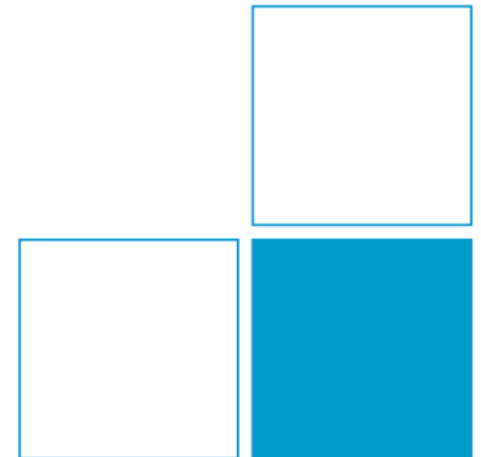


# Implementierung des revidierten Internationalen Einheitensystems

**Uwe Siegner**

**Physikalisch-Technische Bundesanstalt**

303. PTB-Seminar  
17. Mai 2017



# Übersicht

- Das heutige Internationale Einheitensystem (SI):  
Nutzen, Probleme und Motivation für die Revision
- Besonderheit der elektrischen Metrologie:  
konventionelle Einheiten
- Das revidierte SI
- Implementierung des revidierten SI
- Zeitplan und Zusammenfassung

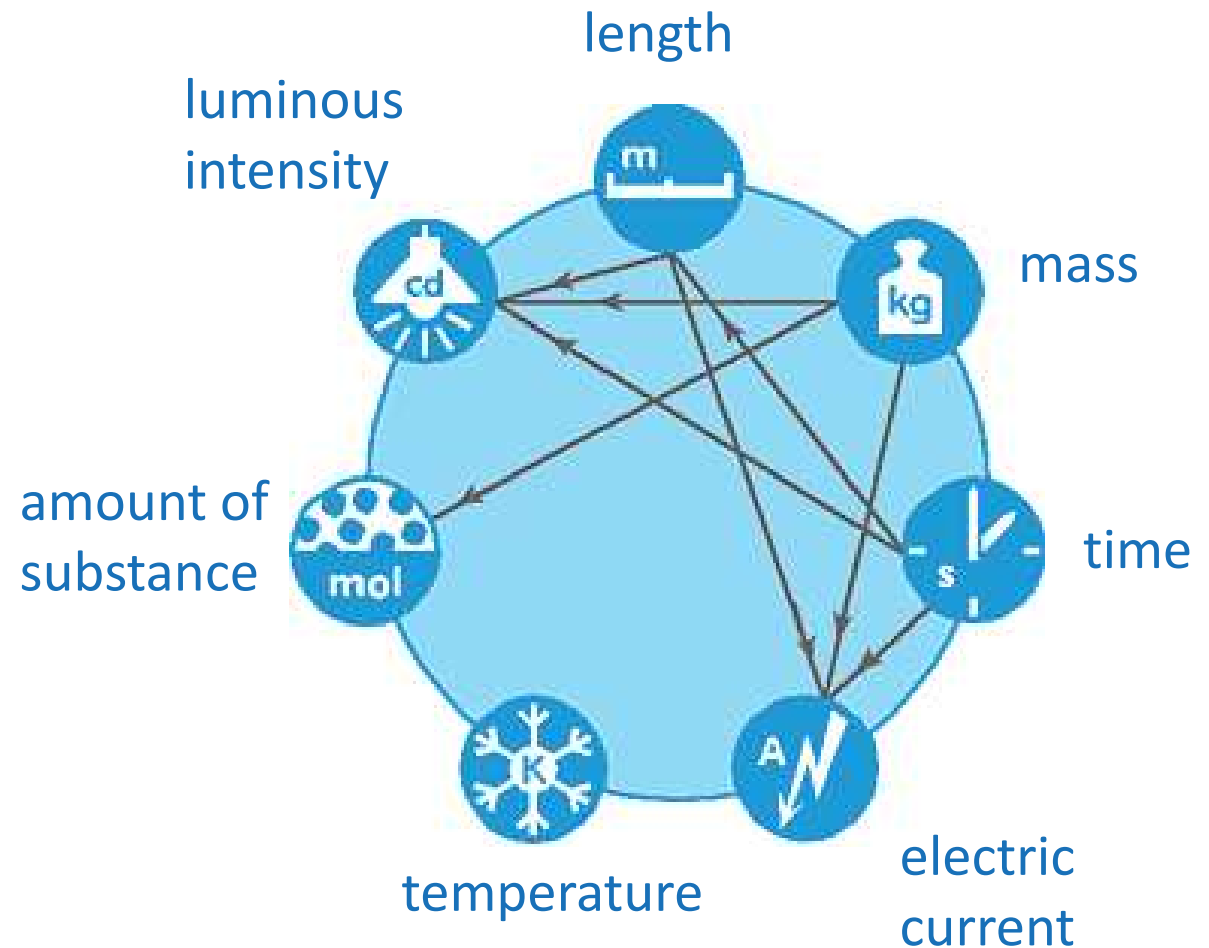
# The present International System of Units (SI)

## ■ Meter Convention:

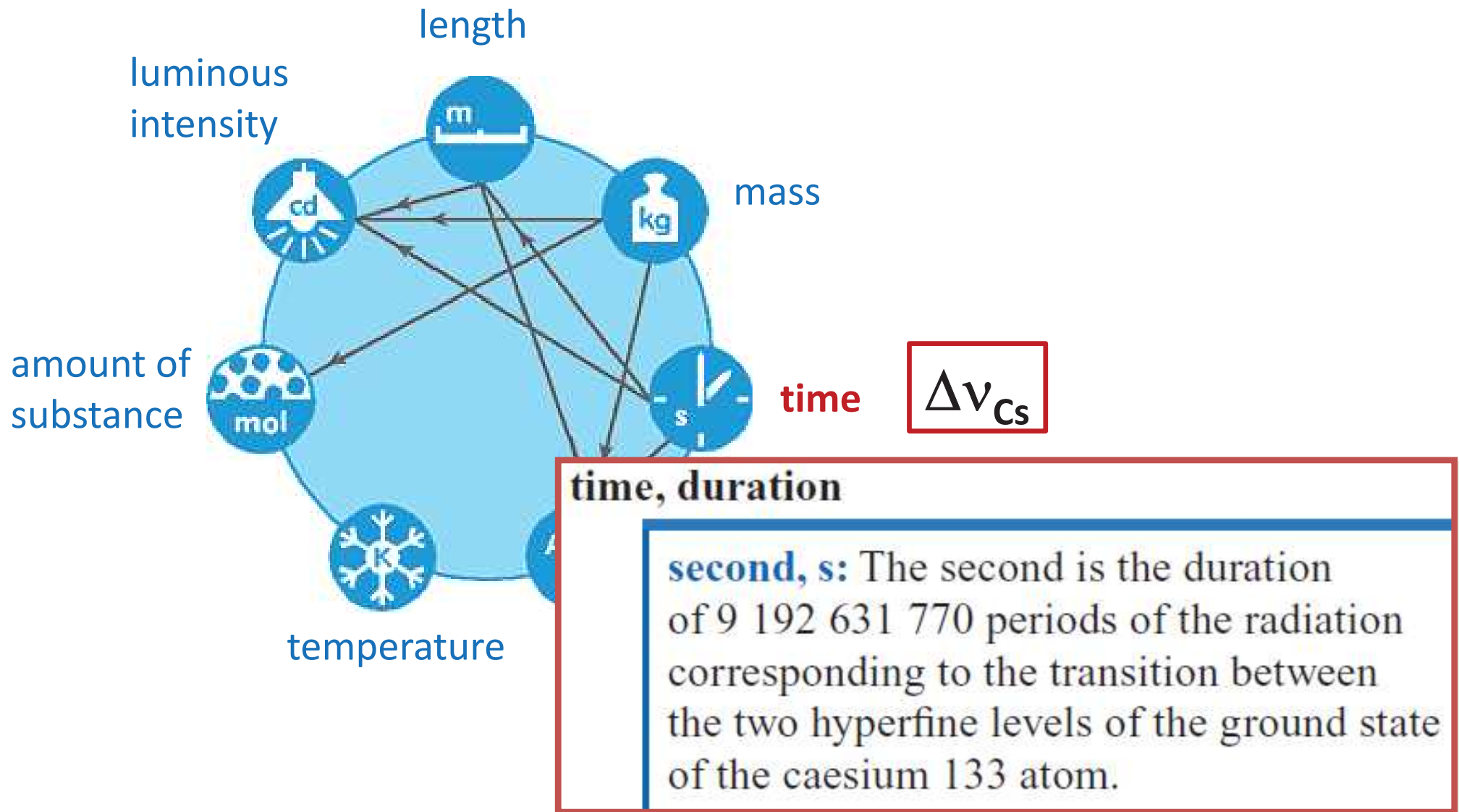
- Treaty of 1875
- Today about 100 member/ass. states
- 97 % of the world economy

## ■ Present SI

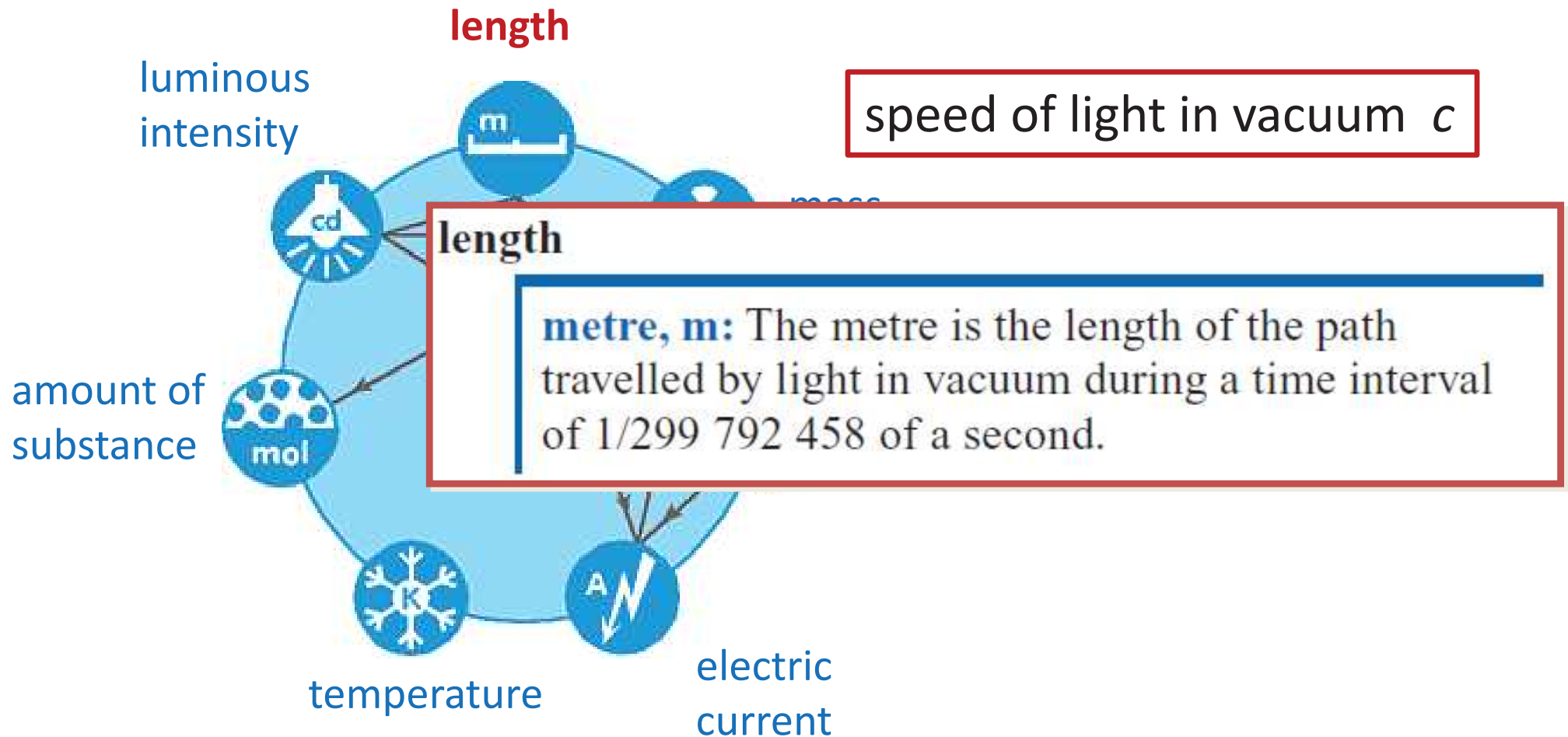
- 7 base units
- 22 derived units



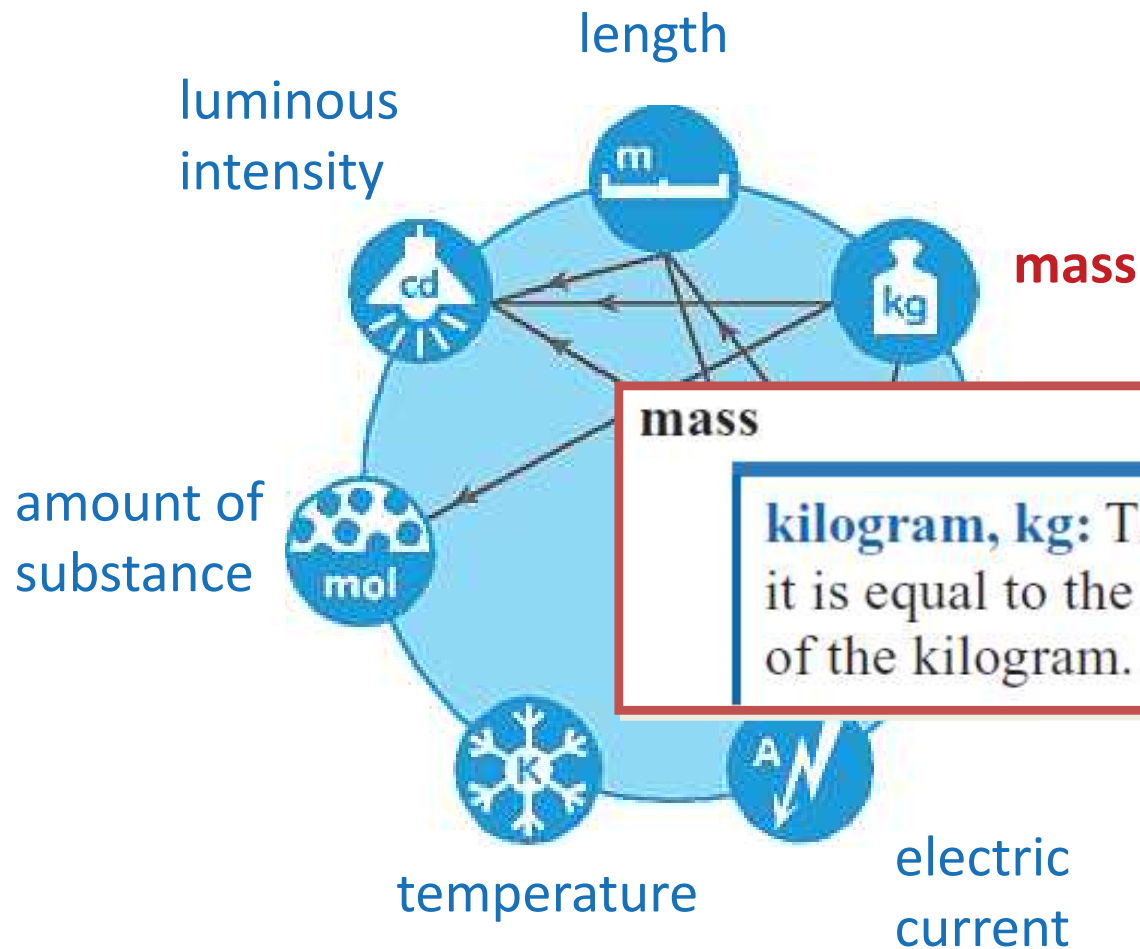
# The present International System of Units (SI)



# The present International System of Units (SI)



# The present International System of Units (SI)

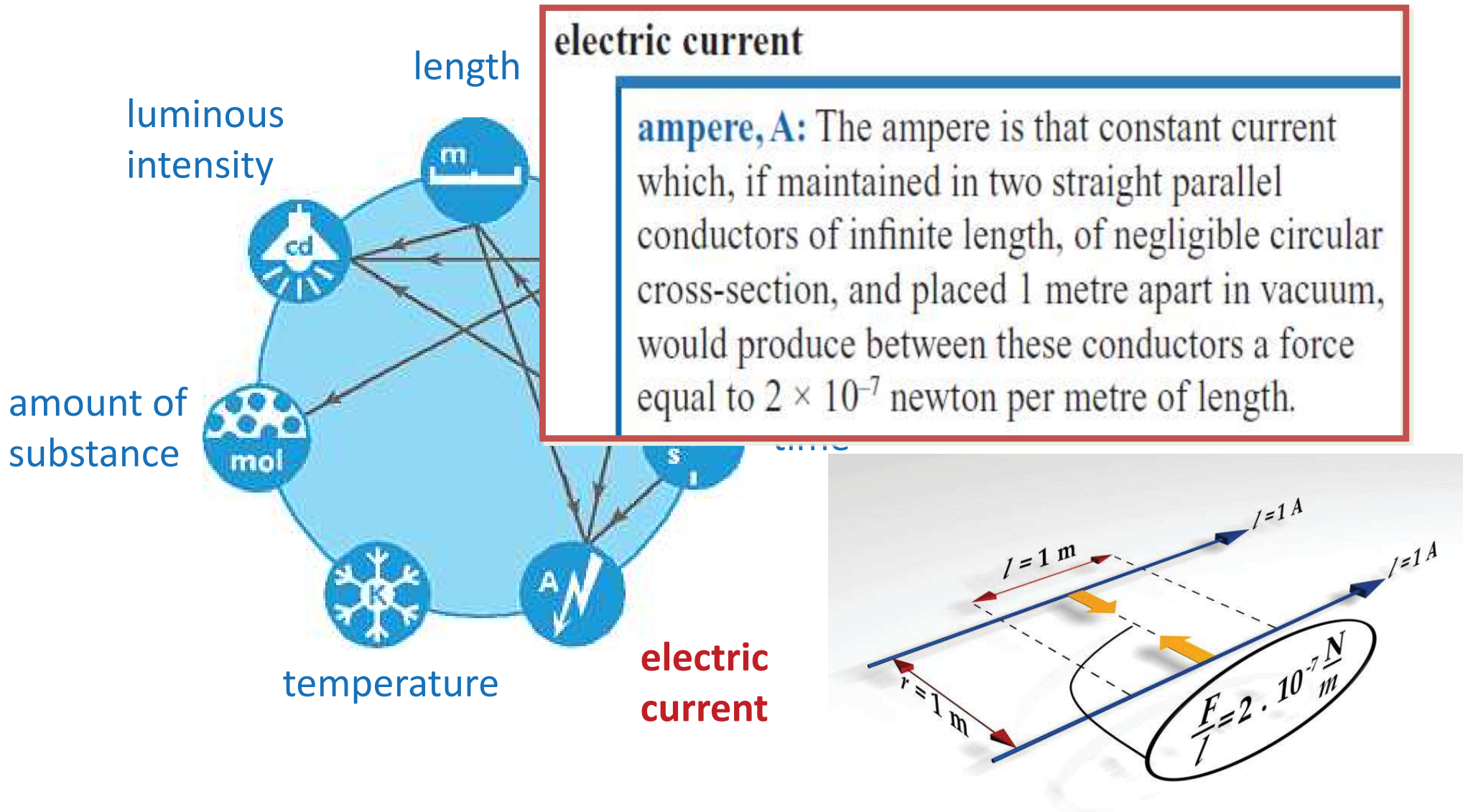


IKP

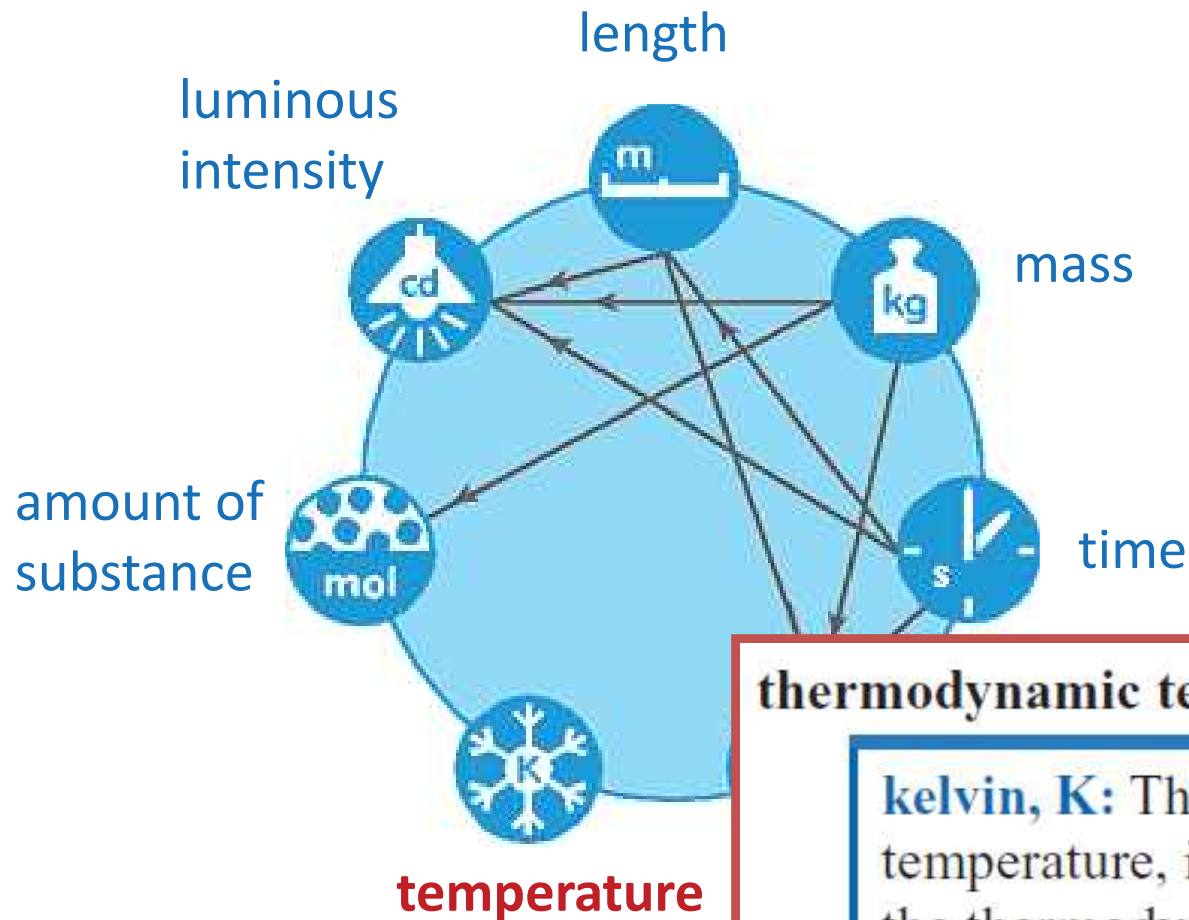
**mass**

**kilogram, kg:** The kilogram is the unit of mass; it is equal to the mass of the international prototype of the kilogram.

# The present International System of Units (SI)



# The present International System of Units (SI)



Triple point of water



## thermodynamic temperature

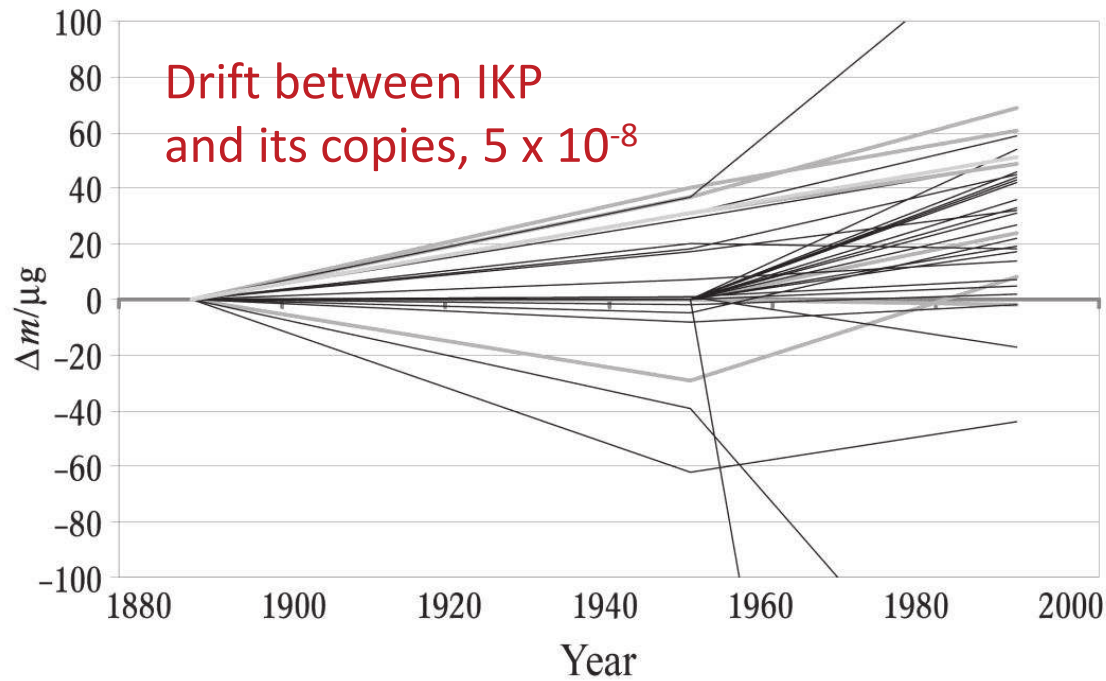
**kelvin, K:** The kelvin, unit of thermodynamic temperature, is the fraction  $1/273.16$  of the thermodynamic temperature of the triple point of water.



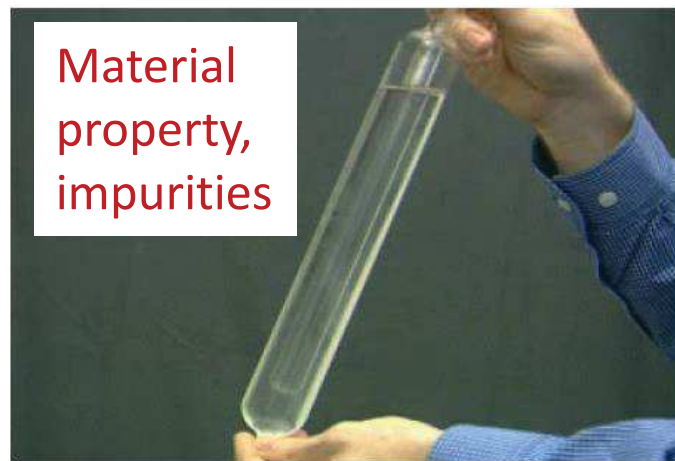
# Shortcomings of the present SI



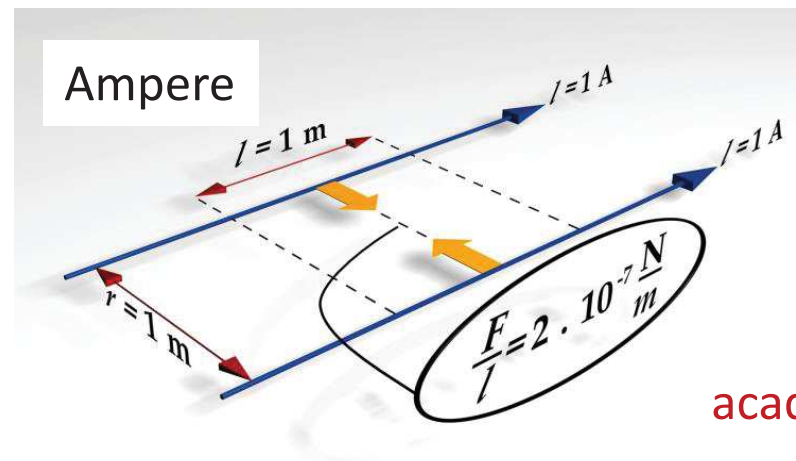
International Kilogram Prototype



Kelvin: Triple point of water



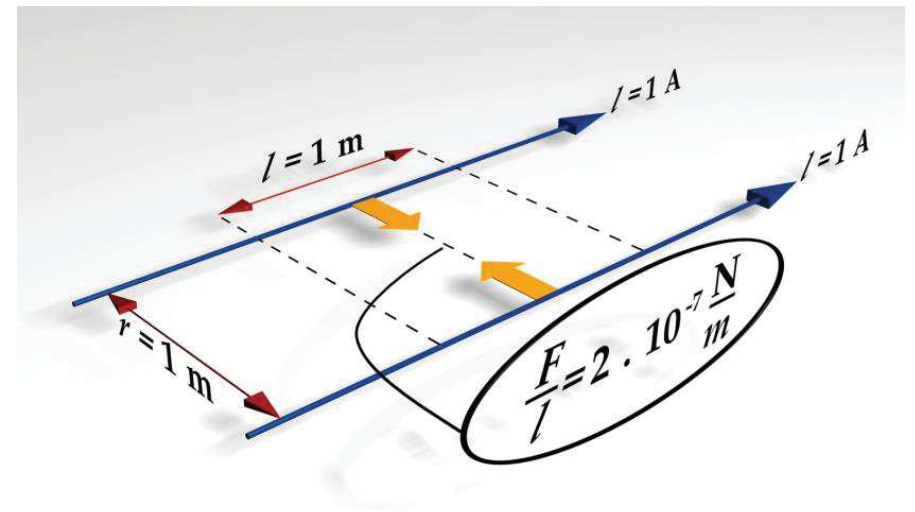
Material property, impurities



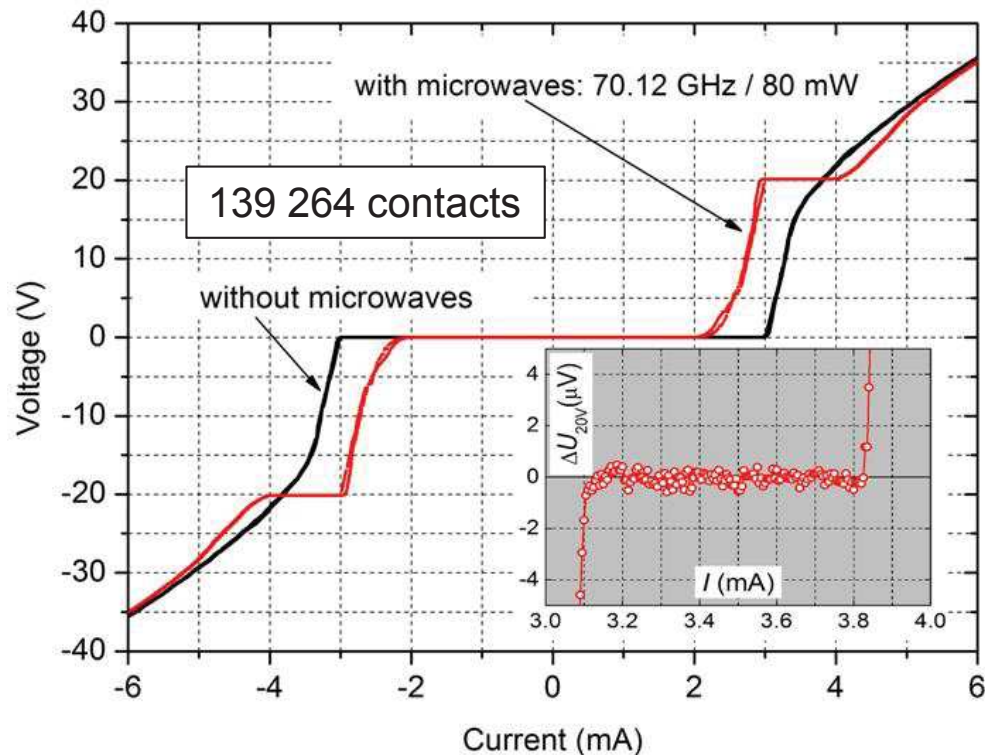
academic

# The ampere definition of the present SI

- SI realization of the ampere: admissible physics restricted to classical electrodynamics
- Quantum physics is excluded: present definition is a barrier to innovation
- Uncertainty of the SI realization only parts in  $10^7$
- Conventional units are disseminated and used in practice

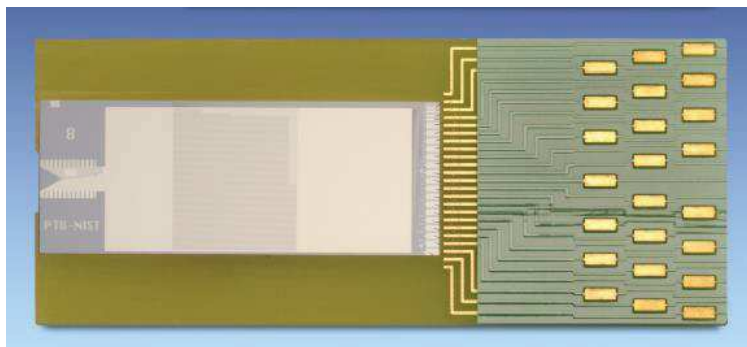


# Josephson effect, $K_{J-90}$ , conventional volt



$$U = \frac{nf}{K_J}$$

$$K_J = \frac{2e}{h} \quad \text{Josephson constant}$$



- Agreed-upon Josephson constant  $K_{J-90} = 483\,597.9 \text{ GHz/V}$
- → conventional volt
- Reproducibility: parts in  $10^{10}$

# Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 2 zum Kalibrierschein vom , Kalibrierzeichen «Kalibriert»

Page 2 of calibration certificate of , calibration mark «Kalibriert»

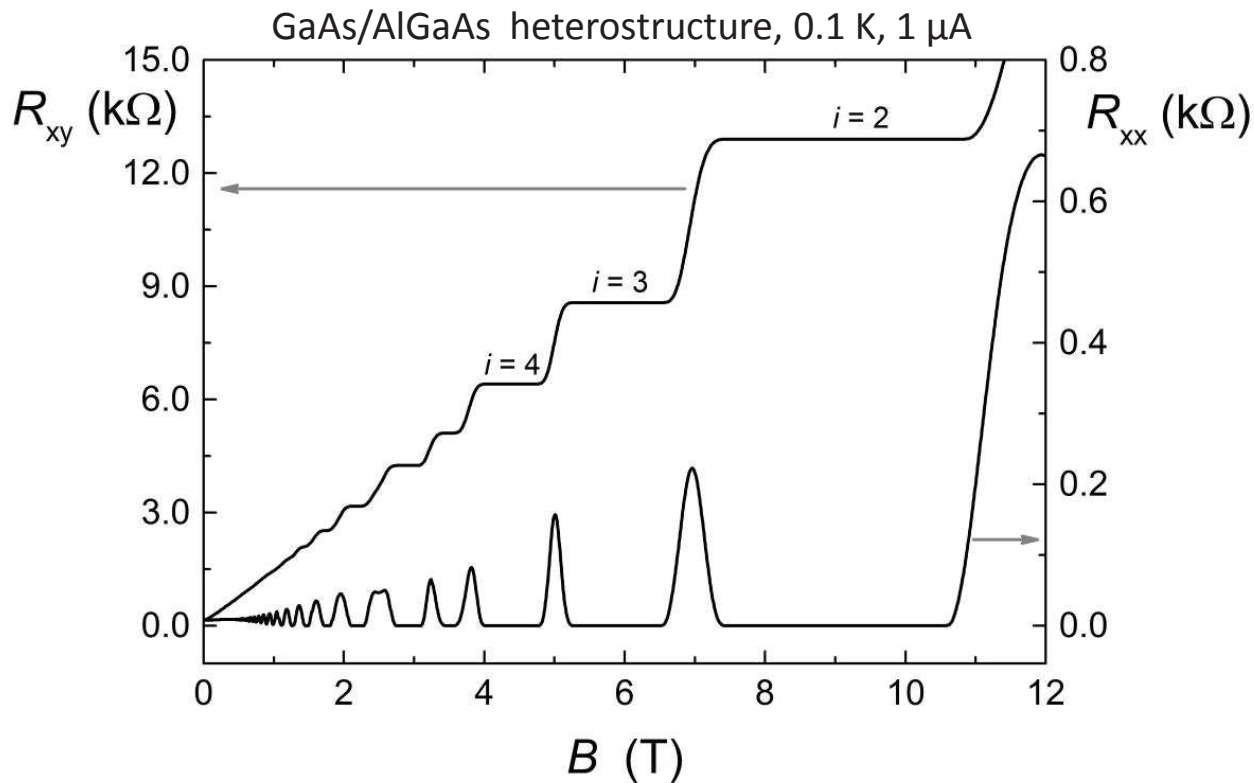
... durch Umpolen eliminiert.

Den angegebenen Spannungswerten liegt der international vereinbarte Wert für die Josephson-Konstante,  $K_{J-90}$ , zugrunde.

## 5. Messunsicherheiten

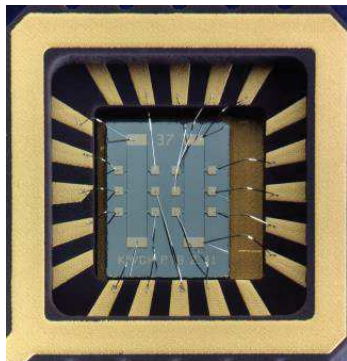
Messgröße	Spannung	Spannung	Spannung	Thermistor	Druck	Feuchte
	1 V	1,018 V	10 V			
Messunsicherheit	$2 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$	1 $\Omega$	2 hPa	2 %

# Quantum Hall effect, $R_{K-90}$ , conventional ohm



$$R_{xy} = \frac{h}{ie^2} = \frac{R_K}{i}$$

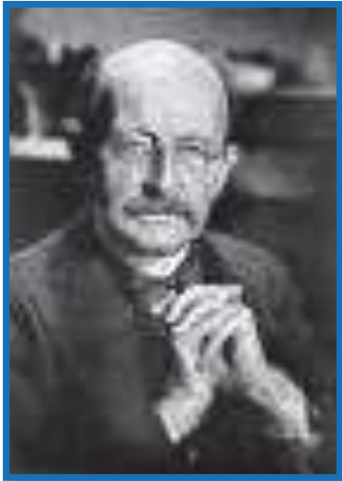
$R_K$  von Klitzing constant



- Agreed-upon von Klitzing constant  $R_{K-90} = 25\,812.807 \, \Omega$
- $\rightarrow$  conventional ohm
- Reproducibility: parts in  $10^{10}$

# Revised SI: Goals

- Universal system not relying on artefacts and being valid everywhere
- Improved long-time stability
- Open to innovation
- Seamless transition from the present to the revised SI



**...mit Zuhilfenahme der...Constanten  
...Einheiten...aufstellen ...  
für alle Zeiten und... Culturen**

***4. Ueber irreversible Strahlungsvorgänge;  
von Max Planck.***

Dem gegenüber dürfte es nicht ohne Interesse sein zu bemerken, dass mit Zuhilfenahme der beiden in dem Ausdruck (41) der Strahlungsentropie auftretenden Constanten  $a$  und  $b$  die Möglichkeit gegeben ist, Einheiten für Länge, Masse, Zeit und Temperatur aufzustellen, welche, unabhängig von speciellen Körpern oder Substanzen, ihre Bedeutung für alle Zeiten und für alle, auch ausserirdische und aussermenschliche Culturen notwendig behalten und welche daher als „natürliche Maasseinheiten“ bezeichnet werden können.

# Revised International System of Units

The International System of Units, the SI, is the system of units in which

- the unperturbed ground state hyperfine transition frequency of the caesium 133 atom  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$  is 9 192 631 770 Hz,
- the speed of light in vacuum  $c$  is 299 792 458 m/s,
- the Planck constant  $h$  is  $6.626\,070\,040 \times 10^{-34}$  J s,
- the elementary charge  $e$  is  $1.602\,176\,620\,8 \times 10^{-19}$  C,
- the Boltzmann constant  $k$  is  $1.380\,648\,52 \times 10^{-23}$  J/K,
- the Avogadro constant  $N_{\text{A}}$  is  $6.022\,140\,857 \times 10^{23}$  mol<sup>-1</sup>,
- the luminous efficacy  $K_{\text{cd}}$  of monochromatic radiation of frequency  $540 \times 10^{12}$  hertz is 683 lm/W.

Draft of the  
9th SI Brochure,  
10 November 2016

- Seven “defining constants” with fixed numerical value in SI units
  - Experimental links exist between defining constants and units
  - Defining constants known with small uncertainty



# Relation between units and constants

## ■ Present SI

- Existence of constant quantity  $Q$ ,  
e.g., elementary charge or Planck constant
- Known SI unit  $[Q]$
- $\rightarrow$  numerical value  $\{q\}$  of the constant quantity:  $\{q\} = Q / [Q]$

## ■ Revised SI

- Existence of constant quantity  $Q$
- Defined numerical value  $\{q\}$  of the constant quantity  $Q$   
in SI units
- $\rightarrow$  SI unit  $[Q]$ :  $[Q] = Q / \{q\}$

# Base units and defining constants

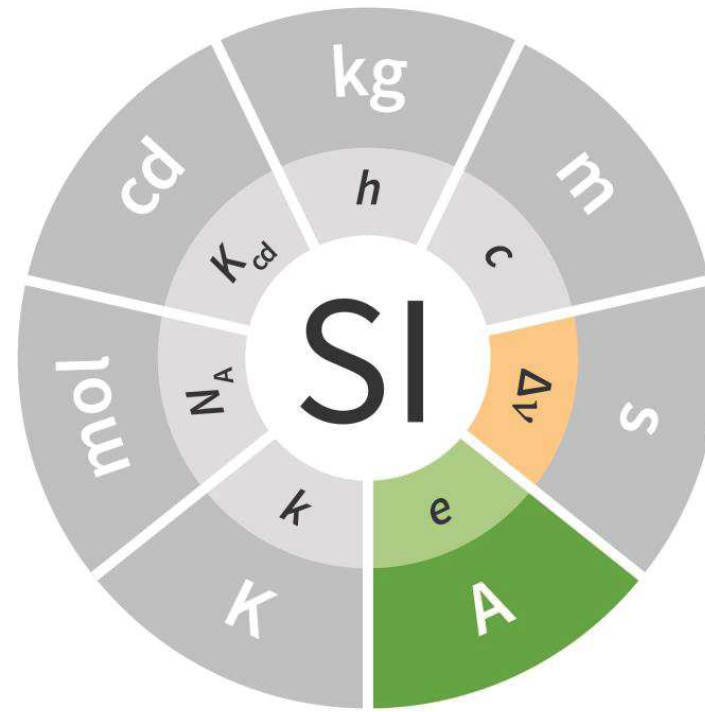
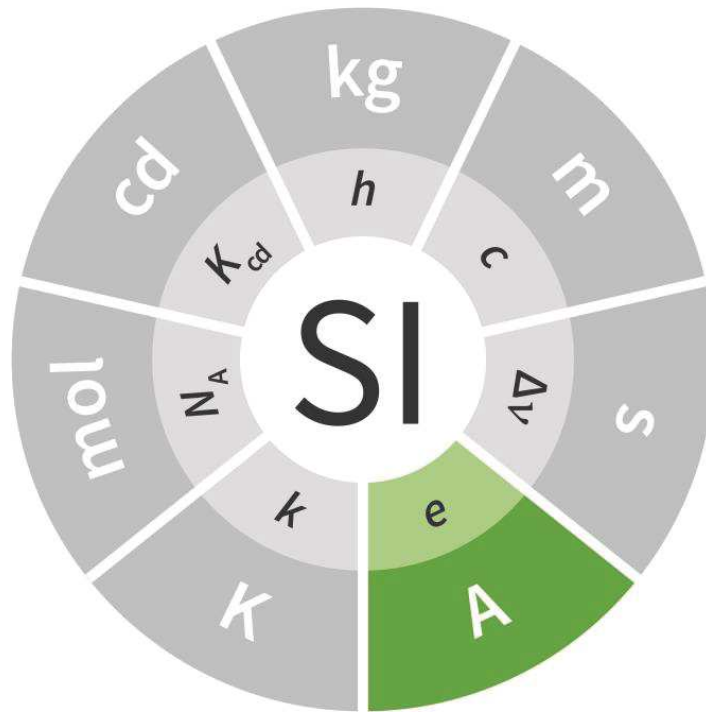
- No conceptual difference between base units and derived units
- Present SI base units are kept for historical continuity
- Base units (and derived units) are linked to the defining constants



# The ampere in the revised SI

- The ampere, symbol A, is the SI unit of electric current. It is defined by taking the fixed numerical value of the elementary charge  $e$  to be  $1.602\,176\,620\,8 \times 10^{-19}$  when expressed in the unit C, which is equal to A s, where the second is defined in terms of  $\Delta\nu_{Cs}$ .

Draft of the 9th SI Brochure, 10 November 2016



# The ampere in the revised SI

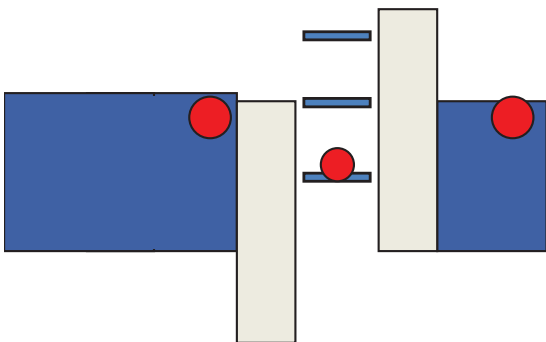
- The ampere, symbol A, is the SI unit of electric current. It is defined by taking the fixed numerical value of the elementary charge  $e$  to be  $1.602\,176\,620\,8 \times 10^{-19}$  when expressed in the unit C, which is equal to A s, where the second is defined in terms of  $\Delta \nu_{Cs}$ .

Draft of the 9th SI Brochure, 10 November 2016

**Textbook definition: current = charge/time**

$$1 \text{ A} = \left( \frac{e}{1.602\,176\,620\,8 \times 10^{-19}} \right) \text{ s}^{-1} \quad I = ef = e/T \quad \begin{array}{l} f \text{ frequency} \\ T \text{ time} \end{array}$$

**Experimental realization: single-electron transport**



# Übersicht

- Das heutige Internationale Einheitensystem (SI):  
Nutzen, Probleme und Motivation für die Revision
- Besonderheit der elektrischen Metrologie:  
konventionelle Einheiten
- Das revidierte SI
- **Implementierung des revidierten SI**
- **Zeitplan und Zusammenfassung**

# Was ändert sich für die elektrische Messtechnik bei der Einführung des revidierten SI

- Elementarladung  $e$  und Planck-Konstante  $h$  haben feste Werte ohne Unsicherheit
- $K_{J-90}$  und  $R_{K-90}$  sind entbehrlich
- $K_J = 2e/h$  ersetzt  $K_{J-90}$ : relative Änderung  $d$  von Spannungswerten ca.  $1 \times 10^{-7}$
- $R_K = h/e^2$  ersetzt  $R_{K-90}$ : relative Änderung  $d$  von Widerstandswerten ca.  $2 \times 10^{-8}$
- Die weitergegebenen elektrischen Einheiten sind wieder im SI

# Was ist zu tun?

- In Textdokumenten (QM-Dokumentation, Kalibrierscheine etc.)  
 $K_{J-90}$  und  $R_{K-90}$  durch  $K_J$  und  $R_K$  ersetzen
- Software aktualisieren:  
Numerische Werte von  $K_J$  und  $R_K$  benutzen anstelle der  
numerischen Werte von  $K_{J-90}$  und  $R_{K-90}$   
  
→ betrifft besonders Hersteller und Nutzer von Josephson-  
Spannungsnormalen und Quanten-Hall-Widerstandsnormalen

# Was ist zu tun?

- Überprüfen ob Rückführung gegeben ist gemäß der **CCEM Guidelines for Implementation of the Revised SI**
  - CCEM: Beratendes Komitee der Meterkonvention für Elektrizität und Magnetismus
  - Guideline Dokument wird z. Z. redaktionell bearbeitet, Inhalt steht fest
  - Ziel: *“maintaining critical measurement traceability while avoiding unnecessary effort”*



# CCEM Guidelines for Implementation of the Revised SI

- $U$ : erweiterte Messunsicherheit ( $k = 2$ )
- $d$ : relative Änderung
  - Spannung:  $d$  etwa  $1 \times 10^{-7}$
  - Widerstand:  $d$  etwa  $2 \times 10^{-8}$
  - Andere Größen:  $d$  berechenbar auf Basis von Spannung, Widerstand
- $2,5 d \leq U$ : kein Handlungsbedarf
  - Durch die Einführung der revidierten SI verringert sich nur die Wahrscheinlichkeit des Vertrauensintervalls von 95% auf 87 %
  - Mehrzahl der Fälle
- $2,5 d > U$ : numerische Korrektur oder Rekalibrierung
  - Quantennormale, andere Normale auf höchstem Niveau

# Zeitplan (Stand 1. Mai 2017)

- Bis Sept. 2017: Letzte CODATA Ausgleichsrechnung zur Festlegung der definierenden Konstanten
- Bis Ende 2017: Gremien der Meterkonvention (CCU, CIPM) beschließen die Werte der definierenden Konstanten
- Bis Mai 2018: CCEM Guideline Dokument, die exakten numerischen Werte der definierende Konstanten und die empfohlenen Werte von  $K_J$  und  $R_K$  (empfohlene Anzahl Nachkommastellen) veröffentlicht
- Nov. 2018: Generalkonferenz (CGPM) der Meterkonvention beschließt die Einführung des revidierten SI
- 20. Mai 2019 (World Metrology Day): revidiertes SI tritt in Kraft

# Zusammenfassung

- Revidiertes SI: universell, offen für wissenschaftlich-technische Innovationen, langzeitstabil – wird lange Bestand haben
- Die weitergegeben elektrischen Einheiten sind Teil des revidierten SI
- Sprünge in den weitergegeben elektrischen Einheiten sind nur auf bestem Unsicherheitsniveau relevant
- Vorbereitung auf die Umstellung kann bereits jetzt beginnen
  - QM Dokumente
  - Kalibriersoftware
  - Rückführung
- Bis Mai 2018 (geplant): exakte numerische Werte
- 20. Mai 2019 (geplant): Einführung, das „revidierte SI“ wird „das SI“



**Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Braunschweig und Berlin**

Bundesallee 100  
38116 Braunschweig



Dr. Uwe Siegner  
Abteilung Elektrizität

Telefon: 0531 592-2010

E-Mail: [uwe.siegner@ptb.de](mailto:uwe.siegner@ptb.de)

[www.ptb.de](http://www.ptb.de)



Stand: 12/2014