

Theorie und Praxis

Die sogenannte Wärmespeicherung bildet ein essentielles Element des Funktions- und Sicherungssystems der evolutionären Energetik

Von Lutz-Günther Fleischer und Norbert Mertzsch



Prof. Dr.-Ing. habil.
Lutz-Günther Fleischer
Mitglied des Präsidiums der Leibniz-
Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e.V.
Sekretar (Vorsitzender) der Klasse
Naturwissenschaften und Technik-
wissenschaften



Dr. rer. nat. Norbert Mertzsch
Vorsitzender des Vereins Branden-
burgischer Ingenieure und Wirtschaftler
e.V. und Leiter des Arbeitskreises
Umweltschutz / Erneuerbare Energien
(Foto: Bernd Geller, Eisenhüttenstadt)

Das Speicherproblem, das die Energiewirtschaft seit langem einengt, verschärft sich in Deutschland in dem Maße, in dem die beträchtlichen Entwicklungspotentiale der Solarthermie, der Photovoltaik und der Windkraftanlagen weiter ausgeschöpft werden. Adaptierte *Energiespeichertechnologien* können das zeitlich und räumlich variable Energieangebot mit der zeitlich und räumlich veränderlichen Nachfrage an Gebrauchsennergien der erforderlichen Art, Form und Menge zumindest tendenziell harmonisieren. Speichertechnologien sind ein essentielles Element des Funktions- und Sicherungssystems der evolutionären Energetik.

In der Praxis dominiert derzeit die ‚*Wärme/Kälte-Speicherung*‘. Der Beitrag reflektiert erfolgreiche und erfolgversprechende Beispiele, tragfähige themenrelevante Konzepte sowie neue Entwicklungslinien und einige immanente Probleme. Zudem will er dazu anregen, dass – auch in der Öffentlichkeit und in den Medien – die natur- und technikwissenschaftlichen Kenntnisse im erforderlichen Umfang und auf der objektiv gebotenen Höhe der erörterten Energieprobleme entwickelt werden. Das beginnt beim zentralen Begriff Wärme und setzt sich mit den – ebenfalls scheinbar bekannten – Kategorien Energie, Entropie und Exergie fort.

Aber: „Das Bekannte überhaupt ist darum, weil es *bekannt ist, nicht erkannt*“, mahnte schon Georg Wilhelm Friedrich Hegel.

Keywords:

Energiewende, Energie, Energieströme, Entropie, Exergie, Speichermedien, thermische Speicher, Thermodynamik, Wärme, Wärmeleitung, Wärmestrahlung, Wärmespeicher.

Im Aufsatz „Herausforderungen größer als erwartet“ diskutierten wir in dieser Zeitschrift [1] die wissenschaftlich-technische Komplexität der *effektiven Speicherung großer Energiemengen* als ein generelles, indessen unzureichend gelöstes praktisches und theoretisches Kernproblem der Energiewende in Deutschland.

Die *Speicherung thermischer Energie* – die fragwürdig, aber immer noch weit verbreitet, als *Wärmespeicherung* bezeichnet wird – wurde in dem zitierten Beitrag anhand einer systematisierenden Übersicht umrissen. Sie ist hier abermals eingeordnet. Mit dem erwähnten Aufsatz wurde nur ein schwach konturierter Eindruck vermittelt, der dem wahren Stellenwert und der tatsächlichen Bedeutung der thermischen Energie und ihrer Speicherung absolut

nicht gerecht werden konnte. Im Kontext kündigten wir diese weiterführende Abhandlung an.

Die *Energiewende* in Deutschland ist gegenwärtig im vorurteilsfreien Gespräch, aber auch im Gerede; in Teilen steht sie sogar unter heftiger Kritik. Der mittelfristige, tiefgreifende, gesamtgesellschaftlich zu gestaltende, weil für alle Bereiche der Gesellschaft einschneidende, *komplexe Transformationsprozess unseres gesamten Energiesystems* vollzieht sich außerordentlich widersprüchlich. Offenkundig existieren folgenreiche technisch-technologische Defizite (darunter die Energiespeicherung), konzeptionelle Ambivalenzen, erhebliche organisatorische Barrieren und belastende Mängel bei der im ‚Gesellschaftsvertrag‘ vereinbarten sozio-ökonomischen Realisie-

zung. Hinzu kommen nicht nur fachpolitische Entscheidungsschwächen. Im Hinblick des kompliziert verflochtenen Problemgefüges mit nachhaltigen, wahrscheinlich klimarelevanten Komponenten häufen sich Bedenken und Einwände. Vermisst werden die *konsequente und koordinierte Substitution* nicht nur nuklearer, sondern auch fossiler Primärenergieträger (Vermögensenergieträger), der *effizientere Energieeinsatz* und bilanzwirksame *nachhaltige Energieeinsparungen* in allen Nutzungsstrukturen sowie ein planmäßiger, all dies bestmöglich umfassender, technisch-technologischer Fortschritt beim Einsatz der Einkommensenergieträger.

1 Die Speicherung thermischer Energie – Erscheinung und Wesen

Permanent zu qualifizierende und innovative *Energiespeichertechnologien* mit ihrer Vielfalt optimiert zu erfüllender Kriterien haben in Energieversorgungssystemen objektiv eine *Schlüsselstellung*. Die Speicherung thermischer Energien übernimmt ein grundlegende Rolle bei der bedarfsgerechten Bereitstellung, effizienten Wandlung, Übertragung, Speicherung und Verteilung sowie dem effektiven Einsatz von Energien, also bei den Basis-Funktionen der *evolutionären Energetik, der technisch-technologischen Hauptkomponente der Energiewende*.

Die weltweite Energieforschung behandelt die systematische Energiespeicherung mehrheitlich noch immer als randständiges wissenschaftlich-technisches Problem. In Deutschland, wo – mit der Energiewende verstärkt – spezifische qualitative und quantitative Forderungen an alle Energiespeichertechnologien gestellt werden, überwiegen andere Tendenzen. Sie resultieren aus dem wachsenden Anteil von Einkommensenergieträgern am angestrebten breiten und dynamisch ausgewogenem Primärenergieträgermix.

In Deutschland (und partiell in Europa) werden im F&E-Bereich – wenn bisher auch leider unzureichend koordiniert – eine Reihe von Forschungsaktivitäten dem methodischen Erkunden sowie dem zweckdienlich abgewogenen Nutzen der mannigfaltigen natur- und technikwissenschaftlichen Möglichkeiten gewidmet.

Energetisch exponierte Ziele umfassen die effiziente Netzunterstützung, die Sicherung der Stabilität elektrischer Netze und vermaschter Wärmesysteme, die intensivere Nutzung von Rest- und Abwärme – vor allem die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und die thermische Regeneration – sowie effektive intelligente Funktionalitäten im Gebäudebereich und in der Industrie.

Der F&E-Investitionsbereich präferiert *hohe Speicherdichten, die Zyklen-Stabilität und minimierte Gesamtverluste im System* (infolge der naturgesetzlichen Irreversibilität). Die gesellschaftlich übergeordnete strategische Ausrichtung der Forschung und Entwicklung sollte die Trinität von *Versorgungssicherheit, Wettbewerbsfähigkeit und Umweltverträglichkeit* (im weitesten Sinn, der bis in das Sozialereicht) beinhalten.

Diesbezügliche innovative Durchbrüche und Inventionen blieben bisher aus. Letztendlich betreffen diese vielschichtigen Herausforderungen die *Dualität der Technologien als prozessorientierte Sachsysteme* (Technologien im tradierten Sinn) sowie die ihnen zugrundeliegenden – sie permanent evolutionär verändernden – *konstituierenden Theoriensysteme* (Technologien als Wissenschaft).

1.1 Die problematische Kategorie Wärme in der Thermodynamik

„Es ist ungeheuer schwierig, den Begriff der *Wärme* im Rahmen der phänomenologischen Thermodynamik mit einem hinreichenden Maß an logischer Exaktheit einzuführen.... In der Thermodynamik bleibt es gewissermaßen bei einem *gefühlsmäßigen Selbst-*

verständnis dieses Begriffs“ [2] (kursive Hervorhebung von den Verfassern).

Diese Beurteilung gilt analog für die Vielfalt der Erscheinungen und Prozesse, wie Wärmespeicherung, Wärmetransport oder Wärmekapazität, die mit dem zu definierenden, (wenigstens interpretationsbedürftigen) Begriff Wärme verflochten oder lediglich korreliert sind, und die zum fundamentalen Anliegen sowie zum Kernbestand der phänomenologischen Thermodynamik gehören.

„Die Thermodynamik ist als *Wärmelehre* eine klassische, phänomenologische Theorie, zu deren Verständnis insbesondere die Begriffe *Temperatur* und *Wärme* eingeführt werden müssen.“ [3] Wärme und Temperatur basieren auf Sinnesempfindungen, die lange Zeit einer exakten Messung, der angemessenen Beschreibung und ursächlichen Charakterisierung unzugänglich blieben.

„Obwohl das Wort ‚Thermodynamik‘ so viel bedeutet wie ‚Wärmelehre‘, handelt es sich doch bei der Thermodynamik um (*weit*) mehr als nur um eine Theorie der Wärme“.

„Sie handelt vielmehr von Regeln, die auf beliebige Objekte und Vorgänge zutreffen, sie ist ein *allgemeines Verfahren zur Naturbeschreibung*.“ [4] (kursive Ergänzung und Hervorhebung von den Verfassern.).

„Die klassische Thermodynamik darf als die größte Abstraktionsleistung der Physik gelten; vielleicht der Physik überhaupt, gewiss aber der Physik vor Einstein“. Weizsäcker spricht von einem ‚singulären Rang der Thermodynamik‘ und zitiert in diesem – auf die klassische Thermodynamik bezogenen – Kontext Albert Einstein:

„Eine Theorie ist desto eindrucksvoller, je größer die *Einfachheit ihrer Prämissen* ist, je *verschiedenartigere Dinge* sie verknüpft und je *weiter ihr Anwendungsbereich* ist“ [5] (kursive Hervorhebungen von den Verfassern).

Diesen Wertungen entsprechend, gehört die Thermodynamik mit all ihren problem- und anwendungsorientierten sowie methodischen Modifikationen (etwa der Statistischen Thermodynamik, der Thermodynamik irreversibler Prozesse, Technischen Thermodynamik, Chemischen Thermodynamik, Thermodynamik der Mischphasen, Biothermodynamik) zum Grundlegenden der Physik sowie aller Naturwissenschaften und Technikwissenschaften, die auf ihr aufbauen.

Bereits die *klassische Thermodynamik* konsituiert mit zentralen Begriffen, wie „System“, „Umgebung“, „Zustand“, „Zustandsänderung“, „Prozess“ und „physikalische Größe“, das abstrakteste Gebiet der Physik. Dieses anwendungsfähigste physikalische Begriffssystem, das wir besitzen, vereint die wechselwirkenden Aspekte techné und epistémé – Praxis und Theorie. Es dient dem Messen, Beschreiben, Berechnen, Erklären, Vorhersagen sowie dem gezielten Verändern der natürlichen und technischen Umwelt. Dafür fasst es – über die vielfältigen Phänomene und unmittelbaren Einsichten hinausgehend – Erfahrungen, Wissen und Erkenntnisse zusammen, abstrahiert und ordnet das emergente Ganze in einem umfassenden, leistungsstarken und extrapolationsfähigen theoretischen System. Die Genesis des Begriffs Wärme reflektiert die fortdauernde Evolution eines Erfahrungsgebietes von der empirischen Wärmelehre zur axiomatischen Thermodynamik.

Unsere Darstellungen berücksichtigen das historisch entstandene Begriffssystem (das in praxi zuweilen mit ‚Legaldefinitionen‘ beziehungsweise Nominaldefinitionen arbeitet). Dieses Begriffssystem ist trotz des gewichtigen, semantisch und pragmatisch zu reflektierenden Erkenntnisfortschritts syntaktisch nahezu unverändert konserviert, partiell eingefroren und deshalb widersprüchlich. Im Beitrag wird es moderat an das fortgeschrittene thermodynamische Erkenntnisniveau adaptiert, mit einigen Hinweisen, die diesem gerecht werden.

Bis heute überlebte in einigen breit verwendeten Begriffen die ‚Wärmestofftheorie‘ (Théorie du calorique), die wissenschaftlich seit langem revidiert ist. Dazu gehören Bezeichnungen wie *sensible und latente* [lateo-‚verborgen‘] *Wärme, Wärmeträger, Wärmekapazitäten, Wärmespeicher, Wärmestrahlung* sowie die obsoleete Benennung ‚*kalorische Größe*‘ für thermodynamische Zustandsgrößen, wie U, H, S, F, G, die von den sogenannten *thermischen Zustandsgrößen*, wie p, T, V, ρ und Zustandgleichungen [zum Beispiel $\rho(p, T, \xi_k)$] sowie von den Mengen N_k [Stück] und Massen m_k [kg] der Stoffkomponenten k abhängen. Generell gelten für die quantifizierten Stoffmengen die Beziehungen: $m_k = N_k \cdot M_k$ (N_k -Stoffmenge, M_k -molare Masse), $m = \sum m_k$ mit $dm_k = \overset{d}{d}_i m_k + \overset{d}{d}_e m_k$ und für die Masseanteil $\xi_k := m_k / \sum m_k$

Zunächst ist es nicht nur kognitiv hilfreich (erkenntnisfördernd) den *Begriff Wärme* gedanklich (ideell) mit Entropie zu substituieren. Ohne Zweifel dient das dem faktisch-empirischen physikalischen Verständnis und darauf aufbauend im Großen und Ganzen der wesensbezogen vertieften theoretischen Klarstellung, fördert allerdings kaum die Anschaulichkeit, die noch immer vor allem an der klassischen Mechanik geschult wird.

Auch der notwendige und fachgerechte Hinweis, dass die *thermodynamische Temperatur* nur für makroskopische Viel-Teilchen-Systeme sinnvoll definierbar ist, unterstützt in erster Linie die theoretische Darstellung und Interpretation. De facto formieren die physikalischen Größen *Wärme(menge)*, *Entropie* und *thermodynamische Temperatur* eine Trias, die als Ganzheit gedeutet und verstanden werden will. [vgl. Tabelle 2]

1.2 Die thermodynamische Präzisierung des relevanten Begriffssystems

1.2.1 Thermische Energie und Wärme

Zum tatsächlichen Verständnis der Speicherung thermischer Energien sowie der physikalischen, technischen und technologischen Phänomene *Wärme/Kälte*, die dabei auftreten, sind die nachfolgenden Klarstellungen unentbehrlich.

Thermische Energien werden – physikalisch nicht präzise – häufig als *Wärme* beziehungsweise *Kälte* bezeichnet. Als Teil der inneren Energie U [vgl. Gl. (2) in der Tabelle. 1] ist die *thermische Energie* ($T \cdot S$) jedoch faktisch eine *Energieart, eine wegunabhängige Zustandsgröße*. Das Produkt $T \cdot S$ dimensioniert die thermischen Speicher. Die *Wärme(menge)* stellt hingegen eine exponierte *Energieform, eine wegababhängige Prozessgröße* – eine transiente (nicht permanente, nur während der Prozessverläufe definierte) Größe – dar. Sie tritt in Erscheinung, wenn die sogenannten *Wärmespeicher* beladen und entladen werden. ‚*Kälte*‘ lässt sich zwanglos als *Wärmeentzug* (und damit als *Entropieexport* $\overset{d}{d}_e S < 0$) bis zur Kühltemperatur $T_K < T_U$ unterhalb (im theoretischen Grenzfall bei) der jeweiligen Umgebungstemperatur T_U auffassen. In ihrem Wesen gleicht sie der *Wärme*.

Für *infinitesimale Mengen* (kleinste ‚Portionen‘ – Inkremente/Dekremente) *der Prozessgrößen* steht – im wesentlichen Unterschied zum ‚*d*‘ *infinitesimaler Änderungen der Zustandsgrößen* (deren totalen Differentialen) symbolisch das (vermutlich Leibnizsche) Diminutiv ‚*d*‘ (lat. *diminuere* – verringern, vermindern). Als In-

Energie: fundamentale physikalische Kategorie, extensive (mengenabhängige) physikalische Größe, allgemeiner Oberbegriff (Abstraktum), beschreibt phänomenologisch alle Eigenschaften von Zuständen und Prozessen, die einer ARBEIT äquivalent sind, d.h. mit ihr identisch, zu ihr gleichwertig, proportional oder auf sie ruckführbar und so physikalisch messbar [6]

Energieträger: phänomenologische Realitäten, messbare makrophysikalische Konkreta, die Energie (überdies Informationen) *enthalten und/oder übertragen: Stoffe, Bewegungsgrößen, Felder* tensorieller Größen verschiedener Stufen und *Strahlung* (Welle-Teilchen-Dualismus)

Als (additive) *Energieanteile* $[I_j \cdot P_j]$ sind die Teilenergien j *wegunabhängige Zustandsgrößen* und als *Energieformen* $I_j dP_j$ bzw. $I_j (dP_j/dt)$ – *Energiemengen* (wie Arbeiten, Wärme[mengen] und stoffgebundene Energiemengen) bzw. *Energieströme* (wie [masselose] Wärmeströme, mechanische, elektrische ... Leistungen, stoffgebunden Energieströme) *wegabhängige Prozessgrößen*, also technisch-technologisch über den gewählten Weg der Veränderung beeinflussbar.

Fundamentale Relationen:

| | | |
|--------------------------|---|--|
| Gesamtenergie: | $E_{ges.} = U + E_{kin.} = const.$ | (1) Erhaltungssatz-Axiom |
| Innere Energie: | $U = \sum I_j \cdot P_j = T \cdot S + \sum L_i \cdot I_i + \sum \mu_k \cdot m_k$ | (2) generalisierte Euler-Gleichung-Potential |
| Potentialänderung: | $dU = \sum I_j \cdot dP_j = T \cdot dS + \sum L_i \cdot dI_i + \sum \mu_k \cdot dm_k$ | (3) differentielle Fundamentalgleichung |
| Gleichgewichtsbedingung: | $\sum P_j \cdot dI_j = 0$ | (4) generalisierte Gibbs-Duhem-Gleichung |
| Erster Hauptsatz: | $dU = dQ_{rev.} + \sum dW_{rev. i} + dW_{diss} + \sum h_k \cdot \overset{d}{d}_e m_k$ | (5) |
| Zweiter Hauptsatz: | $T \cdot dS = T \cdot \overset{d}{d}_e S + T \cdot \overset{d}{d}_i S = dQ_{rev.} + T \cdot \sum s_k \cdot \overset{d}{d}_e m_k + dW_{diss.} - \sum \mu_k \cdot \overset{d}{d}_i m_k$ | (6) |
| Exergie (der Enthalpie) | $dE = \overset{d}{d}_e E + \overset{d}{d}_i E = dH - T_U dS = d(U - \sum L_i \cdot I_i) - T_U \cdot dS$ | (7) |

Symbolerläuterungen:

P_j – generalisierte Quantitätsgröße (state), *Kapazität*

I_j – generalisierte, zu P_j energie-konjugierte *Qualitätsgröße (rate), Intensität*

L_i – generalisierte Arbeitskoeffizienten (wie $L_1 = -p$ [Druck], elektrische Feldstärke, „magnetische Feldstärke“)

I_i – generalisierte Arbeitskoordinaten (wie $I_1 = V$ [Volumen], elektrische Polarisation · V, Magnetisierung · V)

μ_k – spezifisches chemisches Potential der Stoffkomponente k

$\overset{d}{d}$ – Diminutiv, Inkrement von Prozessgrößen (Index e(xtern):Importe, Exporte; Index i(ntern): Erzeugungen, Vernichtung)

Anmerkungen:

Jeder Term der generalisierten Euler-Gleichung (2) repräsentiert eine *Speichergruppe* mit charakteristischen Kapazitäten P_j und dazu energie-konjugierten Intensitäten/Potentialen I_j .

Jedes $I_j(dP_j/dt)$ definiert einen charakteristischen *Energiestrom*.

Die Gleichungen (5), (6) und (7) sind *Bilanzgleichungen* für offene thermodynamische Systeme in einem differentiellen Zeitbereich dt. Aus ihrer Integration 1→2 resultieren die Bilanzgleichungen für den integralen Zeitbereich $\Delta t = t_2 - t_1$. Für einfache thermodynamische System $i = 1$ reduziert sich der Term $\sum dW_{rev. i} \rightarrow (-pdV)$.

Jegliches energetische Geschehen in Natur, Technik und Gesellschaft unterliegt elementaren Gesetzmäßigkeiten: dem *bilanzierenden Energieprinzip* und zugleich dem „regierenden“ *Entropieprinzip*, dem ersten und zweiten Hauptsatz der persistenten Physik, und damit dem *Exergieprinzip*.

Tabelle 1: Energie-Begriff, fundamentale Relationen und Gesetzmäßigkeiten

krement von Prozessgrößen (wie Wärme-, Stoffmengen, Arbeiten) bezeichnet ‚ \dot{d} ‘ deren, auf äußere und/oder innere Systemgrenzen bezogenen Importe (Zufuhren) beziehungsweise Exporte.

Aus dem Grundsätzlichen folgt speziell für *infinitesimale Wärmemengen* und geschlossene thermodynamische Systeme (das heißt: $\dot{d}_e m_k = 0$ und $m = \sum m_k = \text{const.}$) bei *reversibler Prozessführung* (das heißt nach dem 2. Hauptsatz der Physik $\dot{d}_i S = 0$ und $dS = \dot{d}_e S$): $\dot{d}Q_{rev.} = T \cdot \dot{d}_e S = T \cdot dS$.

Solche inkrementellen Wärmemengen werden mit der Trias der graphisch hervorgehobenen Gleichungskette erfasst. Obwohl es sich dabei um einen zweifach gravierend eingeschränkten (Reversibilität, Massenkonstanz) Spezialfall handelt, wird die Beziehung $\dot{d}Q_{rev.} = T \cdot dS$ leider nicht selten, fälschlicherweise und ideell behindernd, als Definitionsgleichung der Zustandsgröße Entropie S beschrieben. Allein schon für $\dot{d}_e S$ existiert neben dem Wärmetransport der Stofftransport prinzipiell als Realisationsvariante. Die das Wesen des 2. Hauptsatzes formende Irreversibilität $\dot{d}_i S > 0$ wird mit der festgelegten Prämisse $\dot{d}_i S = 0$ vorsätzlich ausgeschlossen. Unter dem Stichwort Entropie sind in der Tabelle 2 die komplexen Sachverhalte umfassend erörtert. Richtig ist, dass sich reversibel übertragene Wärmemengen unter den diskutierten Bedingungen aus dem Produkt der obwaltenden thermodynamischen Temperatur T

[K-Kelvin] und der auf diesem Niveau importierten/-exportierten infinitesimalen Entropie(menge) $\dot{d}_e S = dS$ ergeben. Dabei gilt die praktisch bedeutende Beziehung $T = \theta + 273,16$ mit der empirischen Temperatur θ [Grad Celsius], für Temperaturdifferenzen $\Delta\theta$ sowie $[\Delta\theta] = K$. Die im integralen Zeitbereich $\Delta t := \int dt$ während der Zustandsänderung $1 \rightarrow 2$ reversibel bei $T = \text{const.}$ übertragene endliche (integrale) Wärmemenge beträgt $Q_{12} = T \cdot (S_2 - S_1)$. Die maximale technische Arbeitsfähigkeit – die Exergie der Wärmemenge E_Q – resultiert aus $E_Q = (1 - T_U/T) \cdot Q_{12}$ mit dem Carnot-Faktor $\eta_C = (1 - T_U/T)$ als Effizienzmaß. Die Anergie der Wärmemenge – ihr nicht arbeitsfähiger Anteil – ergibt sich aus $B_Q = (T_U/T) \cdot Q_{12}$. Bei $T = T_U$ hat offenkundig jede beliebig große Wärmemenge keine Arbeitsfähigkeit. Theoretisch vertiefte Klarstellungen und Einsichten, die über das im Haupttext Dargestellte hinausreichen, lassen sich aus den Tabellen 1 bis 3 gewinnen, die fundamentale Relationen und Gesetzmäßigkeiten der jeweiligen physikalischen Grundbegriffe (Energie, Entropie, Exergie) aufzeigen.

Der zweite Komplex des präzisierenden Diskurses betrifft jene mit ‚latente Wärmen‘ beziehungsweise ‚Umwandlungswärmen‘ apostrophierten, bei $p = \text{const.}$ und $T = \text{const.}$ ablaufenden *variantenreichen Phasenreaktionen*, die der thermischen Speicherung zugute kommen können. Für derartige isobar-isotherme Phasenumwandlungen,

Entropie (εντροπη – 1865 R. Clausius): fundamentale physikalische Kategorie, zur Energie komplementäre, unter mathematischer Zuhilfenahme von T als Eulerschen Multiplikator, *systemkonform konstruierte*, extensive (mengenabhängige) physikalische Größe S . Sie erfüllt phänomenologisch zwei Grundfunktionen: *Wertmaß* (Quantum einer bestimmten Qualität – Verfügbarkeit, Wandlungspotential) und *Prozessindikator* (indiziert und bewertet Prozessmodalitäten – ihren reversiblen, quasistatischen und irreversiblen *Charakter*, ihre *Richtung* und die *Intensität/Geschwindigkeit* der Änderungen in Raum und Zeit).

S gehorcht Bilanzgleichungen: Zeitbereichsbilanzen ($dt, \Delta t$) bzw. Zeitpunktbilanzen ($dt \rightarrow 0$) vom Prototyp:

Inhaltsänderungen = *Änderungsursachen*: = *Zufuhren* + *Erzeugungen*

(*Zustandsgrößen*) (Prozessgrößengruppen)

Aus den *Zufuhren* (Importen) und *Erzeugungen* (Zunahmen) im differentiellen Zeitbereich dt resultieren für einen Zeitpunkt $dt \rightarrow 0$ *Ströme und Produktionen* als Prozessgrößen.

Für einen differentiellen Zeitbereich dt gilt: $dS = \dot{d}_e S + \dot{d}_i S$

Im wesentlichen Unterschied zur *differentiellen Änderung* dS der Zustandsgröße S sind $\dot{d}_e S$ und $\dot{d}_i S$ Diminutive mit dem Inkrement \dot{d} .

Die *inkrementelle Prozessgröße* $\dot{d}_e S$ bilanziert die Entropieänderungen infolge phänomenologisch realer Wärme- und Stofftransporte ($\dot{d}Q \neq 0, \dot{d}_e m_k \neq 0$) – also externe Einflüsse: äußerer Einwirkungen und Auswirkungen mit charakteristischen Mechanismen an freien und/oder permeablen Grenzflächen. In einem differentiellen Zeitbereich dt gilt:

$\dot{d}_e S = \dot{d}Q_{rev.}/T + \sum s_k \cdot \dot{d}_e m_k = m \cdot (\dot{d}q_{rev.}/T + \sum s_k \cdot \dot{d}_e \xi_k)$

[s_k – partielle spezifische Entropie der Komponente k]

Die $\dot{d}_e S$ nehmen als Entropieimport bzw. Entropieexport positive bzw. negative Werte an.

$\dot{d}_e S = 0$ indiziert den Sonderfall thermisch isolierter geschlossener Systeme ($\dot{d}Q = 0, \dot{d}_e m_k = 0$) – die adiabatische Prozessführung.

Für einen Zeitpunkt resultieren *Strombilanzen* mit *vektoriellen Strömen* J_ω und dem Einheitsvektor κ . Die Vektoranalysis definiert zur klassisch-thermodynamischen Konvention invertierte Vorzeichen. Zu bilanzieren sind für die Wärme: $J_{h(eat)} = -\kappa \cdot (dQ/dt)$, für die Stoffkomponenten k : $J_k = -\kappa \cdot (d_e m_k/dt)$, für die Entropie: $J_s = -\kappa \cdot (d_e S/dt)$ und damit: $J_s = (1/T) \cdot J_h + \sum s_k \cdot J_k$, sowie $J_s = 0$ im Sonderfall der Adiabasie.

Die *inkrementelle Prozessgröße* $\dot{d}_i S$ erfasst systeminterne Ursachen (Index i) der Entropieänderung, die Entropieerzeugung infolge irreversibler (natürlicher) Prozesse, wie *dissipativer Effekte* (z. B. Reibungseffekte, Bewegungsvorgänge, Elektronentransport in Leitern, stoffliche Konversionen-Reaktionen) und alle natürlichen *Ausgleichsprozesse* in Feldern – wie die prototypische Wärmeleitung, die Diffusion etc. Die Entropieerzeugung natürlicher (irreversibler) Prozesse bildet eine ‚Kernaussage‘ des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik/Physik – eines *allgemeines Naturgesetzes*. Diese Entropieerzeugung vermindert gesetzmäßig die ‚Umwandelbarkeit‘ (freie Verfügbarkeit) der am Prozess beteiligten Energien: der Energieanteile und Energieformen- bewirkt deren Degradation, Dissipation. Unter bestimmten System- und Umgebungsbedingungen wirkt indes ein zweiter, ein *konstruktiver Aspekt des Entropieprinzips* – die *aktive und passive Strukturbildung*. Fern ab vom thermodynamischen Gleichgewicht, im *Nichtgleichgewicht offener Systeme*, kann die Kooperation von Subsystemen infolge der Selbstorganisation auf makroskopischen Skalen neuartige räumliche, zeitliche oder funktionale Strukturen kreieren.

Bei relativer Gleichgewichtsnähe gilt in einem differentiellen Zeitbereich dt : $\dot{d}_i S = 1/T \cdot (dW_{diss.} - \sum \mu_k \cdot d_i m_k) = m/T \cdot (dW_{diss.} + \sum \mu_k \cdot d_i \xi_k)$

Die *inkrementelle Entropieerzeugung* $\dot{d}_i S$ bzw. in Zeitpunktbilanzen die Entropieproduktion $\sigma := \dot{d}_i S/dt$, sind für irreversible Prozesse *per definitionem* positiv definit: $\dot{d}_i S > 0, \sigma > 0$. Im theoretischen Grenzfall der unendlich langsam über eine unendliche Folge von Gleichgewichten (im ‚währenden‘ Gleichgewicht, also real nicht ablaufenden, in diesem Sinn fiktiven Transformationen), nimmt sie für die damit definierten reversiblen (und quasistatischen) Prozesse, vereinbarungsgemäß den Wert Null an $\dot{d}_i S = 0, \sigma = 0$.

Tabelle 2: Entropie-Begriff, fundamentale Relationen und Gesetzmäßigkeiten

Exergie ($\epsilon\xi$ - $\epsilon\rho\gamma\omega$ – 1956 Z. Rant), exergy, availability, utility, l'énergie utilisable, работo-способность: Qualitätsmaß der Energien, arbeitsfähige (freie, unbeschränkt wandelbare) Energie- unter reversiblen Bedingungen beim Potentialausgleich Γ_j - Γ_j , $U=0$ mit der Umgebung maximal gewinnbare, beim Potentialaufbau minimal aufzuwendende technische Arbeit, fundamentale natur- und technikkwissenschaftliche, mit ökonomischen Kategorien kombinierbare Zustandsgröße 2. Art (\rightarrow totale Differential-Gleichung (7) in der Tab. 1).

Methode: Analyse und Bewertung von komplexen Systempaaren-emergenten Ganzheiten $E = \{\Sigma, \Sigma_U\}$ – aus dem zu evaluierenden offenen „Kernsystem“ Σ (einem Teilsystem unterschiedlichster physikalischer und chemischer Struktur) und dem gleichrangigen Referenzsystem Σ_U im inneren (u. U. im gehemmten) Gleichgewicht. Σ interagiert reversibel (quasistatisch) mit Σ_U stofflich, energetisch sowie informationell. Σ_U bildet per definitionem ein Reservoir quasi unendlicher Extension: ein System mit festliegenden (natürliche Umgebung) oder zweckmäßig festgelegten (Modellumgebung) intensiven Parametern $\Gamma_j, U = \text{const.}$, wie $l_{i,U}$ (speziell p_U), $T_U, \mu_{k,U}$.

Das *Exergieprinzip* vereint, als Synthese aus dem Energie- und Entropiesatz mit korporierter Umgebung, praktikabel und anschaulich die Aussagen beider Hauptsätze, bilanziert die maximale technische Arbeitsfähigkeit unter definierten Umgebungsbedingungen. Für die Zustandsgröße gilt:

Exergie := Energie(differenz) – Anergie(differenz).

In einen differentiellen Zeitbereich dt folgt für die Exergie der Enthalpie (beachte in Tab. 1 Gl. (7)):

$dE = \dot{d}_e E + \dot{d}_i E = dH - T_U \cdot dS$ mit $\dot{d}_e E = dH - T_U \cdot \dot{d}_e S$ (bei Reversibilität) sowie dem *Exergieverlust*:

$\dot{d}_i E = -T_U \cdot \dot{d}_i S$ bzw. in Strombilanzen mit der Exergieextermination $\epsilon := \dot{d}_i E / dt = -T_U \cdot \sigma$.

Die Exergieverluste $\dot{d}_i E$ bzw. ϵ sind gesetzmäßig über das negative Vorzeichen und den Proportionalitätsfaktor Umgebungstemperatur mit der Entropieerzeugung/Entropieproduktion korreliert.

Aus der prototypischen Bilanzgleichung sind über Substitutionen mit beiden in ihr vereinten Hauptsätzen der Physik sowie mit dem Satz der transformierten thermodynamischen Potentiale, mittels des Übergangs zu Strombilanzen und Integrationen, adäquat prozessbeschreibende Funktionen herzuleiten.

Tabelle 3: Exergie-Begriff, fundamentale Relationen und Gesetzmäßigkeiten

zum Beispiel flüssig(l) \rightarrow gasförmig(v) (Index lv), gelten unter Siedebedingungen $T = T_s(p_s)$; $(Z) \rightarrow (Z'')$ mit $Z: U, H, S$, die thermodynamischen Relationen: $\Delta_{lv} H = T \cdot \Delta_{lv} S = T \cdot (S_v - S_l) = T \cdot (S'' - S') = Q_{lv}$.

Die numerische Gleichheit mit dem letzten Term in der Gleichungskette erklärt die kurschlüssige Bezeichnung der ursächlichen – prozessspezifischen und stoffabhängigen [spezifischen/molaren] – Umwandlungsenthalpie: $\Delta_T H = m \cdot \Delta_T h$ (Index T-Transformation) mit dem Synonym Verdampfungswärme. Neben dem Verdampfen/Kondensieren beinhaltet die allgemeingültige Aussage physikalische Transformationen (Phasenwechsel), wie die Prozesspaare Schmelzen/Erstarren, Desublimieren/Sublimieren, Lösen/Kristallisieren, Desorbieren/Sorbieren [Physisorption], reale Mischungsvorgänge (Index M): $\Delta_M H$, Modifikationsübergänge stofflicher Strukturen und chemische Reaktionen: $\Delta_R H = \Delta_R U + p \cdot \Delta_R V$ (Index R – Reaktion, die Chemisorption inklusive, wobei die Grenzen zwischen der Physi- und Chemisorption fließend sind). Die eingefügten opportunen mathematischen Beziehungen spiegeln wesentliche thermodynamische Differenzierungen wider, die das theoretische und praxisorientierte Verständnis begünstigen.

1.2.2 Energie- und Wärmeströme – Vermeintliches, Vorgebliches und Faktisches

Der Energie- und Stofftransport (und demzufolge der Entropie-transport) vollziehen sich in Raum und Zeit als Strom. In der

Natur und der Technik/Technologie treten diese (und andere mengenartige Transportgrößen ω , darunter Informationen und Bewegungsgrößen) als charakteristische vektorielle Ströme $J_\omega = -\kappa \cdot (d_\omega / dt)$ oder als Stromdichten j_ω in Erscheinung, die auf die Kontroll- beziehungsweise realen Kontaktflächen normiert sind. $j_{\omega,i} := -\dot{d}\omega / (dA_i \cdot dt)$ repräsentiert die Vektorkomponente i der Stromdichte von ω und dA_i ein nach außen, parallel zum Lot, gerichtetes Oberflächenelement.

Speziell für die Wärmeströme und die Vektorkomponente i der Wärmestromdichte folgen:

$J_h := -\kappa \cdot (dQ / dt)$ und $j_{h,i} := -\dot{d}Q / (dA_i \cdot dt)$ [κ -Einheitsvektor]

Die negativen Vorzeichen in den Definitionsgleichungen für die vektoriellen Wärmeströme J_h ($h = \text{heat}$) und für die Vektorkomponenten $j_{h,i}$ der Wärmestromdichte des Oberflächenelementes dA_i , resultieren aus der entgegengesetzten Vorzeichenkonvention der Thermodynamik und der Vektoranalysis. Vektoranalytisch tragen alle nach außen gerichteten Ströme das positive Signum, während die phänomenologische Thermodynamik alle Exporte (Abfahren) negativ bilanziert.

Im Hinblick auf die Kinetik der Transportprozesse werden Wärmeleitung (*cond.*), -übergang (*conv.*) und -strahlung (*rad.*) angeführt. Der praktisch herausragende *Wärmedurchgang* von einem Fluid durch ein- oder mehrschichtige feste Wände unterschiedlichster Geometrie und Nutzungsstruktur, etwa Bauwerke und Wärmeübertrager (Rekuperatoren), zu einem zweiten Fluid, ist ein komplexes kinetisches Phänomen aus Übergängen und Wärmeleitung.

Diese faktischen Energietransporte resultieren aus Temperaturunterschieden dT und ΔT sowie Temperaturfeldern $\text{grad}T = \nabla T$. Sie fungieren als ‚Triebkraft‘ der Ausgleichsprozesse in Richtung des thermischen Gleichgewichts. Solche Transportprozesse behandelt die Thermodynamik irreversibler Prozesse (TIP). In der Tabelle 4 sind ihre Kinetik sowie einige grundlegende phänomenologische Beziehungen dargestellt und anwendungsbezogen systematisiert. Die verschiedenartigen, im Allgemeinen orts- und zeitabhängigen Ströme (beziehungsweise Stromdichten j_h) sind in Bezug auf die Transportmodi additive Leitungs-, Konvektions-, Strahlungsphänomene und deren Kombinationen beziehungsweise Kopplungen.

$$j_{h,\text{ges.}} = j_{h,\text{cond.}} + j_{h,\text{conv.}} + j_{h,\text{rad.}}$$

Einzig der masselose Transport (*cond.*) bei der Leitung in Festkörpern (infolge ortsfester gekoppelter Molekül-Schwingungen) ist tatsächlich ein echtes *Wärmetransportphänomen*. Schon in elektrisch leitenden Metallen überlagert sich diesem Modus ein energieüberführendes bewegtes Elektronenensemble.

Konvektion (*conv.*) (vom lateinischen *convehō* ‚zusammenbringen‘, ‚mittragen‘) bedeutet Mitführung von Energie ($U, H, E_{\text{kin.}}$) in bewegten Massenelementen ($m = \text{const.}$), das heißt – nach ihren Ursachen geordnet – natürliche [freie] oder erzwungene Strömung. Sie ist ein in Natur und Technik/Technologie dominierender ubiquitärer Transportprozess. Lediglich die Modellierung des konvektiven Wärmetransportes in der Grenzschichttheorie als Wärmeleitung spräche für die herkömmliche Bezeichnung.

Die sogenannte ‚Wärmestrahlung‘ (*rad.*) durchbricht den Definitionsrahmen der ‚Wärme‘ vollständig. Sie ist ein elektromagnetisches Phänomen, eine *Strahlungswechselwirkung von Körpersystemen*: räumlich einander zugeordneten und interagierenden Sendern sowie Empfängern. Neben der Orts- und Zeitabhängigkeit unterliegt sie, den für elektromagnetische Strahlungen typischen spektralen Verteilungen der Wellenlängen λ [m, nm] beziehungsweise Frequenzen $\nu = c/\lambda$ [Hz]. Die elektromagnetische Strahlung breitet sich mit der Lichtgeschwindigkeit c aus, die im Vakuum circa $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ beträgt. Damit liegt sie um circa zehn Größenordnun-

Die im Allgemeinen orts- sowie zeitabhängigen und kinetisch differenzierten Energieströme (bzw. Energiestromdichten), die – wie im Haupttext kritisch erörtert- in praxi insgesamt als Wärmeströme, bzw. Wärmestromdichten j_h bezeichnet werden, sind hinsichtlich der Transportmodi additive Leitungs-, Konvektions-, Strahlungsphänomene und deren Kombinationen.

$$\vec{j}_{h,ges.} = \vec{j}_{h,cond.} + \vec{j}_{h,conv.} + \vec{j}_{h,rad.}$$

In der Schreibweise der Thermodynamik irreversibler Prozesse (TIP) gelten für die ‚Wärmetransportprozesse‘ (h[eat]) mit den thermodynamischen Kräften $X_{h,a}$, den konjugierten phänomenologischen Koeffizienten L_{hh} und den Wärmestromdichten $j_h \equiv \vec{j}_h$ die linearen phänomenologischen Strom(dichte)-Kraft-Relationen:

$$\vec{j}_h = L_{hh} \cdot \vec{X}_h$$

und für die Entropieproduktion:

$$\sigma_S = \vec{j}_h \cdot \vec{X}_h = L_{hh} \cdot X_h^2$$

Die nachfolgende Tabelle bildet Einzelheiten für die fundamentalen Transportphänomene: ihre Transportgesetze, thermodynamischen Kräfte, phänomenologischen Koeffizienten und Entropieproduktionen ab. Die Aussagen vereinen empirische Transportgesetze mit dem 1. und 2. Hauptsatz der Physik.

| Thermodyn. Größe Transportmodus (a) | $\vec{j}_{h,a}$ [W·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 (rad.) von Körpersystemen 1/2 | $\varepsilon_{12} \varphi_{12} \sigma_{max} \Delta T^4$ $\alpha_{rad.} \cdot \Delta T^4$ | $\frac{1}{T^5} \Delta T^4$ | $\alpha_{rad.} \cdot T^5$ | $\frac{1}{A} \frac{d_i S}{dt} = \alpha_{rad.} \frac{(\Delta T)^4}{T^5}$ |

Dabei gelten: $\Delta T = T'' - T'$ mit $T'' > T'$ sowie $T_m = \left[\frac{1}{4}(T_1^3 + T_1^2 T_2 + T_1 T_2^2 + T_2^3) \right]^{1/3}$ mit $T_1 > T_2$ und für die empirischen Transportkoeffizienten (Funktionalgrößen α , Stoffgrößen λ):

$\alpha = \frac{\lambda_{fluid}}{\delta_n(\text{Strömungsverh.})}$ – Wärmeübergangskoeffizient (W m⁻² K⁻¹)

$\alpha_{rad.} = \varepsilon_{12} \varphi_{12} \sigma_{max}$ – Wärmestrahlungskoeffizient (W m⁻² K⁻⁴)

λ – Wärmeleitkoeffizient (W m⁻¹ K⁻¹)

mit δ – Grenzschichtdicke, A-Fläche, φ_{12} – mittlerer Winkelkoeffizient (A_1/A_2),
 ε_{12} – resultierendes Emissionsverhältnis der Strahlungswechselwirkung der Flächen A_1/A_2 ,
 $\sigma_{max} = 5,6705 \cdot 10^{-8}$ Wm⁻²K⁻⁴ Stefan-Boltzmann-Konstante.

Tabelle 4: Energieströme- Definitionen, fundamentale Beziehungen und Gesetzmäßigkeiten

gen über den Werten der – kinetisch gänzlich von ihr zu unterscheidenden – Wärmeleitung in Festkörpern. Im „Teilchenbild“ des Welle-Teilchen-Dualismus gilt für die transportierte Energie $E=h \cdot \nu$ mit dem Planck'schen Wirkungsquantum h .

Der Bereich zwischen dem sichtbaren Licht und der Terahertzstrahlung mit Wellenlängen von 10^{-3} m bis $7 \cdot 10^{-7}$ m, das heißt dem Frequenzspektrum $3 \cdot 10^{11}$ Hz $\leq \nu \leq 4 \cdot 10^{14}$ Hz (das sind vergleichsweise 1333 Oktaven), wird als Infrarotstrahlung IR bezeichnet.

Die Temperatur der IR-Strahlung entspricht der Temperatur des Körpers, mit dem sie im thermischen Gleichgewicht steht. Daher wird sie auch Temperaturstrahlung genannt. Natürliche Phänomene liegen meistens im Temperaturintervall $3 \text{ K} \leq T \leq 2 \cdot 10^4 \text{ K}$.

Die Klassifizierung der Phänomene kann nach ihren Frequenzen/Wellenlängen oder den zuordenbaren thermodynamischen Temperaturen erfolgen. Üblich sind die Klassen IR-A:780-1400nm, IR-B:1,4·10³-3·10³nm, IR-C:3·10³-10⁶nm (mit dem mittleren und fernen IR) MIR: 3·10³-50·10³nm (‚irdische‘ Temperaturen von 1000K bis 60K), FIR:50·10³-10⁶nm (60 K bis zur kosmischen 3 K-Strahlung).

1.3 Technisch-technologische Aspekte der Nutzung thermischer Energien

Thermische Energien werden technologisch mit substantiellen Energieträgern in allen (aus verfahrenstechnischen Gründen dominierend aber fluiden, in der Mehrheit flüssigen [l] und/oder gasförmigen [v]) Aggregatzuständen in einem qualitätsbestimmenden, breiten Temperaturintervall eingesetzt. Das sind unter anderem Warmwasser, Heißwasser ($\theta > 60$ Grad Celsius), Dampf, Raumwärme, Prozesswärme, Prozesskälte und zunehmend Klimatisierungskälte.

Die Zielenergien der zweiten Stufe in der Energiewandlungskette (mit dem Wirkungsgrad η_{II}) sind *prozesswirksame Nutzenergien*: kinetische Energie, elektromagnetische Strahlung (darunter sichtbares Licht), Kälte (als Sonderfall), verschiedenartige *thermische Energie* in unterschiedlichen Mengen mit stark divergierenden Temperaturen T und lokalen T-Maxima im industriellen Nutzungsspektrum.

Die *exponierte Energieform Wärme* hat in der Energetik als transiente, wegabhängige und damit technologisch beeinflussbare physikalische *Prozessgröße* eine *ambivalente Stellung*. Einerseits kommt der Wärme (und der Kälte) in thermischen Ausgleichs- und Transportprozessen – als intern äquilibrierenden beziehungsweise zu- und abzuführenden Wärmeströmen – eine überragende Bedeutung für alle thermischen Prozesse der Erwärmung, der Abkühlung ohne und mit Phasenreaktionen zu.

Andererseits ist sie ein – in Grenzen zu haltendes, zu optimierendes – naturgesetzliches (einer Wärmezufuhr äquivalentes ∞) Ergebnis jeglicher Dissipation infolge der Irreversibilität natürlicher und technischer Prozesse: $dW_{diss.} = T \cdot d_i S \propto dQ$. Selbst thermische Energie (T·S) wird naturgesetzlich dissipiert, unterliegt der Degradation. Ausdruck dafür sind die Reduzierung ihrer Arbeitsfähigkeit, der Exergie der Wärmemenge: $dE_{(Q)} = (1 - T/T_U) \cdot dQ_{rev.}$ und deren Transformation in Anergie: $dB_{(Q)} = (T/T_U) \cdot dQ_{rev.}$

Die exergetische Betrachtungsweise und Exergiebilanzen (vgl. Tabelle 3) sind für die thermische Energie vorzüglich geeignete und aussagefähige Instrumentarien. Das betrifft besonders die *Nutzenergien* Raumwärme, Prozesswärme, Prozesskälte und die Klimatisierungskälte. Solche exergetischen Analysen belegen, dass ‚Wärme‘ in Deutschland gegenwärtig zu verschwenderisch gewonnen und angewendet wird.

Von den circa 9.000 PJ/a Gebrauchsenergie (Endenergie) werden 26 Prozent für die Erzeugung von Raumwärme, 23 Prozent für sonstige Prozesswärme und 5 Prozent für die Warmwasserbereitung eingesetzt. Das sind in der Gebrauchsenergiestufe der Wandlungskette 4860 PJ thermische Energie. Beim Einsatz als Nutzenergie reduzieren sich diese Energiemengen naturgesetzlich, aber technologisch optimierbar, wegen des Umwandlungswirkungsgrades η_{II} .

Die *privaten Haushalte* haben einen Anteil von 28,6 Prozent an der insgesamt eingesetzten *Gebrauchsenergie*. Nach AGEb-Angaben benötigen sie 30,4 Prozent ihres *Gebrauchsenergiebedarfs* für die Erzeugung von *Raumwärme*, 20,6 Prozent für sonstige *Prozesswärme*, 4,7 Prozent für die *Warmwasserbereitung* und 2 Prozent für den Einsatz als *Kälte*, also summarisch 1485 PJ für *thermische Energien* in der *Gebrauchsenergiestufe* der *Wandlungskette*.

Die *Industrie* benötigt – bei einem Anteil von 27,9 Prozent am gesamten *GE-Verbrauch* – 64 Prozent ihres *Gebrauchsenergiebedarfs*, das heißt 1607 PJ/a, allein für die Erzeugung von *Prozesswärme* in einem auffallend breit gefächerten *Temperaturintervall* bis circa 1800K. Das ist ein gravierender qualitativer Unterschied zu der in *privaten Haushalten* vorzugsweise genutzten *Niedertemperaturwärme* $\theta \leq 100$ Grad Celsius.

Die Daten der *Tabelle 5* beziehen sich auf die *Mengen thermischer Energie* im angegebenen *Temperaturintervall* in *Petajoule*. Der *Carnotfaktor* $(T-T_U)/T$ charakterisiert die *Qualität* der bei *T* reversibel übertragenen *Wärmemenge* Q_{12} , deren *Exergie* $E_Q = [(T-T_U)/T] \cdot Q_{12}$.

Die *Tabelle 5* bietet mit $E_Q = \eta_c \cdot Q_{12}$ Hinweise auf *potente Quellen* der *Abwärmenutzung*, wie der ‚*Abwärmeverstromung*‘, der *thermischen Regeneration* und *effektive Einsatzmöglichkeiten* für *Wärmepumpen*.

Koppelproduktionen (etwa *Kraft-Wärme-Kopplung/KWK*) und *regenerative Wärmenutzung* erweisen sich als *effizienz- und rentabilitätssteigernde Verfahrensprinzipien*.

Auch die von der *Energiewende* zumindest begünstigte, wenn nicht sogar *faktisch* *aufgenötigte*, *aufkommensnahe Wärmeversorgung* mit *Fern- und Nahwärmesystemen* führt zur *deutlichen thermoökonomischen Effizienzsteigerung* und zur *gewichtigen Ressourcenschonung*.

2 Übersicht über thermische Speicher

In der *Tabelle 6* sind die *thermischen Speicher* nach ihrem *Wirkprinzip* klassifiziert.

Die *Energiedichte* steigt von den *kapazitiven (sensiblen)* über die *transformativen (latenten)* bis zu den *thermochemischen Speichern*. Die *kapazitiven Speicher* verkörpern derzeit den *höchsten Entwicklungsstand*, und sie zeigen die *größte anwendungsbedingte Vielfalt*.

Einen *hilfreichen Überblick* über die *Wärmespeicherung* geben zum Beispiel *Peter Schossig* und *Thomas Haussmann* [7].

3 Ausführungsbeispiele thermischer Speicher

3.1 Kapazitive Speicher

Kapazitive Wärmespeicher sind die am häufigsten eingesetzten *thermischen Speichertypen*. Sie verändern charakteristischerweise

| Technologisches Temperaturintervall | Menge (Nutzungen) thermischer Energie | Carnotfaktor η_c (Bezugstemperatur) |
|---|---|--|
| 100–200 °C | 280 PJ/a (diverse industrielle und gewerbliche Betriebe) | 0,36 ($T_{OB.}$) |
| 800–900 °C | 151 PJ/a (chemische Industrie, Steine/Erden ...) | 0,73 (T_m) |
| 1400–1500 °C | 396 PJ/a (Stahl/Eisen, NE-Metalle, Steine/Erden ...) | 0,82 (T_m) |
| Anmerkungen: $T_{OB.}$ – obere Temperatur des Temperaturintervalls, T_m – arithmetisches Mittel des Temperaturintervalls. 1PJ = 10^{15} J = 278 GWh | | |

Tabelle 5: Lokale Temperaturmaxima und thermodynamische Gegebenheiten beim technologischen Einsatz thermischer Energie in Deutschland.

während der *Be- und Entladung* ihre *thermodynamische Temperatur*.

$$T = \left(\frac{\partial U}{\partial S} \right)_{V, m_k}$$

Kapazitive Speicher können *direkt* oder *mittels der Wärmeübertrager* *indirekt be- und entladen* werden. Dafür existieren *mehrere ausgereifte Bauformen* der *Apparate*.

Beim *Beladen* wird dem *System Wärme* *zugeführt* und damit das *Speichermedium* der *Wahl* auf ein *höheres Temperaturniveau*, demzufolge ein *höheres Energie- und Exergieniveau* befördert. Dieser *Prozess* manifestiert sich in der *steigenden inneren Energie* $\Delta U > 0$ beziehungsweise der (in der *Praxis* bei $p = \text{const.}$ favorisierten) *Enthalpieänderung* $\Delta H > 0$, die diese *Zustandsänderung* quantifizieren. Beim *Entladen* wird der *Prozess* infolge des *Wärmeentzugs* (*Entropieexports*) *umgekehrt*.

Die *Kapazität* des *Speichers* hängt ab von der *Masse* $m = \sum m_k$ des *Speichermediums* und dessen *spezifischer Wärmekapazität* $c_V(T)$ beziehungsweise $c_p(T)$. Zu beachten sind für *mehrkomponentige Stoffsysteme* die *Beziehungen* $c = \sum \xi_k c_k$ mit den *Masseanteilen* $\xi_k = m_k/m$.

Zwischen dem *Speichermedium* des *Systems* und seiner *thermodynamischen Umgebung* besteht eine *Temperaturdifferenz*, die

| Speicherart | Wirkprinzip | Ausführungsform | Einsatzgebiet | |
|-----------------------------------|--|--|--|---------------------------------|
| Kapazitive (sensible) Speicher | Temperaturänderung des Speichermediums, $\Delta H = m \cdot c_p \cdot \Delta T$ ($p = \text{const.}$) | Heißwasserspeicher | Kurzzeitspeicher | |
| | | Druckspeicher | Kurzzeitspeicher | |
| | | Kies-Wasser-Wärmespeicher | Langzeitspeicher | |
| | | Erdsonden-Wärmespeicher | Saisonaler Langzeitspeicher | |
| | | Aquifer-Wärmespeicher | Saisonaler Langzeitspeicher | |
| | | eTank | Kurzzeitspeicher saisonaler Langzeitspeicher | |
| Transformative (latente) Speicher | Umwandlungsenthalpien beim Phasenwechsel (T) auf unterschiedlichsten Temperaturniveaus $\Delta TH = m \cdot \Delta T h$ der Phasenwechselmaterialien (anorg. und organ. PCM) | Wasser (s,l,v) | Kurzzeitspeicher (z. B. Wärmetransportwagen) Langzeitspeicher | |
| | | Paraffine | | |
| | | Zuckeralkohole | | |
| | | Salzhydrate, wie Natriumacetat-Trihydrat, etc. | | |
| Thermochemische Speicher | Nutzung der Chemisorptionsenthalpie | Zeolithe | Kurzzeitspeicher Langzeitspeicher | |
| | | Silicagel, etc. | | |
| | | Chemische Reaktionen(R) (reversibel, $p, T = \text{const.}$) $\Delta RH = \Delta RG + T \cdot \Delta RS$ Reaktionsenthalpie | | Calciumoxid/ Calciumhydroxid |
| | | Calciumoxid/ Calciumcarbonat | | |
| | | Natriumhydroxid/ Natronlauge | | |

Tabelle 6: Ausgewählte Speichersysteme für thermische Energie



Abbildung 1: Kapazitiver Wärmespeicher der Stadtwerke Rheinsberg GmbH mit einer Speicherkapazität von maximal 25 MWh bei einer maximalen Wassertemperatur von 96 Grad Celsius. Effektives Speichervolumen 716 Kubikmeter.



Abbildung 2: Bankgebäude Raiffeisenbank in Chateau d'Oex, Schweiz (Baujahr 2009). 2-geschossiger Flachbau in Massiv- und Holzbauweise, Vollkeller. Beheizte Fläche 740 Quadratmeter; Heizlast 17 kW; Solar-Hybridanlage Gesamtgröße 86 Quadratmeter; Erdwärmespeicher eTank 340 Kubikmeter der deematrix Energiesysteme GmbH Fürstenwalde. Das Gesamtsystem arbeitet unter Verwendung einer Wärmepumpe nach der offenen, oszillierenden Pufferspeichertechnik (ooPS©), einer Entwicklung der eZeit Ingenieure GmbH, Berlin. (Animation: eZeit Ingenieure GmbH, Architektur: architecum GmbH, Foto: A. Gempeler)

sich über Zehnerpotenzen erstrecken kann. Daraus ergeben sich die Notwendigkeiten einer guten Isolierung bis Superisolierung der Speicher gegenüber ihrer Peripherie, der unmittelbaren Umgebung, und ein – von der Bauform abhängiges – zu optimierendes Verhältnis von Oberfläche und Volumen.

Als Speichermedien lassen sich vor allem nutzen:

- Wasser (s,l,v), wässrige Salz-Lösungen
- Thermoöle (Mineralöle, Synthetiköle, Bioöle)
- Salzschnmelzen, eventuell makroverkapselt (für verschiedene Temperaturbereiche)
- Kies, Sand (auch mit Wasseranteilen),
- Granit, Basalt
- Beton,
- Ziegelstein, Schamotte
- Metalle (Eisen, Stahl, flüssige Metalle)

Die meist eingesetzten kapazitiven Speicher sind Heißwasserspeicher im Temperaturbereich bis $\theta=100$ Grad Celsius. Sie dienen in Wärmenetzen zum Ausgleich von Bedarfsspitzen, werden aber zunehmend auch wichtig, um die Wärmeversorgung bei stromgeführten KWK-Anlagen zu sichern.

Als aufschlussreiches Beispiel für einen energietechnisch genutzten Heißwasserspeicher wird hier der Wärmespeicher der Stadtwerke Rheinsberg GmbH angeführt. Er ist parallel in das Fernwärmenetz eingebunden und weist eine Speicherkapazität von maximal 25 MWh bei der maximalen Wassertemperatur von 96 Grad Celsius auf. Der Betriebsdruck beträgt 2 bar. Dieser Speicher hat einen Durchmesser von 7,2 Meter und eine Höhe von 21 Meter. Bei einem Bruttowasservolumen von 825 Kubikmeter verfügt er über ein effektives Speichervolumen für Heißwasser von 716 Kubikmeter. Der Speicher kann gleichzeitig zur Druckhaltung im Fernwärmeversorgungssystem dienen. Die Mineralwolleisolierung hat eine Dicke von 150 Millimeter. Hersteller des 1993 errichteten Speichers war die Jørgen Bladt A/S, Aalborg, Dänemark.

Eine besondere Ausführungsform eines kapazitiven Wärmespeichers ist der als Erdwärmespeicher konzipierte eTank der deematrix Energiesysteme GmbH aus Fürstenwalde [8]. Im Speicher wird Wärme aus Solarthermiemodulen und anderen Abwärmquellen bis zur Nutzung zwischengespeichert. Das Gesamtsystem arbeitet unter Verwendung einer Wärmepumpe nach der offenen, oszillierenden Pufferspeichertechnik (ooPS©), einer Entwicklung der eZeit Ingenieure GmbH, Berlin. Das Wärmemanagement wird mit einem Dynamischen Energie-Manager sichergestellt. Mit diesem eTank lässt sich eine Anlagenaufwandszahl (Verhältnis von Aufwand an Primärenergie zu Energiebedarf des gesamten Anlagensystems) ep von kleiner 0,3 erzielen.

Der eigentliche Wärmespeicher besteht bis zu einer Tiefe von 1,5 Meter aus mehreren Schichten Erdreich, in denen beständige Polyethylen-Leitungen verlegt sind. Nach oben und seitlich ist der Wärmespeicher gegen thermische Verluste isoliert. Zum Erdreich, das nach unten angrenzt, ist er offen. Deshalb kann auch das unter dem eTank liegende Areal in die Wärmeübertragung einbezogen werden. Das Temperaturniveau im eTank schwankt zwischen mindestens 6 Grad Celsius und maximal 23 Grad Celsius.

Druckspeicher werden auch mit Wasser von $\theta > 100$ Grad Celsius betrieben. Ein bekanntes Beispiel sind die feuerlosen Industrielokomotiven [9]. In ihnen hat das Wasser ein thermisches Niveau oberhalb der Siedetemperatur. Wird Dampf entnommen, siedet Wasser nach, so dass über mehrere Stunden die Versorgung mit Dampf über die Speicherentladung gewährleistet werden kann. Diese Funktionsweise entspricht der des seit langem betriebenen Ruths-Speichers.

Für Kies-Wasser-Wärmespeicher werden Gruben ausgehoben und mit wasserdichter Kunststoffolie ausgekleidet, mit einem Kies-Wasser-Gemisch gefüllt und nach oben ebenfalls mit Kunststoff abgedichtet. Die Wärme kann direkt leitend übertragen oder indirekt über eingebaute Rohrschlangen mit charakteristischen radialen Wärmedurchgängen befördert werden. Die Anwendung solcher Speicher hat gegenüber dem Bau von Stahl- oder Betonbehältern Vorteile. Die Wärmekapazität ist jedoch geringer.

Für höhere Betriebstemperaturen werden Wärmespeicher mit Thermoölen oder temperaturoptimierten Salzschnmelzen als Speichermedien genutzt.

Feststoffspeicher, bei denen sich der Feststoff in einem begrenzten Volumen befindet, werden vorzugsweise für Hochtemperaturanwendungen etwa in der chemischen Industrie eingesetzt [10].

Hervorzuheben ist überdies der Erdsondenwärmespeicher. Über Sonden, mit einer Tiefe bis maximal 100 Meter wird Wärme im Erdreich beziehungsweise in Gesteinsschichten gespeichert. Die Ein- und Ausspeicherung erfolgt über die gleichen Sonden. Dabei ist zu beachten, dass die Grundwasserströmung im Speichergebiet gering bleibt, um möglichst kleine Speicherverluste zu bewirken.

Bei Aquiferwärmespeichern erfolgt die Wärmespeicherung in hydraulisch abgeschlossenen Grundwasserschichten, die mit zwei Bohrungen versehen werden. Während über eine Bohrung Grundwasser entnommen wird, wird dies nach Erwärmung über eine zweite Bohrung wieder in den Aquifer eingespeist. Der Abstand der Bohrungen beträgt 50 bis 300 Meter, so dass es zu keinen direkten Wechselwirkungen kommen kann. Bei der Errichtung solcher Speicher sind aus hydrologischer, hydrochemischer und mikrobiologischer Sicht hohe Anforderungen zu erfüllen. Die einzuspeichernde Wärmemenge hängt stark von den geologischen Gegebenheiten ab. Aquiferspeicher sind zum Beispiel in Neubrandenburg und unter dem Gebäude des Deutschen Bundestages in Berlin [11, 12] ausgeführt.

In der Technik und in bestimmten Technologien haben sich entwicklungsfähige Methoden der *regenerativen Wärmespeicherung/Wärmeübertragung* etabliert. Solche Regeneratoren eignen sich als Kurzzeit-Wärmespeicher, wenn sie über eine angemessen beschaffene und dimensionierte, ruhende oder bewegte (etwa im Stirling-Motor) Speichermasse geeigneter materialtechnischer und thermodynamischer Eigenschaften verfügen. Ein gasförmiges oder flüssiges Heizmedium (T'') – das technologisch anfallende Fluid – überströmt (Winderhitzer, Siemens-Martin-Öfen) oder durchströmt (Stirling-Motor) die verwendete Speichermasse und erwärmt sie dabei. Im zeitlichen Wechsel folgt dieser Phase der Speicherbeladung nach dem Umschalten ein gasförmiges oder flüssiges Kühlmedium (T') – das technologisch benötigte Fluid. Es wird beim Überströmen oder Durchströmen der sich abkühlenden Speichermasse erwärmt. Dieser intermittierende Zyklus wiederholt sich in definierten Zeitintervallen.

3.2 Transformative Speicher

Bei transformativen Wärmespeichern (Latentwärmespeichern) wird die Wärmemenge genutzt, die bei einem Phasenwechsel (phase change) des Speichermaterials frei wird. Zum Einspeichern von Wärme wird diese über einen Wärmeträger, einem Phasenwechselmaterial (PCM – phase change materials), mit einer Temperatur über dessen Phasenwechseltemperatur zugeführt. Dabei ändert dieses ohne eine Temperaturänderung den Aggregatzustand zum Beispiel von fest nach flüssig. Bei Wärmeentnahme kehrt sich dieser Vorgang um.

Bei transformativen Wärmespeichern kann Wärmeenergie verlustarm und über viele Zyklen gespeichert werden.



Abbildung 3: Mobiler transformativer Wärmespeicher (Latentwärmespeicher) der KTG Energie AG, Niederlassung Oranienburg zur Nutzung von Abwärme von Biogasanlagen für Heizzwecke. Hersteller ist die LaTherm Energie AG in Dortmund (jetzt Oranienburg). Als Speichermedium werden circa 17 Kubikmeter Natriumacetat-Trihydrat eingesetzt. Damit lassen sich bis zu 2,5 MWh Wärme speichern. Die Aufladedauer eines solchen Speichers beträgt 6,5 Stunden, die Entladedauer bis zu 15 Stunden.

Als Materialklassen für diese Speicher sind Wasser/Eis, Paraffine, Salzhydrate und deren Mischungen, Zuckeralkohole sowie eine Vielzahl von Salzen und deren eutektische Mischungen zu nennen.

Ein Ausführungsbeispiel eines transformativen Wärmespeicher für den individuellen Wohnbereich basiert auf Natriumacetat-Trihydrat [13].

Transformative Speicher werden auch als mobile Speicher eingesetzt, etwa von der KTG Energie AG, Niederlassung Oranienburg, um Abwärme aus Biogasanlagen für Heizzwecke zu nutzen. Hersteller ist die LaTherm Energie AG in Dortmund (jetzt Oranienburg) [14]. Als Speichermedium werden circa 17 Kubikmeter Natriumacetat-Trihydrat eingesetzt. Damit lassen sich bis zu 2,5 MWh Wärme speichern. Die Aufladedauer eines solchen Speichers beträgt 6 bis 8 Stunden, die Entladedauer 12 bis 15 Stunden.

3.3 Thermochemische Speicher

Für die thermochemische Speicherung werden die Chemiesorptionsenthalpie beziehungsweise die Reaktionsenthalpie annähernd reversibler chemischer Prozesse genutzt. Dabei wird Wärme infolge endothermer (thermodynamisch präziser: endoenergetischer) Reaktionen gespeichert. Die Wärmeabgabe erfolgt dann während der exothermen (thermodynamisch präziser: exoenergetischen) Rückreaktion. (Die Kennzeichnungen endo- und exotherm widerspiegeln nur die Umstände in stofflich und energetisch isolierten Systemen – also die adiabatische Prozessführung)

Eine wichtige Gruppe thermochemischer Speicher bilden die Sorptionsspeicher. Als Speichermedien werden hygroskopische Stoffe mit großer innerer Oberfläche, wie Zeolithe und Silicagel eingesetzt. Die energetische Beladung des Speichers erfolgt durch Trocknung (Desorption von Wasser) des Speichermaterials bei Wärmezufuhr. Bei Feuchtezufuhr wird durch Sorptionsprozesse Wärme frei, die dann genutzt werden kann.

Die andere Methode der thermochemischen Speicherung ist die Nutzung reversibler chemischer Reaktionen. Ein Beispiel ist das

System Calciumoxid/Calciumhydroxid [15]. Diese Speicher sind besonders für Hochtemperaturanwendungen geeignet. Ein anderes interessantes System könnte das System Natriumhydroxid/Natronlauge sein. Es wurde 1883 in der Honigmannschen Natronlok verwirklicht, geriet aber in Vergessenheit [16]. Auf der Basis dieses Systems wollen zum Beispiel die ODERLAND.ENERGIEWERKE GmbH, Fürstenwalde, voraussichtlich ab Ende 2016 ein Speicher-Heiz-Kraftwerk errichten [17]. Die Technologie dazu wird durch die NACOMPEX GmbH, Bad Saarow, entwickelt [18].

Literatur

- [1] Fleischer, L.-G.; Mertzsch, N. (2014): „Herausforderungen größer als erwartet“ die wissenschaftlich-technische Komplexität der effektiven Speicherung großer Energiemengen als ein praktisches und theoretisches Kernproblem der Energiewende. In: ReSource 3/2014, S. 37-45
- [2] Nolting, W. (1993): Grundkurs: Theoretische Physik, 4. Spezielle Relativitätstheorie Thermodynamik, 2. Auflage, Ulmen, S. 154
- [3] Falk, G.; Ruppel, W. (1976): Energie und Entropie – Eine Einführung in die Thermodynamik. Berlin, Heidelberg, New York, [S. VI]
- [4] ebenda [S. V]
- [5] Weizsäcker, C. F. (2002): Aufbau der Physik. 4. Auflage München, S. 250
- [6] Fleischer, L.-G. (2008): Reflexionen zur Triade Energie-Entropie-Exergie einer universellen Qualität der Energie. In: LIFIS ONLINE (21. Oktober 2008). – URL: http://www.leibniz-institut.de/archiv/fleischer_21_10_08.pdf
- [7] Schossig, P.; Haussmann, T. (2011): Wärme und Kältespeicherung – Stand der Technik und Ausblicke. In: LIFIS ONLINE [11.April 2011]. – URL: www.leibniz-institut.de/archiv/schossig_11_04_11
- [8] deematrix Energiesysteme GmbH; URL: <http://www.etank.de/>
- [9] Dampfspeicherlokomotive, URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Dampfspeicherlokomotive>
- [10] Vauck, W. R. A.; Müller, H. A. (1978): Grundoperationen chemischer Verfahrenstechnik. VEB DEUTSCHER VERLAG FÜR GRUNDSTOFFINDUSTRIE LEIPZIG, S. 427

- [11] Neubrandenburger Stadtwerke GmbH: Wärmespeicherung im Aquifer. URL: <http://www.neu-sw.de/images/downloads/fernwaerme/20130508-waerme-speicherung-im-aquifer.pdf>
- [12] URL: <http://www.bundestag.de/kulturundgeschichte/architektur/energie/>
- [13] Golbs, A.; Weber, S.; Werner, P. (2011): Innovative Speichertechnologie als Grundlage einer Neugestaltung der Energieversorgung im individuellen Wohnbereich. In: LIFIS ONLINE (31. 05. 11). – URL: www.leibniz-institut.de/archiv/golbs_31_05_11
- [14] URL: <http://www.latherm.de/>
- [15] Laing, D.; Wörner, A. (2013): Wärme speichern mit Salz und Kalk – Faszination der Hochtemperatur-Speicherung. Vortrag Berliner Energietage 2013 am 16. Mai 2013 – URL: http://www.berliner-energietage.de/fileadmin/user_upload/2013/Tagungsmaterial/BET2013_105_BMWi_05_Laing_Woerner_Hochtemperaturspeicherung.pdf
- [16] Mähr, Ch. (2005): Vergessene Erfindungen Warum fährt die Natronlok nicht mehr? Verlagsguppe Weltbild GmbH 2005, S. 26-46
- [17] O.EW ODERLAND.ENERGIEWERKE GmbH; URL: <http://www.o-ew.de/technologie/>
- [18] NACOMPEX GmbH; URL: <http://www.nacomplex.de/>

Kontakt

Prof. Dr. Lutz-Günther Fleischer

Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e.V.
Luisenstraße 58/59 · D-10117 Berlin
Tel.: 030.97604332 (priv.) · Fax - 97604410 (priv.)
eMail: fleischer-privat@gmx.de · post@leibnizsozietat.de
Internet: <http://leibnizsozietat.de/>

Dr. Norbert Mertzsch

Verein Brandenburgischer Ingenieure und Wirtschaftler e.V.,
Fürstenwalder Str. 46 · D-15234 Frankfurt (Oder)
Tel.: 033931.37111 (privat)
eMail: mertzsch@t-online.de · Internet: <http://www.vbiw-ev.de/>

Anzeige

...Fortbildung

- Brandschutzhelfer (AB201) 15.10.2015, 17.11.2015
Arbeits- und Brandschutz im Betrieb (AB210) 24.6.2015
Vorbeugender Brandschutz (AB215) 13.10.2015, 01.12.2015/Leipzig
Kranführer- und Anschläger-Grundausbildung (AF310) 15. - 16.10.2015, 09. - 10.11.2015
Kranführer- und Anschläger-Wiederholungsunterweisung (AF311) 05.10.2015/vormittags, 13.10.2015/vormittags, 14.10.2015/nachmittags, 11.11.2015/vormittags, 18.11.2015/nachmittags
Lagerung gefährlicher Stoffe und Güter (AL455) 06. - 07.05.2015, 21. - 22.10.2015
Gefahrstoffe am Arbeitsplatz (AU450) 17. - 18.9.2015
Tätigkeiten mit biologischen Arbeitsstoffen (AU452) 09.09.2015
Sachkunde für die Abgabe von Giften und Bioziden (AU460) 03. - 06.11.2015
Sachkunde für die Abgabe von Giften (AU461) 03. - 05.11.2015
Sicher arbeiten im chemischen Labor (AU551) 10.06.2015, 10.12.2015
Grundkurs für Abfallbeauftragte.- Grundlehrgang zum Erwerb der Fachkunde nach § 60 KrWG (UA430) 13. - 15.10.2015
Fortbildung für Abfallbeauftragte-Fortbildungskurs zur Aktualisierung der Fachkunde für Abfallbeauftragte nach § 60 KrWG i. V. m. § 55 (2) BImSchG (UA431) 16. - 17.06.2015, 17. - 18.11.2015

- Abfallentsorgung für Praktiker (UA433) 18.11.2015
Abfall - Bestimmung und Überwachung (UA580) 14.10.2015
Auditierung von Abfallentsorgern - Fortbildungskurs zur Aktualisierung der Fachkunde für Abfallbeauftragte nach § 60 KrWG i. V. m. § 55 (2) BImSchG (UA586) 19.11.2015
Fortbildung für Immissionsschutzbeauftragte - Anerkannter Kurs zum Erhalt der Fachkunde nach § 9 der 5. BImSchV (UI421) 10. - 11.11.2015
Fortbildung für Gewässerschutzbeauftragte - Fachkundeerhalt nach § 66 WHG in Verbindung mit § 55 (2) BImSchG (UW411) 24. - 25.11.2015
Umgang mit wassergefährdenden Stoffen - Sachkundenachweis für Fachbetriebe nach § 62 Wasserhaushaltsgesetz (UW416) 18.06.2015
Das neue Bundesrecht zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (UW440) 25.11.2015
Die neue AwSV für Anlagenplaner,-betreiber und -überwacher (UW445) 08.05.2015, 20.10.2015
Aktuelles Umweltrecht (UR587) 27.10.2015

Karlsruher Institut für Technologie Fortbildungszentrum für Technik und Umwelt (FTU)

Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen
Fon: 0721 608-24801
Fax: 0721 608-24857
E-Mail: info@ftu.kit.edu
www.fortbildung.kit.edu

