



11th LEIBNIZ CONFERENCE OF ADVANCED SCIENCE

– Solarzeitalter 2011 –
12 - 13. Mai 2010, Lichtenwalde

Lutz - Günther Fleischer

Reflexionen zur ambivalenten Stellung der Wärme in der Energetik

Energie



Physikalische Kategorie, die alle Eigenschaften von Zuständen und Prozessen beschreibt, die einer **ARBEIT** äquivalent sind, d.h. mit ihr identisch, ihr gleich, proportional oder auf sie rückführbar.

Energien sind als ENERGIEANTEILE wegunabhängige Zustandsgrößen und als ENERGIEFORMEN wegabhängige Prozessgrößen.

. Energie ist ein fundamentaler, die Physik strukturierender, ihre Teilgebiete dennoch verbindender, über die *Persistenz der Physik universalisierter, anschaulicher Begriff*. Sie ist mengenartig, hat einen extensiven Charakter.

Für die *Gesamtenergie* $U + E_{\text{kin}}$ gilt naturgesetzlich ein Erhaltungssatz.

Energie und Entropie sind „competitors“ - competing inclusiv qualities – in der metaphorischen Rolle von ‚Buchhalter und Direktor‘ (R. Emden) und beide eng mit der absoluten Temperatur T verbunden. (Triade)

Das Entropieprinzip, der zweite Hauptsatz repräsentiert

„ein *allgemeines Naturgesetz*, für alle bekannten physikalischen und chemischen Prozesse gültig“

(MAX PLANCK „Über den 2. Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie“, Dissertation 1879)

„Der allgemeine Lebenskampf ... ist ein Kampf um die *Entropie*“ (LUDWIG BOLTZMANN)

A LLE OFFENEN, STRUKTUR- UND FUNKTIONSSTABILEN SYSTEME (DIE LEBEWESEN EXPONIEREN) SIND „NEGENTROPEN“,

SIE IMPORTIEREN FREIE ENERGIE/EXERGIE UND EXPORTIEREN IM DYNAMISCHEN GLEICHGEWICHT MINGENGLICH ENTROPIE.

Die **Thermodynamik** ist als **Wärmelehre** eine klassische, phänomenologische Theorie, zu deren Verständnis insbesondere die Begriffe **Temperatur** und **Wärme** (*gedanklich gelegentlich mit Entropie substituiert - Fl.*) eingeführt werden müssen“ ...
„Sinnvoll definierbar sind sie nur für makroskopische Viel-Teilchen-Systeme“
(Wolfgang Nolting: Theoretische Physik) .

Dazu bedarf es der statistischen Thermodynamik.

Die axiomatische, *klassische Thermodynamik* bildet einen strukturell und funktionell charakteristisch vernetzten , ganzheitlichen, Organismus‘ ohne natürlichen Anfang.

„Es ist ungeheuer schwierig, den Begriff der **Wärme** im Rahmen der phänomenologischen Thermodynamik mit einem hinreichenden Maß an logischer Exaktheit einzuführen. ...In der (*phänomenologischen*)Thermodynamik bleibt es gewissermaßen bei einem **gefühlsmäßigen Selbstverständnis** dieses Begriffs“
(Wolfgang Nolting: Theoretische Physik) .

Historisch und aktuell resultieren daraus zahlreiche Irrtümer, Ungereimtheiten und, *Widersprüche im Begriffssystem* (z.B. Wärmekapazität, latente und sensible Wärme, Wärmespeicher, kalorische Zustandsgröße, Wärmestrahlung...) sowie in der Metrologie und der Interpretation der Entropie.

Wärme - *Energieform*, transiente (nicht permanente) physikalische *Prozessgröße* dQ , Q_{12} .
Masseloser Transport bei der Leitung in Festkörpern (gekoppelte Molekül-Schwingungen und Elektronenensemble in Metallen)

Exponierte Energieform, im breiten Temperaturintervall T_K bis T_H , genutzt als, zunehmend eingesetzte Klimatisierungskälte, Prozesskälte, Raumwärme, Prozesswärme, Warmwasser, Heißwasser. *Kälte ist Wärmeentzug* zum Erreichen und Erhalt der Kühltemperatur T_K .
Transport aufgrund von dT , ΔT , $\text{grad}T$ (Triebkraft), *thermisches Gleichgewicht* heißt $dT=0$.

Phänomene: *conduction.*; *convection.*; *radiation.*: *Wärmeleitung*, -übergang, -durchgang, *Wärmestrahlung* (eigentlich elektromagnetische Energie $E=h\nu$, ν : $3 \cdot 10^{11}$ - $4 \cdot 10^{14}$ Hz, 1333 Oktaven, *Struktur* nach Frequenzen und Temperaturen: *IR-A*, 780-1400 nm, *IR-B* 1400-3000nm, *NIR* 3700K. *MIR- irdische Temperaturen* 1000-60K, *IR-C* $50 \cdot 10^3$ - 10^6 nm, *FIR* kosmische 3 K-Strahlung)

Wenn die *Energie* und die *Entropie* als *extensive Grundgrößen* in die Thermodynamik eingeführt werden, definiert sich die absolute **Temperatur** als *abgeleitete Größe*:

$$T = \left(\frac{\partial U}{\partial S} \right)_{V, m_k} = \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{s}} \right)_{\bar{v}, n_k}$$

$$dU_{th.} = T dS = T d_e S + T d_i S = \underline{dQ}_{rev.} + T \sum_k s_k d_e n_k + \underline{dW}_{diss.} + \sum_k \mu_k d_i n_k$$

Die infolge der Irreversibilitäten unvermeidbar dissipierte Energie $dW_{diss.}$ $W_{diss,12}$ wirkt ebenso wie eine Wärmemenge gleicher Quantität. (e-extern, i-intern)

Wärmetransportphänomene

Transportgröße Modus (a)	$\vec{j}_{h,a}$ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]	$X_{h,a}$	$L_{h,a}$	$\sigma_{s,h}$
Leitung (cond.)	$-\lambda \cdot \nabla T$	$\nabla\left(\frac{1}{T}\right) = -\frac{1}{T^2} \nabla T$	$\lambda \cdot T^2$	$\frac{1}{V} \frac{d_i S}{dt} = \lambda \left(\frac{\nabla T}{T}\right)^2$
Konvektion (conv.)	$\alpha \cdot \Delta T$	$\frac{1}{T^2} \Delta T$	$\alpha \cdot T^2$	$\frac{1}{A} \frac{d_i S}{dt} = \alpha \left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2$
Strahlungswechselwirkung von Körpersystemen (rad.)	$\varepsilon_{12} \varphi_{12} \sigma_{\max} \Delta T^4$ $\alpha_{\text{rad.}} \cdot \Delta T^4$	$\frac{1}{T^5} \Delta T^4$	$\alpha_{\text{rad.}} \cdot T^5$	$\frac{1}{A} \frac{d_i S}{dt} = \alpha_{\text{rad.}} \frac{(\Delta T^4)^2}{T^5}$

$$\Delta T := T'' - T', \quad T'' > T', \quad T_1 > T_2, \quad \mathbf{T}_m = \left[\frac{1}{4} (T_1^3 + T_1^2 T_2 + T_1 T_2^2 + T_2^3) \right]^{1/3}$$

$$\alpha = \frac{\lambda_{\text{Fluid}}}{\delta_h \text{ (Strömungsverh.)}}$$

Wärmeübergangskoeffizient ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)

$$\alpha_{\text{rad.}} = \varepsilon_{12} \varphi_{12} \sigma_{\max}$$

Wärmestrahlungskoeffizient ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$)

φ_{12} – mittlerer Winkelkoeffizient (A_1/A_2)

ε_{12} – resultierendes Emissionsverhältnis

$$\sigma_{\max} = 5,6705 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{K}^{-4}$$

Stefan-Boltzmann-Konstante

Exergie - ($\epsilon\xi$ - $\epsilon\rho\gamma\omicron\nu$)

arbeitsfähige (freie, unbeschränkt wandelbare) Energie von Systempaaren, *Ganzheiten* $\mathbf{E} = \{\Sigma, \Sigma_U\}$, unter reversiblen (quasistatischen) *Bedingungen* beim *Potenzialausgleich* intensiver Zustandsgrößen (Γ_j , wie T, p, μ) eines „**Kernsystems**“ Σ (Teilsystem unterschiedlichster physikalischer und chemischer Struktur) und dem mit ihm stofflich, energetisch sowie informationell interagierenden **Referenzsystem** Σ_U (*Reservoir* quasi unendlicher Extension bzw. einer *Umgebung* mit festliegenden - natürliche Umgebung- oder zweckmäßig festgelegten –Modellumgebung - intensiven Parametern $\Gamma_{j,u} = \text{const}$).

maximal gewinnbare bzw. beim *Potenzialaufbau* minimal aufzuwendende technische Arbeit.

Die Exergie verbindet als *Qualitätsmaß der Energien* den 1. und 2.Hauptsatz.

$$\text{Exergie} = \text{Energie} - \text{Anergie}$$

Fundamentale natur- und technikkwissenschaftliche, mit ökonomischen Kategorien kombinierbare Zustandsgröße 2.Art (totales Differenzial).

Exergie der thermischen Energie

$$\underline{dQ_{rev.}} = \frac{T - T_U}{T} \underline{dQ_{rev.}} + \frac{T_U}{T} \underline{dQ_{rev.}} \quad (1)$$

Energie = Exergie + Anergie

$$\mathbf{E}_{(Q)} = \int \left(\frac{T - T_U}{T} \right) dQ = \int \left(1 - \frac{T_U}{T} \right) dQ, \quad \mathbf{B}_{(Q)} = \int \frac{T_U}{T} dQ \quad (2)$$

$$\vec{j}_{h,i} = - \frac{dQ}{dA_i dt} \text{ Vektorkomponente } i \text{ der Wärmestromdichte } h \text{ (heat), } dA_i \text{ – gerichtetes Oberflächenelement}$$

Die im Allgemeinen orts- und zeitabhängigen Wärmeströme sind hinsichtlich der Transportmodi additive Leitungs-, Konvektions-, Strahlungsphänomene

$$\vec{j}_{h,ges.} = \vec{j}_{h,cond.} + \vec{j}_{h,conv.} + \vec{j}_{h,rad.}, \quad \vec{j}_{e,therm.} = \left(\frac{T - T_U}{T} \right) \vec{j}_h$$

$\vec{j}_{h,rad.}$ unterliegt außer der Orts- und Zeitabhängigkeit den für elektromagnetische Strahlung typischen

spektralen Verteilungen.

Die **Temperatur der IR-Strahlung (Temperaturstrahlung)** ist gleich der Temperatur des Körpers, mit dem sie im thermischen Gleichgewicht steht. *Temperaturintervall natürlicher Phänomene* : $3 \text{ K} \leq T \leq 2 \cdot 10^4 \text{ K}$.

Die solar induzierte **jahresmittlere Exergiestromdichte** liegt in Deutschland – abhängig von der geografischen Breite – zwischen 90 W/m^2 und 140 W/m^2

UMGEBUNGSTEMPERATUR $T_U := 293.15 \text{ K}$

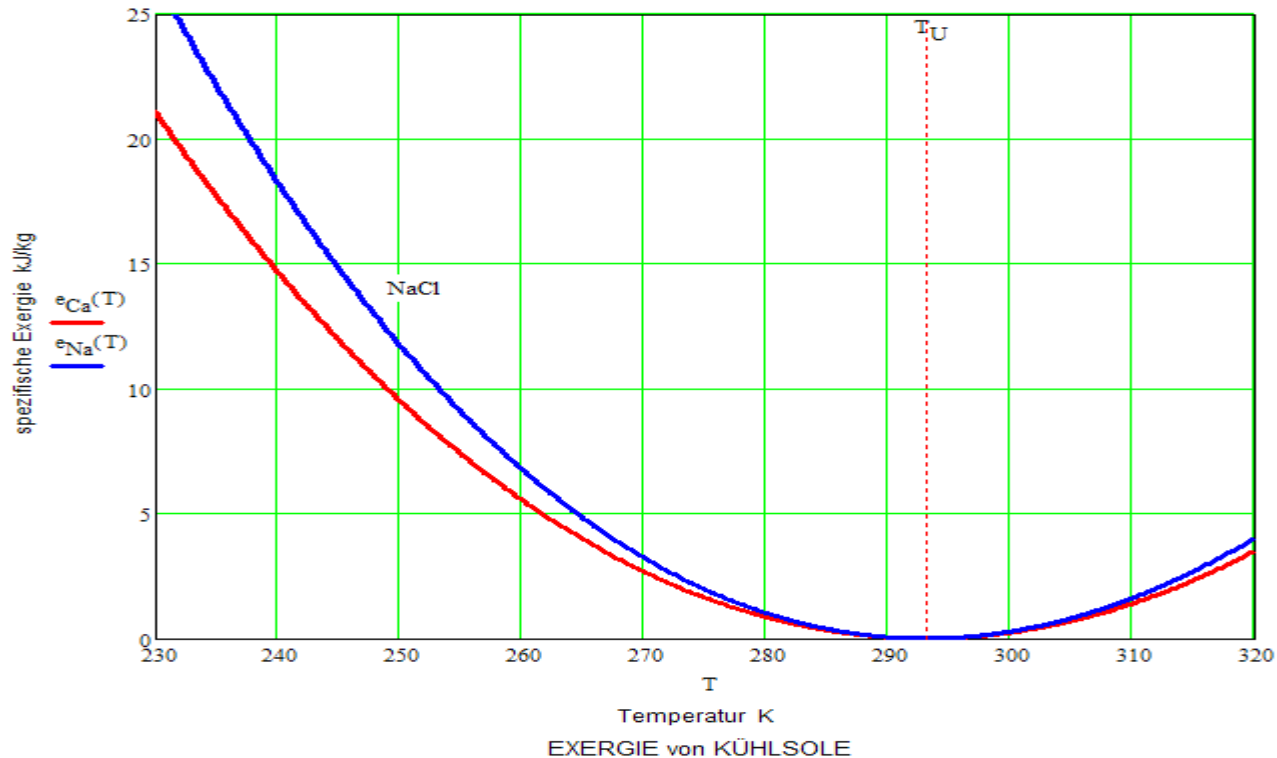
$T_w := 230, 230.2.. 320 \text{ K}$

$$C_{pCa}(T) := 1.18286 + 5.22045 \times 10^{-3} \cdot T + \frac{1.40186 \times 10^4}{T^2}$$

$$C_{pNa}(T) := 2.84564 + 1.68914 \times 10^{-3} \cdot T + \frac{4.79087 \times 10^3}{T^2}$$

$$e_{Ca}(T) := C_{pCa}(T) \cdot \left(T - T_U - T_U \cdot \ln\left(\frac{T}{T_U}\right) \right)$$

$$e_{Na}(T) := C_{pNa}(T) \cdot \left(T - T_U - T_U \cdot \ln\left(\frac{T}{T_U}\right) \right)$$



Gibbs'sche Fundamentalgleichung (GFG)

- Synthese des Energie- und Entropiesatzes
- charakteristische Funktion (enthält alle Aussagen der Thermodynamik zu dem Gleichgewichtssystem)
- beschreibt reversible (quasistatische) Prozesse

GFG in der *Energiedarstellung*

$$U = U(S, V, m_k); \quad U = U(S, l_i, m_k) \text{ (mit zusätzlichen Arbeitkoordinaten } l_i) \quad U = U(P_j)$$

(generalisiert)

$$dU = TdS - pdV + \sum \mu_k dm_k = \sum \Gamma_j dP_j \quad (1) \quad \text{(Energieformen)}$$

$$U = TS + \sum L_i l_i + \sum \mu_k m_k = \sum \Gamma_j P_j \quad (2) \quad \text{(Energieanteile)}$$

verallgemeinerte Euler-Gleichung

$$dU = TdS + \sum L_i dl_i + \sum \mu_k d_e m_k + \sum \bar{\mu}_k d_i n_k = \sum \Gamma_j dP_j$$

$$dU_{\text{ges.}} = dU + dE_{\text{kin}} = m(du + \vec{w}d\vec{w}) = \text{const.} \quad (3) \quad \text{(Erhaltungssatz)}$$

(Gesamtenergiebilanz für den differentiellen Zeitbereich dt eines ruhenden Systems)

$$dS = d_e S + d_i S = \frac{dQ}{T} + \sum s_k d_e m_k + d_i S \quad (4) \quad \text{(Entropiebilanz)}$$

$$\frac{\partial(\rho \cdot h)}{\partial t} = -\text{div } \vec{j}_h + \sigma_h$$

(5) (lokale Enthalpiebilanz)

Explizite Bilanzen

- Differentielle Zeitbereichsbilanzen der ENERGIE (U)

$$dU = TdS - pdV + \sum \mu_k dm_k$$

$$\boxed{dU = \delta Q - pdV + \sum h_k \delta_e m_k + \sum \bar{\mu}_k \delta_i n_k}$$

- Differentielle Zeitbereichsbilanzen (dt) der EXERGIE (Mo) der inneren Energie

lokal (für Dichten der Zustandsfunktionen $Z_v := \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta Z}{\Delta V} \right) = \rho z = c \cdot \bar{z}$)

$$dMo_v = (T - T_U)dS_v - (p - p_U) + \sum e_k \cdot \rho \cdot \delta \xi_k + \sum (\bar{\mu}_k - \bar{\mu}_{k,U}) c \delta_i \bar{x}_k$$

global (für $Z = \int Z_v(V) dV = m \cdot z = n \cdot \bar{z}$)

$$dMo = (T - T_U)dS - (p - p_U)dV + \sum (\mu_k - \mu_{k,U}) dm_k$$

$$\boxed{dMo = \left(\frac{T - T_U}{T} \right) \delta Q_{rev.} - \underbrace{(p - p_U)dV}_{dW_{t,rev.}} + \underbrace{\sum [h_k - h_{k,U} - T_U (S_k - S_{k,U})]}_{e_k} \delta_e m_k + \sum (\bar{\mu}_k - \bar{\mu}_{k,U}) \delta_i n_k}$$

$$dMo = \delta_e Mo + \delta_i Mo = \left(\frac{T - T_U}{T} \right) \delta Q_{rev.} + dW_{t,rev.} + \sum e_k \delta_e m_k + \sum (\bar{\mu}_k - \bar{\mu}_{k,U}) \delta_i n_k - T_U \delta_i S$$

Explizite Bilanzen

Zeitpunktbilanzen \Rightarrow Strombilanzen ($dt \rightarrow 0$) der EXERGIE der inneren Energie
[Mo(tivity)]

$$\frac{dM_o}{dt} = \left(\frac{T - T_U}{T} \right) \frac{dQ}{dt} - (p - p_U) \frac{dV}{dt} + \sum e_k \frac{d m_k}{dt} + \sum (\bar{\mu}_k - \bar{\mu}_{k,U}) \frac{d_i n_k}{dt} - T_U \sigma_S$$

$$\vec{J}_{mo} = \left(\frac{T - T_U}{T} \right) \vec{J}_h - (p - p_U) \vec{J}_v + \sum e_k \cdot \vec{J}_k - \sum (A_r - A_{r,U}) \omega_r \quad (J_j - \text{Ströme})$$

für jede **Reaktion r** gilt:

$$A_r := - \sum_{(k)} v_{k,r} \bar{\mu}_{k,r} \quad (\text{Affinität}), \quad \omega_r = \frac{d\zeta_r^-}{dt} = \frac{1}{v_{k,r}} \frac{d_i n_{k,r}}{dt} \quad [\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (\text{Reaktionsgeschwindigkeit})$$

$v_{k,r}$ – stöchiometrische Koeffizienten,

ζ_r – Reaktionslaufzahl

Irreversible (natürliche) Prozesse (TIP)

$$\vec{j}_i = \sum L_{ij} X_j \quad (\vec{j}_i - \text{volumen- bzw. flächennormierte Stromdichten})$$

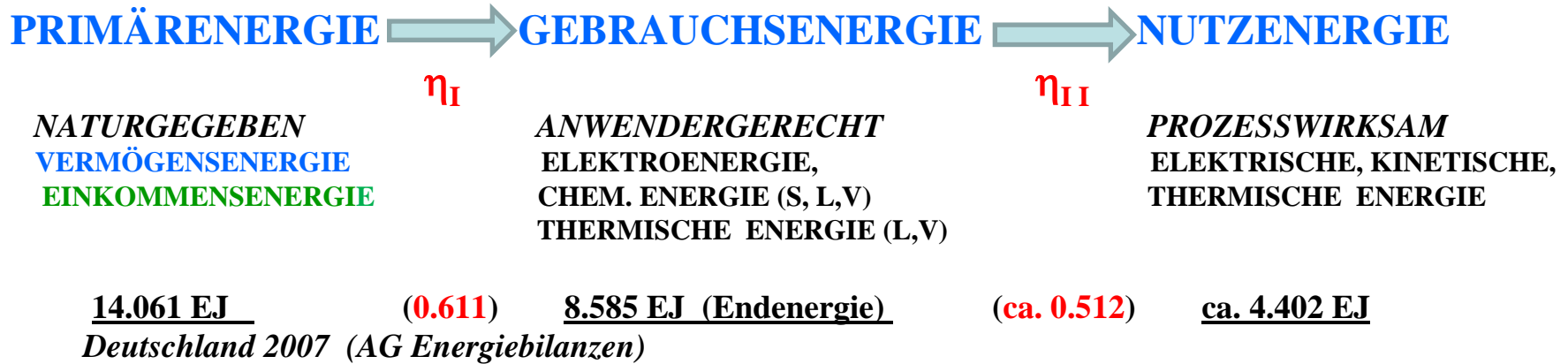
$$\varepsilon = -T_U \sigma_S = -\sum j_i X_i^*, \quad \sigma_S = \sum j_i X_i,$$

ε – lokale Exergieextermination,

lokale Entropieproduktion: σ_S

thermodynamische Kräfte: $X_i^* = T_U X_i$

kinetische Koeffizienten: $L_{ij} = \left(\frac{\Delta j_i}{\Delta X_j} \right)_{\Delta X(k \neq j)}$



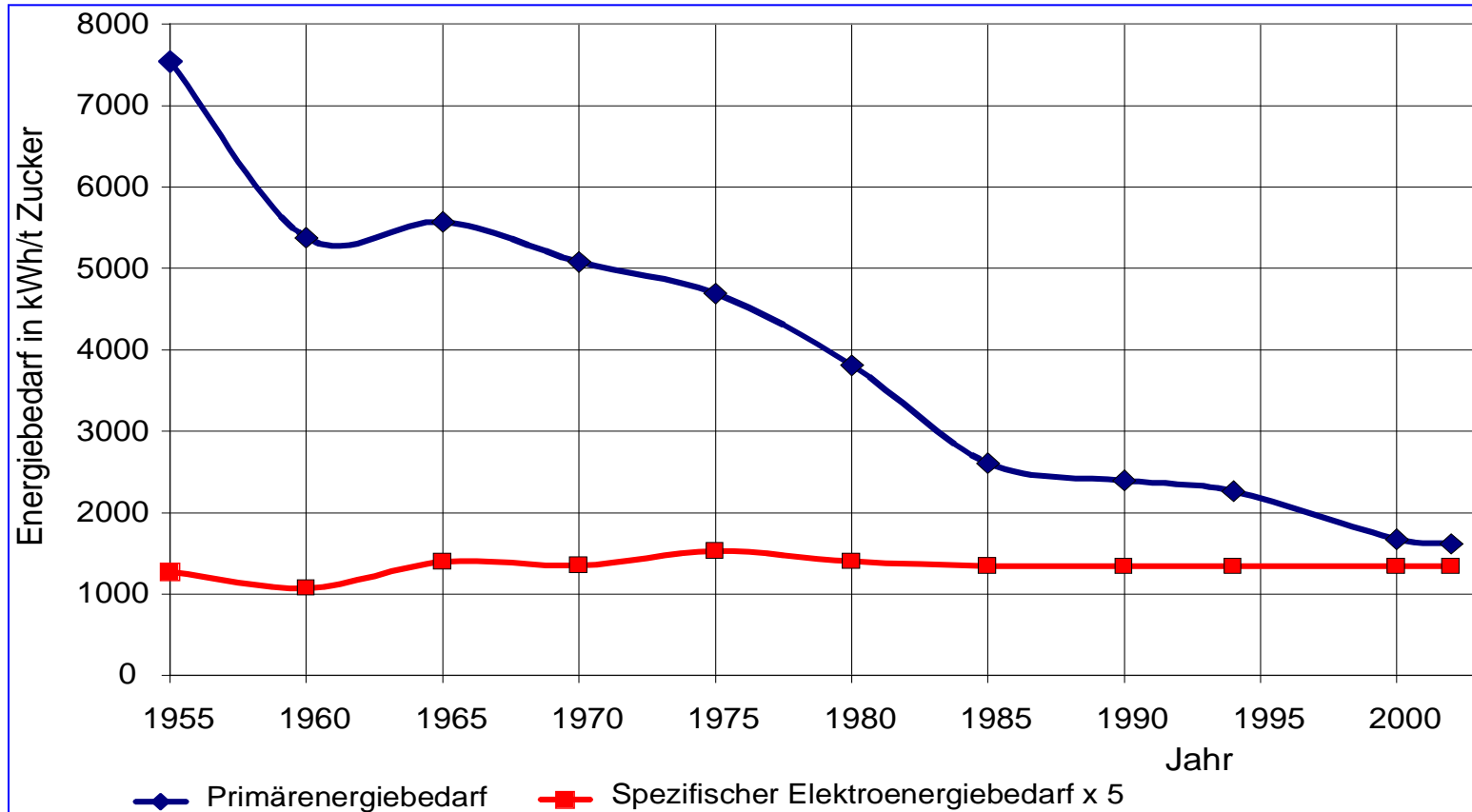
Einkommensenergien: primäre und sekundäre (Wind, Wasser, Biomasse) *Sonnenenergie, Erdwärme, Erdrotation:*

Die optimale Gestaltung der Wandlungskette (E^3) erweist sich als maßgebliche – gemessen am naturgesetzlich Möglichen – noch ungenügend ausgeschöpfte Quelle der *komplexen Energie-Effizienz (Wirkkraft)*.

Unter dem Aspekt der *Effektivität (Wirkvektor)* bedarf es gesellschaftlich gewichteter energiepolitischer sowie energietechnischer Gesamtziele und Teilziele in den *Nutzen-Aufwand-Verhältnissen*, zielsicherer Stimuli, wie Zuschüsse, Zinsvergünstigungen, Einspeisevergütungen, Vorrangregelungen für die Einspeisung von Ökostrom, Abnahmegarantien und ‚nachhaltiger‘ politischer Entscheidungen.

In der Energetik werden bisher die direkte *Inanspruchnahme des Wasserdargebotes* und die aufgewendeten Mengen *virtuellen Wasser* ungenügend beachtet .

Entwicklung des Energiebedarfs bei der Rübenzuckerproduktion in Deutschland



Ein überzeugender energieökonomischer Beleg für die Technologieführerschaft

Quelle: IPRO

Wenn die Energiepolitik verstärkt auf erneuerbare Energien (RE, EE) setzt, dann sind zentrale und dezentrale hierarchische und heterarchische *Netze/Speicher* wegen der dezentralen Einspeisung, der volatilen Fluktuationen und der zeitlichen Divergenzen, der Nichtübereinstimmungen zwischen den Bedarfs- und Deckungsbilanzen, wichtig.

Nachhaltige prospektive Orientierung für *Subsysteme* mit erneuerbaren Energien, Systemverbünde, Vefahrenskopplungen, Gewichtung der *Effektivität* (Wirkvektor, ‚das Richtige tun‘) und *Effizienz* (Wirkkraft, Wirkungsgrad, ‚das Richtige ‚bestmöglich tun‘).

Erneuerbare Energien sind vorwiegend intermittierende PE, optimale Konversion /Transformation in **GE** (Elektroenergie, Raum- und Prozesswärme, Kälte Agrotreibstoffe /-kraftstoffe) oder direkt in **NE** nötig.

Nutzung primärer Sonnenenergie (Solarkonstante 1370 W / m^2)

über photothermische, photovoltaische, photochemische, photoelektrochemische Transformationspfade (1.6 % Solarthermie, 1.1 % Photovoltaik), ca. 90% im Spektralbereich λ 0,1 bis 1 Mikrometer)

Nutzung sekundärer Sonnenenergie: Wind- (15.3 %) und Wasserkraft (9.9 %),

Biomasse (42.1% Brenn-, 20.2 % Kraftstoffe, 8.8 % Strom) ,

Nutzung der Erdrotation- *Gezeiten, Geothermie* (1%).

In Klammern stehen die *Anteile an den 8 % der RE für GE* 2007.

Steigende Inanspruchnahme der RE in Deutschland: 2004 3.6 % am PE-Verbrauch,

2006 5.4 %, 2007 6,6 % ,2010 12%, **Ziel: 2020 16%**

- Die Zielenergie der 2. Wandlungsstufe ist *prozesswirksame* Nutzenergie **NE** (kinetische Energie, thermische Energie bei unterschiedlichen Temperaturen - mit *lokalen Maxima* bei 1400-1500 °C(396 PJ), 800-900°C(151 PJ), 100-200°C(280 PJ), bis 100°C(208PJ) - Kälte, elektromagnetische Strahlung). Die Mengen, Temperaturen und Exergien bieten Ansatzpunkte für regenerative Nutzungen, Einsatz von Wärmepumpen, Verstromung....
- Die energieökonomische Optimierung im Energiemix betrifft hinsichtlich des *Wirkungsgrades* η_i alle regenerativen Energien und Systemwirkungsgrade, exponiert *solare Versorgungssysteme* vor allem wegen der mäßigen Energiedichte U_V und der zeitlichen sowie lokalen Disproportionen zwischen den Bedarfs- und Deckungsbilanzen. Die *kooperative bzw. kompetitive stoffliche und/oder energetische Nutzung von Biomassen* – solarer Wirkungsgrad $(1 \text{ bis } 2,4) \cdot 10^{-2}$ – (insbesondere von Agroprodukten als Lebensmittel/Agrotreibstoffe) erfordert über die Wirtschaftlichkeit hinausgehende politische und sozioökonomische Entscheidungen.
- Der metabolischen Nutzung agrarischer Biomasse gebührt das absolute Primat. Bei einer sehr großen globalen *Differenzierung* beträgt die *deutlich wachsende*, durchschnittliche, nicht metabolische *Leistungsaufnahme eines Weltbürgers* gegenwärtig ca. **2250 W/Einwohner**– bei einem fast konstanten mittleren biotischen (metabolischen) Leistungsbedarf (mit ernährungsphysiologisch genauer stofflicher Spezifikation) von **120 W/Einwohner**.

Rest- und Abprodukte der
Land- und Forstwirtschaft,
Nahrungsgüterindustrie

Stoffwirtschaftlich unvollständig
genutzte NR

Nachwachsende Energieträger (NE)

lignozellulosehaltige
Pflanzen und Produkte

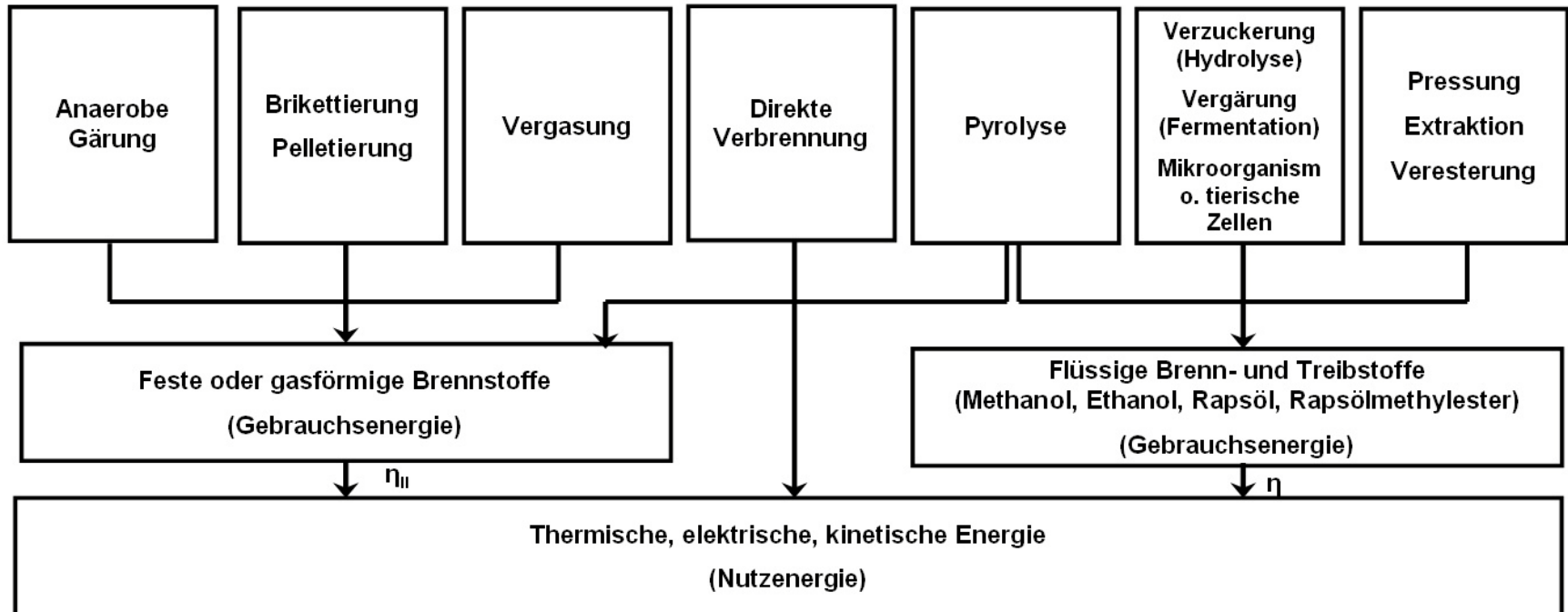
Stärke- und
zuckerhaltige
Pflanzen und
Produkte

Öl-/fetthaltige
Pflanzen und
Produkte

Holz, Gräser,
Miscanthus sinensis, ...

Zuckerrohr, -rübe,
Getreide,
Kartoffeln

Raps, Lein,
Sonnenblumen,
Oliven, Soja



Die Vielfalt und Funktionsweise vorwiegend *dezentraler solarer Energiesysteme* bedürfen der weitgehend ganzjährigen (Ideal:8760 h) *Leistungsabsicherung* über *dezentrale (darunter autarke) und hybride zentrale Systeme*:

vermaschte Netze zum Erfassen und Verteilen der Energie sowie effektiver Speichertechnologien.

Die Erforschung und Entwicklung leistungsfähiger und kostengünstiger *Energiespeichertechniken* hoher *Energiedichten* U_V, H_V bilden – noch vor dem Netzausbau im Nieder-, Mittel- und Hochspannungsbereich - angesichts der zeitlichen Verfügbarkeit (Nutzungsstunden) regenerativer Energien (RE,EE) in Deutschland (vor allem solar, direkt und indirekt) für deren umfassendere und effektivere Nutzung eine *wesentliche Bedingung*.

Verfügbarkeit: Nutzungsstunden über Solarthermie (ca. 1600 h/a), über Photovoltaik (ca. 790 h/a), von Windenergie (ca. 1740 h/a), von Wasserkraft (ca. 5000 h/a), von Geothermie und als *Integrator* Biomasse (8760 h/a).

Die Weiterentwicklung und der Aufbau von **Energiespeichern** für **STROM-** und **WÄRME**‘ (thermische Energie TS) sind

essenziell für den Ausgleich der divergierenden *Bedarfs- und Deckungsbilanzen* in der Ebene der **PE** und **GE**.

Thermische Energie lässt sich weitaus effizienter und kostengünstiger speichern als Elektroenergie und ist energietechnisch präferiert.

Kriterien für die Auswahl:

- Speicherkapazitäten und -energiedichten
- Speicherwirkungsgrade,
- Speicherdauer
- Speicherbe- und entladezeiten
- spezifische Speicherkosten
- gesellschaftliche Akzeptanz

(siehe z.B Trassierung von Leitungen und Errichtung von Pumpspeicherwerken, Standortwahl von Windanlagen, Kohlendioxidspeichern und adiabatischen Druckluftspeichern in unterirdischen Kavernen)

Speichertypen:

- **Nutztemperaturniveau** im Nieder-, Mittel-, Hochtemperaturbereich,
- Kurz- und Langzeitspeicher,
- atmosphärische Speicher, **druck**behaftete Speicher für Heizmittelkreisläufe, Kältemittelkreisläufe, Trinkwassererwärmung (kleine Volumina ca. 5 m³).
- thermodynamische **Wirkprinzipien** der Speicherung

*Erforschung und Entwicklung leistungsfähiger Energiespeichertechniken mit hohen volumenbezogenen **Energiedichten** U_V J/m³*

generell: $Z_V = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta Z}{\Delta V} \right)$ originär $\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta m}{\Delta V} \right)$

- $Z = m$ $z = V Z_V$ Z extensive Zustandsgröße, Z_V Eigenschaft eines Massepunktes (Feldgröße)

speziell: $U_V = \rho u$, $H_V = \rho u + p$, $T S_V = T \rho s$, $E_V = \rho (h - T_U s)$

Wirkprinzipien der Speicherung

1. thermische Energie

thermophysikalische Speicherung:

„*sensibel*“ - Wasser, synthetische Öle, Salzschnmelzen, Beton, Erdsonden, $\Delta H = m c_p \Delta T$ ($\Delta T = T - T_U$) mit herausragenden thermo- und fluiddynamischen bzw. Festkörper- Eigenschaften, effizienzsteigernde Volumina gefragt: 500 - 10 000 m³, optimierte Außen-Wärme-Dämmung bis Superisolationsmaterialien.

Problem: Investkosten vermindern, Thermostabilität.

„*latent*“ - PCM, vor allem s,l : Wassereis, Trockeneis, Paraffine (ev. mikroverkapselt), Salzhydrate (ev. makroverkapselt in Kunststoffen, Folienbeutel), Versuche mit PCM-Suspensionen

$\Delta_{s,l} H = m \Delta_{s,l} h$; l,v wegen $\Delta \rho$ technisch sehr schwer beherrschbar .

Probleme: Zyklenstabilität, Phasenseparation, Unterkühlung der Schmelzen, Materialkosten, Verbundmaterialien mit größerem λ und c_p , gefragt, Konstruktion der aktiven Flächen für die Wärmeübertragung, Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik.

thermochemische Speicherung:

hohe Speicherdichten U_V , H_V , S_V , E_V näherungsweise reversible chemische Konversion und Absorption insbesondere von Feuchtigkeit in Gelen (z.B Silikagel) und extrem porösen Strukturen (Zeolithe, Aktivkohle...) – Physi- und Chemosorption,.

Dissoziationsreaktionen mit großem Molzahldifferenzen der Produkte und Edukte - ΔS .

Problem: Steuerung, Regelung, Systemintegration, eng begrenzte Auswahl von Reaktionen.

2. chemische, elektrochemische Energie

Wasserstoff, Biomasse als Integrator, Erdgassubstitut - SNG, $\Delta_B H$, Batterien

(SNG - Substitute Natural Gas – aus der *katalytischen Konversion* von H_2 (Oxyfuelkraftwerke) mit CO_2)

Vorteile: Transport und Einsatz in weit gehend vorhandenen Anlagen, hohe Energiedichten, Kompatibilität stofflicher und energetischer Nutzungen.

3. Potenzielle, mechanische Energie

Pumpspeicherwerke $\Delta U_{\text{pot.}} = m g \Delta x_{3-}$, adiabatische Druckluftspeicher (CAES), PV=H-U, Schwungradspeicher.

Alle Varianten haben spezifische Vor- und Nachteile und bedürfen bestimmter technologischer Konditionen (Betriebssicherheit, Kopplungsfähigkeit, Kompatibilität, Zyklenstabilität, Toxizität und Korrosivität der Speichermedien, Laufzeiten, Transporteigenschaften, Exergieniveau, wie *Nutztemperaturniveau*)

sowie *geographischer, geologischer, ökologischer* (Umweltverträglichkeit, Nachhaltigkeit)

Voraussetzungen.