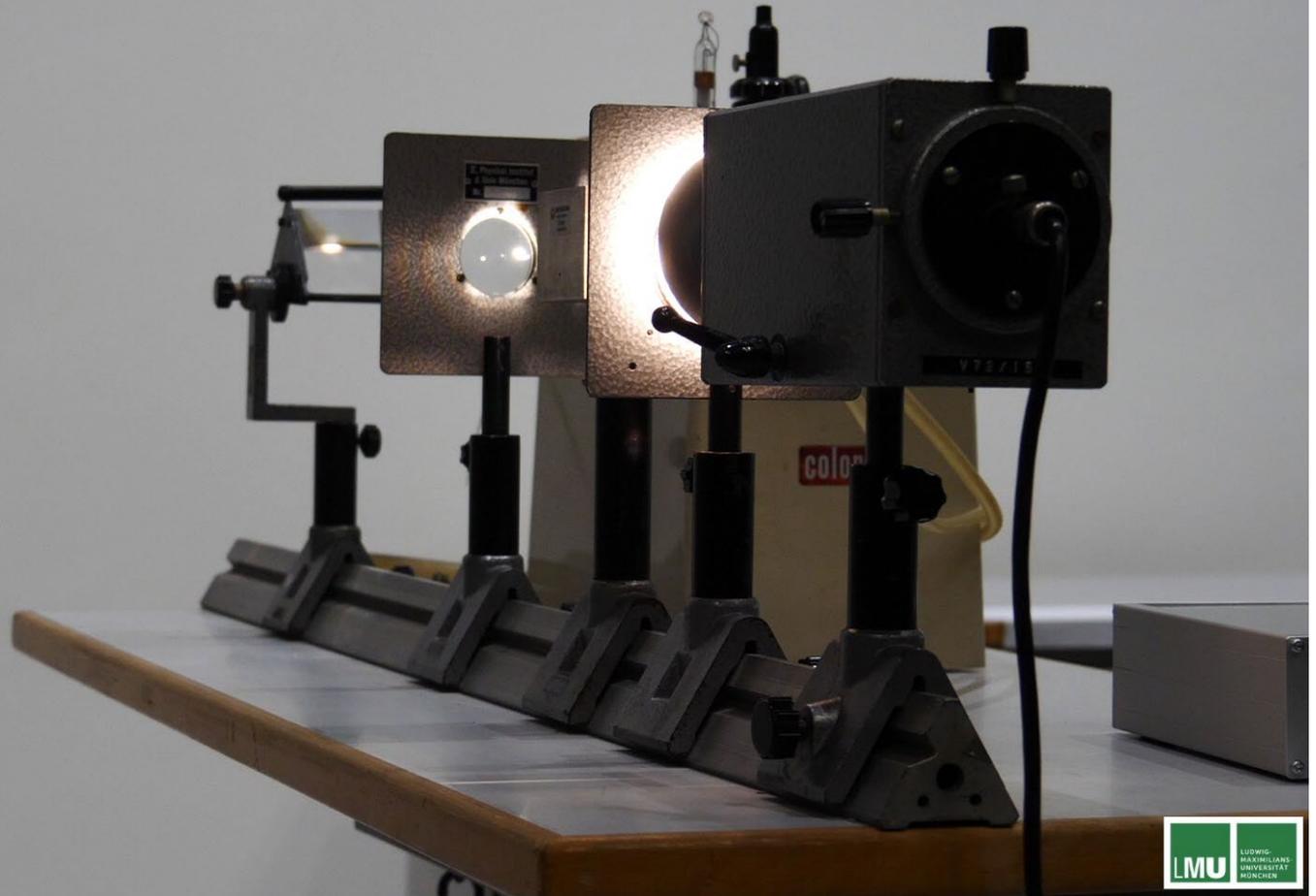
## Reale Gase



Film: Opaleszenz







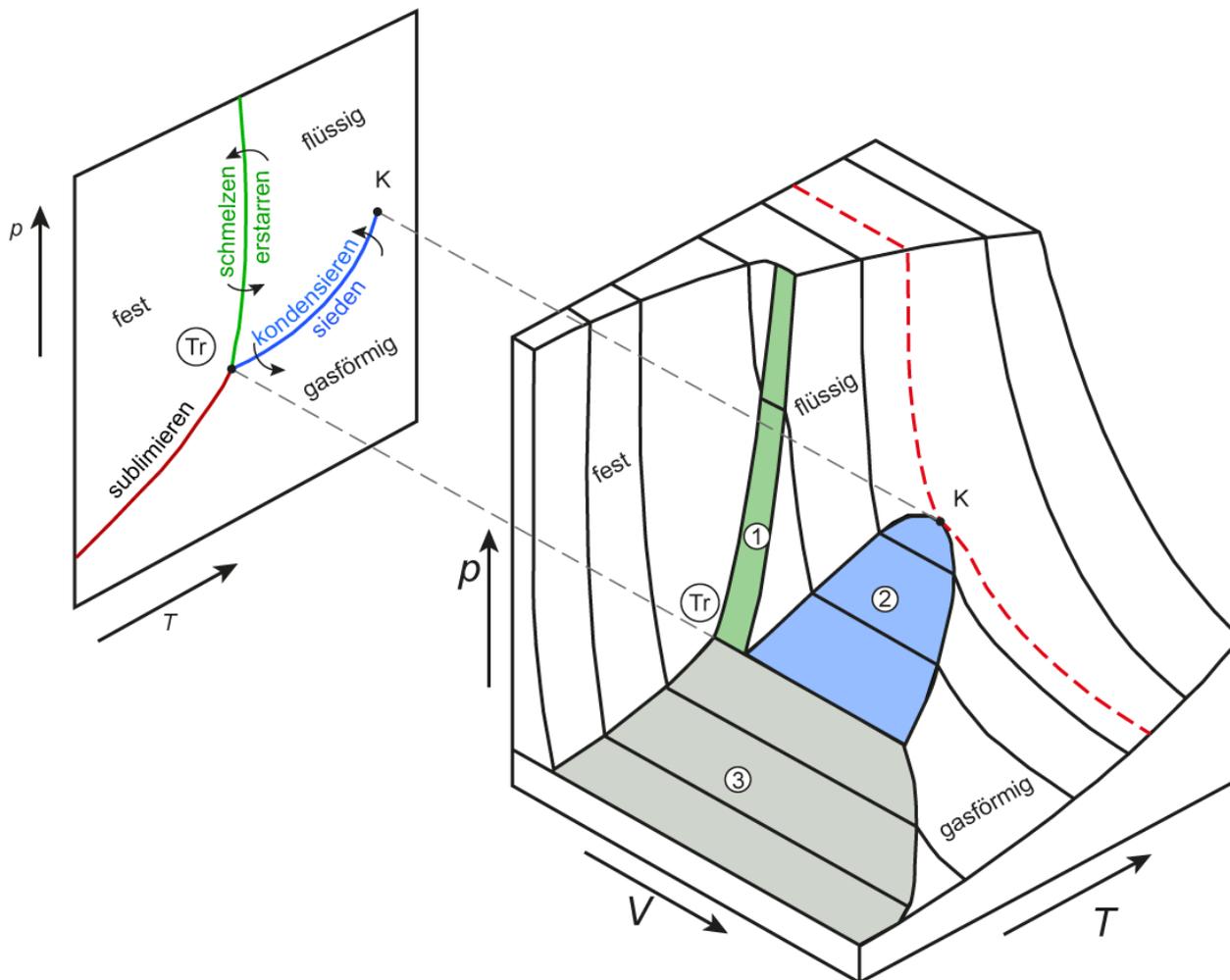
## 2 Molekulare Deutung der Temperatur, und kinetische Gastheorie



[Link zum Experiment:](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_W_Video/2-3-Opaleszenz--R02.m4v)

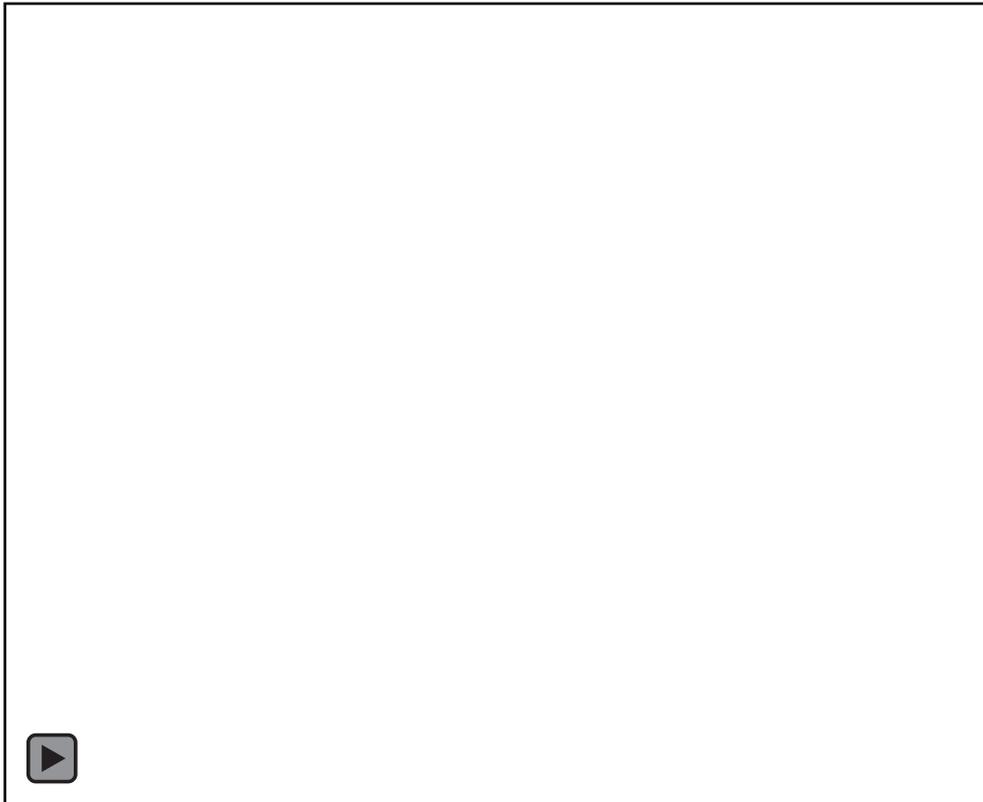
[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_W\\_Video/2-3-Opaleszenz--R02.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_W_Video/2-3-Opaleszenz--R02.m4v)

## Phasenübergänge – Druck & Sieden





### Phasenübergänge – Druck & Sieden

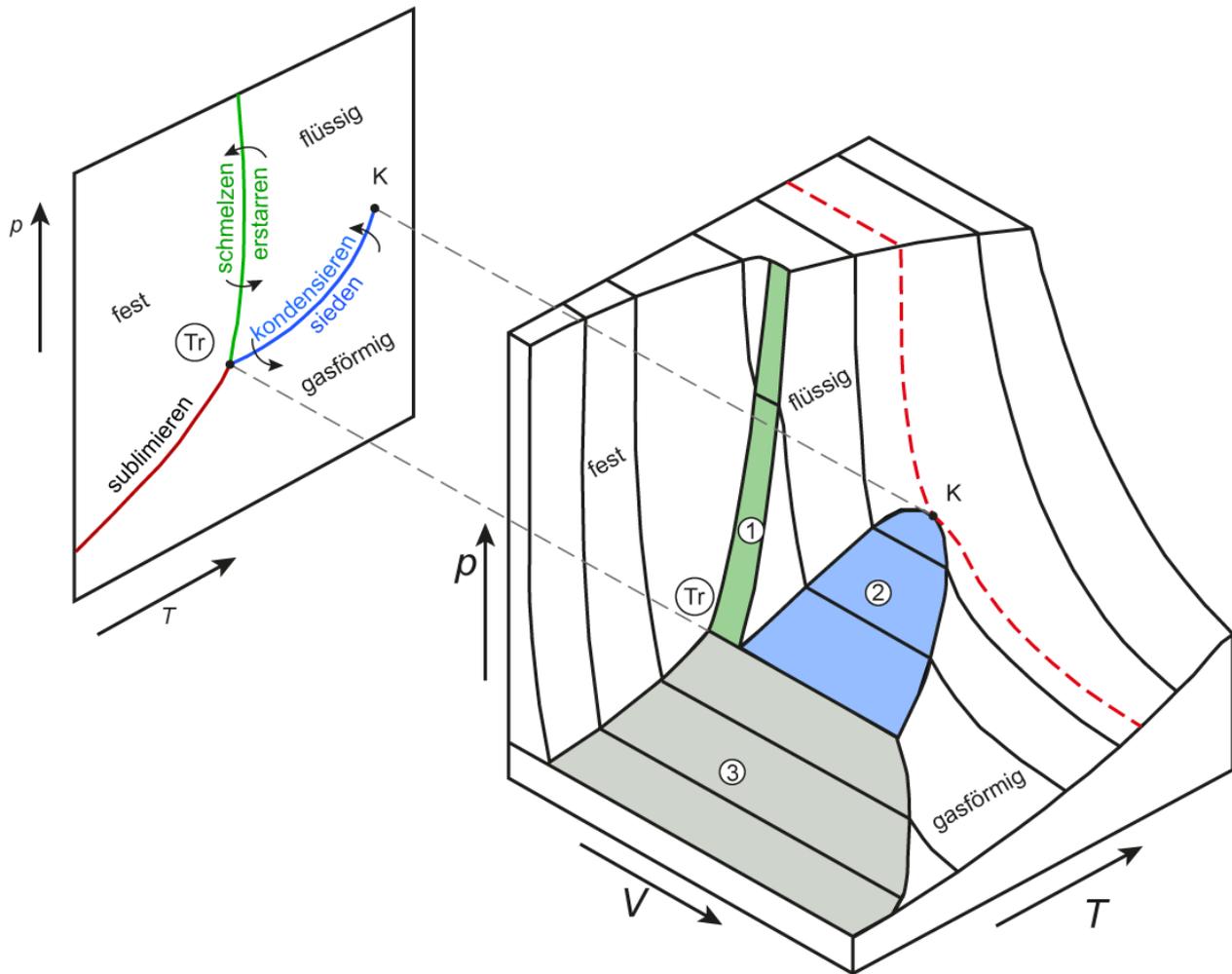


[Link zum Experiment:](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_W_Video/2-3-V-Druck_Sieden--R04-1.m4v)

[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_W\\_Video/2-3-V-Druck\\_Sieden--R04-1.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_W_Video/2-3-V-Druck_Sieden--R04-1.m4v)

# 2 Molekulare Deutung der Temperatur, und kinetische Gastheorie

## Phasenübergänge – Druck & Schmelzen





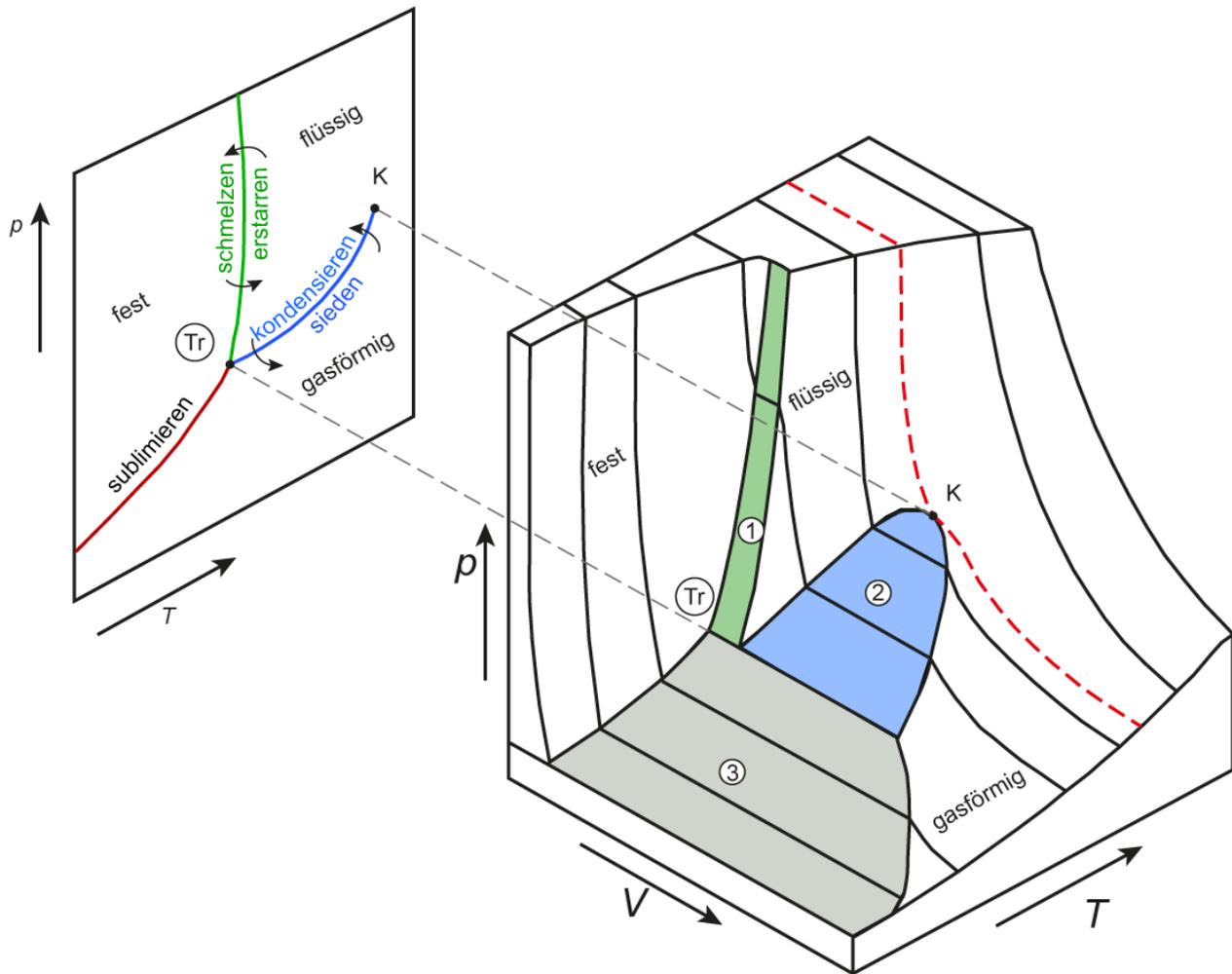
# Phasenübergänge – Anomalie von Wasser ! - Druck & Schmelzen



[Link zum Experiment:](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_W_Video/2-3-V-Druck-Eis--03-1.m4v)

[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_W\\_Video/2-3-V-Druck-Eis--03-1.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_W_Video/2-3-V-Druck-Eis--03-1.m4v)

## Phasenübergänge – Druck & Schmelzen



## Temperatur & Volumen

