



Klaus Görner. Foto: Timo Bobert

Desiderat ist immer mehr ein sicherer, wirtschaftlicher und umweltschonender Betrieb von energietechnischen Anlagen. „Saubere Energie“ heißt das Ziel, mathematische Modellierung und Simulation der Weg.

Saubere Energie

Effiziente und umweltverträgliche Energiebereitstellung
durch Optimierung auf dem Rechner
Von Klaus Görner und Gerd Oeljeklaus

Mit dem Feuer zu Wärme und Strom

Das Feuer hat immer eine faszinierende Wirkung auf den Menschen ausgeübt: Auch der Einsatz von Primärenergieträgern (Gas, Öl und Kohle) durch den Menschen ist sehr eng mit der Nutzung des Feuers verknüpft. Anfänglich war diese „Nutzung“ wohl eher zufällig zum Beispiel durch Beobachtung der Wirkung von Bränden infolge von Blitzschlag. Erst mit der Fähigkeit selbst Feuer zu entfachen und zu beherrschen wurde dem Menschen dessen bewusste Nutzung möglich. Dabei standen zunächst Licht und Wärme im Vordergrund.

An der grundsätzlichen Nutzung des Feuers beziehungsweise dem Einsatz der Verbrennung hat sich bis heute wenig geändert. Der Nutzer greift sehr gern auf die edle Energieform „Strom“ zurück, da sein Einsatz sauber und bequem

möglich ist. Die Umwandlung von Primärenergie in Endenergie erfolgt zentral in großen Kraftwerken. Die entsprechenden Umwandlungswirkungsgrade zwischen Primär- und End- beziehungsweise Nutzenergie, also in Wärme und Strom, wurden kontinuierlich erhöht. Diese Entwicklung ist auch heute noch nicht abgeschlossen und nur durch theoretische Grenzen, die der Carnotsche Vergleichsprozess setzt, begrenzt.

Unter dem Wirkungsgrad wird das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand, das heißt zum Beispiel Leistung an Wärme oder Strom im Verhältnis zum dafür aufzuwendenden thermischen Input (Brennstoffenergiestrom) verstanden. Dieser konnte ständig gesteigert werden. Hierzu einige Zahlenwerte¹: Bei der Erzeugung elektrischen Stroms aus Steinkohle lag Anfang des 20. Jahrhunderts die dafür notwendige Kohlenmenge bei etwa 12.000 Gramm pro

erzeugte elektrische Kilowattstunde (kWh_e). Dies entspricht einem Wirkungsgrad von etwa einem Prozent. In den fünfziger Jahren lag der Wert bei etwa 500 Gramm Kohle und derzeit liegt er bei etwa 280 Gramm, was einem Wirkungsgrad von etwa 43 Prozent bei der Steinkohleverstromung entspricht. Der mittelfristige Zielwert für Steinkohle liegt bei 240 Gramm oder 50 Prozent.

Entwicklungen zur Wirkungsgradsteigerung leisten damit den entscheidenden Beitrag zur Schonung der Ressourcen und damit zur Verlängerung der Reichweite der fossilen Energieträger. Darüber hinaus wird die Umwelt geschont, da der mit der Verbrennung unvermeidlich verbundene spezifische Schadstoffausstoß stark vermindert wird.

Die Wirkungsgradsteigerung bei den verschiedenen Energiewandlungsprozessen wird auch in Zukunft eine der wichtigsten Aufgaben sein. Erfolgen kann

diese durch eine Optimierung der Verbrennung beziehungsweise der eingesetzten Brenner und Feuerungen sowie durch neue Kraftwerkskonzepte zum Beispiel mit höheren Prozesstemperaturen oder Kohlevergasungstechnologien. Zusätzlich werden die Abtrennung des unvermeidlichen Kohlendioxids (CO_2) und dessen Speicherung eine große Herausforderung darstellen. Bei allen diesen Aufgaben wird die Modellbildung und Simulation von Detailprozessen (zum Beispiel der Verbrennung) und der Gesamtprozesse (zum Beispiel das Gesamtkraftwerk) eine ganz zentrale Rolle spielen.

Optimierungsziele

Jeder Stromkunde, ob privat oder industriell, erwartet ein Produkt, das kostengünstig und jederzeit verfügbar ist. Zusätzlich soll das Produkt umweltverträglich hergestellt sein. Aus diesen drei Kernforderungen lässt sich das Spannungsdreieck (Abb. 1) ableiten.

- Darin steht die Umweltverträglichkeit als Synonym für eine schadstoffarme Erzeugung (geringe Emissionen), die die natürlichen Ressourcen (Gas, Öl und Kohle) möglichst wenig in Anspruch nimmt.
- Mit der Wirtschaftlichkeit verbindet der Endkunde immer niedrige Preise. Der Erzeuger kann dieser Anforderung zum Beispiel mit einem hohen Umwandlungswirkungsgrad Rechnung tragen, wobei dadurch gleichzeitig die Brennstoffvorkommen geschont werden.
- Sicherheit bedeutet wiederum für den Endkunden Versorgungssicherheit, das heißt jederzeitige Lieferung. Der Erzeuger muss allerdings zusätzlich auch noch einen sicheren Anlagenbetrieb realisieren, mit dem einerseits das Betriebspersonal und andererseits auch die Umwelt geschützt werden.

Wie schon aus diesen wenigen Ausführungen zu sehen ist, hängen

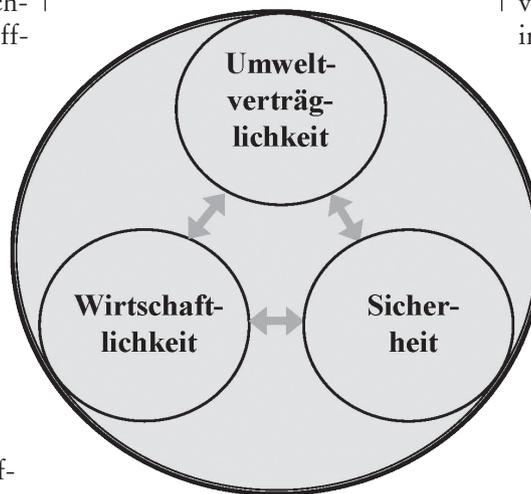
alle Anforderungen eng miteinander zusammen und lassen sich nur durch eine konsequente Optimierung aller Prozesse und Komponenten einer Energiewandlungseinrichtung (zum Beispiel Heizung, Kraftwerk oder Thermoprozessanlage) erreichen.

Eine Optimierung solcher Systeme kann nun mit Hilfe unterschiedlichster Werkzeuge erfolgen:

- Strömungsgeführte Teilsysteme können über die so genannte „Computational Fluid Dynamic (CFD)“ analysiert werden. Hierbei werden neben der Strömung auch Wärmeübertragung und chemische Reaktionen über Bilanzgleichungen der Transportprozesse abgebildet beziehungsweise bilanziert („first principle models“).

- Thermodynamische Kreislaufberechnungen bilanzieren einen Gesamtprozess und bilden dabei die Einzelkomponente zum Beispiel mit Kennlinien ab.

- Bei künstlich neuronalen Netzen werden Daten aus dem realen Anlagenbetrieb verwendet, um das



(1) Anforderungen an eine effiziente und umweltverträgliche Energiebereitstellung.

Modell zu trainieren und dann auf dieser Basis eine Optimierung vorzunehmen.

Diese drei sehr unterschiedlichen Methoden werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Mathematische Modellierung der Verbrennung

Phänomenologische Beschreibung der Verbrennung

Mit den Vorgängen, die bei jeder Verbrennung ablaufen, hat sich schon sehr frühzeitig Michael Faraday beschäftigt. In seinen Vorlesungen im Semester 1860/1861 in der „Royal Institution“ in London mit dem Titel „Lectures on the Chemical History of a Candle“² hat er auf wissenschaftlicher Basis diese Prozesse beschrieben. In der ersten Vorlesung lauten die Teilthemen: „Die Kerze. Ihre Flamme. Schmelzen des Brennstoffs. Kapillarität des Dochtes. Die Flamme ein brennender Dampf. Gestalt und Theile der Flamme. Der aufsteigende Luftstrom. Andere Flammen.“ Dahinter steckt die Beobachtung, dass nicht der feste Brennstoff sich umsetzt, sondern der Brennstoffdampf in einem gewissen Verhältnis zur Verbrennungsluft stehen muss. Brennstoff- und Luftzufuhr bei einer Kerzenflamme stellen sich aufgrund von Effekten des Kapillartransportes im Docht, Energiezufuhr von der brennenden Flamme, dadurch Verdampfung des Waxes und natürliche Luftkonvektion aufgrund des Auftriebes durch die heiße Flamme ein³.

Wissenschaftlich genauer formuliert laufen bei jedem Verbrennungsvorgang die folgenden Teilprozesse ab⁴:

- Mischen von Brennstoff und Oxidationsmittel,
- Vorwärmen des Gemisches auf Zündbedingungen,
- Ablauf des eigentlichen Verbrennungsvorgangs (chemische Reaktion) mit Freisetzung der chemischen gebundenen Energie (Wärmetönung) und
- Abgabe der Wärme an ein Arbeitsmittel oder ein Wärmegut.

Mit Energie, die zunächst von außen zuzuführen ist, wird das Gemisch auf Zündtemperatur aufgeheizt, und dieses wird sich bei Vorliegen der richtigen Zündverhältnisse

(brennstoffabhängige Konzentrationsgrenzen) entzünden.

Bei der chemischen Umsetzung werden die Reaktionsenthalpien freigesetzt, wobei deren Beträge für den jeweiligen Brennstoff charakteristisch sind. Dabei wird mehr Energie freigesetzt als für den Aufheizvorgang notwendig ist, wodurch die Temperatur der Verbrennungsgase stark ansteigt. Wie bei den Kraftwerkskreislaufprozessen gezeigt werden kann, ist der Wirkungsgrad der nachfolgenden Energiewandlung abhängig vom angebotenen Temperaturniveau des Arbeitsmediums und damit auch der Abgase. Er steigt beim idealen Carnot-Prozess mit der oberen Prozesstemperatur T nach folgender Beziehung (T_0 Umgebungstemperatur): $\eta_c = 1 - T_0/T$.

Daher ist aus energetischer Sicht eine möglichst hohe Verbrennungstemperatur anzustreben. Sie ist allerdings begrenzt durch die Temperaturbeständigkeit der eingesetzten Werkstoffe, aus denen die Feuerung beziehungsweise der Dampferzeuger gebaut ist.

Mit der Temperatur steigt aber zum Beispiel auch die Stickoxidbildung, weshalb hier ein Gesamtoptimum gesucht werden muss.

Die Wärmeabgabe im Dampferzeuger von der Flamme an das Arbeitsmittel (meist Wasser/Dampf) erfolgt durch Strahlung, konvektiven und diffusiven Transport, wobei wegen der hohen Temperaturen die Energieübertragung durch Strahlung dominiert, da sie mit der 4. Potenz der Temperatur der Rauchgase steigt. Der Netto-Wärmefluss durch Strahlung zwischen zwei Körpern, zum Beispiel zwischen Flamme und Arbeitsmedium, lässt sich nach der Gleichung:

$$Q_{12} = C_{12}A(T_1^4 - T_2^4)$$

berechnen. Hierbei stehen A für die Austauschfläche und C_{12} für die Strahlungsaustauschzahl, in der die Strahlungskonstante (Stefan-Boltzmann-Konstante) für den schwarzen

Körper σ und die Emissionsverhältnisse ϵ_1 und ϵ_2 der beiden, nicht schwarzen (oder grauen) Körper eingehen.

Der Prozess der Verbrennung

Ziel der Verbrennung ist, die chemische gebundene Energie des Brennstoffs über eine exotherme, also energiefreisetzende Reaktion, in thermische Energie, die in den Rauchgasen vorliegt, zu überführen. Diese heißen Rauchgase können dazu genutzt werden, über weitere Energieübertragungsschritte einen Wärmeträger (Wasser, Dampf, Wärmeträgeröl oder anderes) zu erwärmen und über diesen gegebenenfalls durch die Entspannung von Dampf in einer Dampfturbine mit nachgeschaltetem Generator elektrische Energie zu erzeugen.

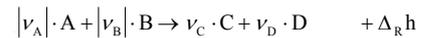
Es kann gezeigt werden, dass die maximal nutzbare Arbeit dann verrichtet wird, wenn ein System durch reversible Zustandsänderungen mit der Umgebung (Erdatmosphäre) ins Gleichgewicht gebracht wird. Man bezeichnet diese maximal gewinnbare Arbeit als Exergie.

Die Energie E eines thermodynamischen Systems wird durch seine äußeren Koordinaten (bei starren Körpern sind dies zum Beispiel Geschwindigkeit und Lagekoordinaten, beziehungsweise kinetische Energie E_{kin} und potenzielle Energie E_{pot}) und durch die innere Energie U beschrieben⁵: $E = E_{kin} + E_{pot} + U$

Nach dem ersten Hauptsatz für geschlossene Systeme wird die Änderung der inneren Energie U durch einen Wärmestrom Q_{12} und durch zu- oder abgeführte Arbeit L_{12} $U_1 - U_2 = L_{12} + Q_{12}$ verändert. Mit der Einführung der Enthalpie $H = U + pV$, wobei pV die Verschiebearbeit am System ist, steht eine Zustandsgröße zur Verfügung, mit der die Energie wandlung und der Energieaustausch für stationäre Anlagen in allgemeingültiger Form zu beschreiben ist.

Mit diesen Definitionen lässt sich nun ein wichtiger Zusammenhang für die bei der chemischen Reaktion

umgesetzten Reaktionsenthalpie aufstellen. Betrachtet man eine Reaktion:



dann setzt sich die spezifische Reaktionsenthalpie (molenbezogen) additiv aus den Enthalpien der beteiligten Reaktionspartner zusammen:

$$\Delta_R h = -|v_A| \cdot h_A - |v_B| \cdot h_B + v_C \cdot h_C + v_D \cdot h_D$$

oder allgemein:

$$\Delta_R h = \sum v_i \cdot h_i = -H_u^*$$

Andererseits lässt sich der Heizwert H_u als massengewichtete Summe aus den Bildungsenthalpien der beteiligten Reaktionspartner berechnen:

$$H_u = -\sum g_i \cdot \Delta_B h_i$$

Die bei der Verbrennung freigesetzte Energie ist die Differenz der Bildungsenthalpien der Edukte und Endprodukte (Brennstoff und Luft, Rauchgas).

Physikalisch-chemische Grundlagen der Verbrennung

Der Gesamtvorgang der Verbrennung kann in die drei Teilbereiche:

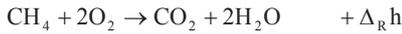
- Strömung,
- Reaktion oder chemische Stoffumwandlung und
- Energieübertragung (durch Strahlung, konvektiven Transport und Leitung) (Abb. 2) untergliedert werden.

Alle drei Teilvorgänge beeinflussen sich wechselseitig beziehungsweise sind stark untereinander gekoppelt.

Die Strömung hat einen stark turbulenten Charakter und ist bei Kohle zusätzlich mit einer hohen Konzentration an Partikeln beladen. Hierdurch stellt sich die Aufgabe der Modellierung einer turbulenten Zweiphasenströmung. Dies ist für sich schon eine Herausforderung und wissenschaftlich noch bei weitem nicht gelöst.

Die chemischen Reaktionen beim Verbrennungsvorgang sind natürlich vom eingesetzten Brennstoff abhängig. Im Wesentlichen

werden aber Kohlenwasserstoffe in den unterschiedlichsten Bindungsformen in Wasser (H₂O) und Kohlendioxid (CO₂) umgesetzt. Für den einfachsten Kohlenwasserstoff Methan (CH₄) kann dieser Umsatz als Brutto-Gleichung angegeben werden:



Betrachtet man die tatsächlich dabei ablaufenden Elementarreaktionen, so kann eine große Anzahl von Zwischenreaktionen und Zwischenstufenprodukten detektiert werden.

Eine noch feinere Auflösung der Zwischenstufenreaktionen führt auf über 400 Einzelreaktionsschritte. Noch deutlich komplexer sind die Vorgänge bei der Öl- und Kohleverbrennung.

Der Energieaustausch, im Wesentlichen durch Strahlung, ist ebenso eine schwierige Aufgabe mit vielen Detailproblemen, die auch bei der numerischen Lösung der Bilanzgleichungen sehr aufwändig ist.

Beschreibung von Verbrennungsvorgängen

Eine differentielle Beschreibung der vorliegenden Zusammenhänge erfolgt am zweckmäßigsten in allgemeiner Form für eine Variable φ über eine Bilanzgleichung in der Form⁶:

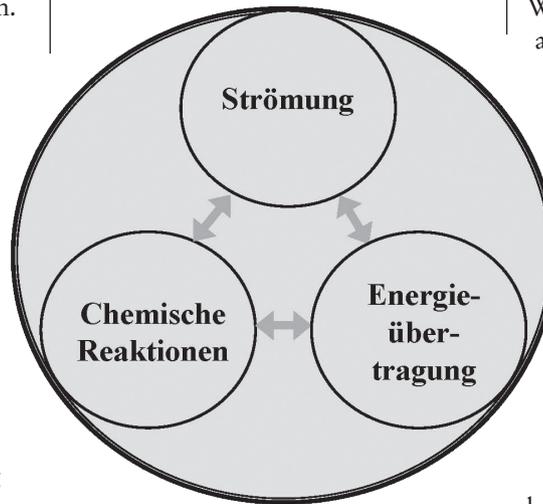
$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \varphi)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) + S_\varphi$$

φ steht dabei für eine skalare (passive) oder eine vektorielle Größe. Zweckmäßigerweise sind dies: v Geschwindigkeitskomponenten, T Temperatur und c Konzentrationen. In der Bilanzgleichung wurde die Einsteinsche Summationskonvention verwendet, bei der bei mehrfachen Auftretens eines Index innerhalb eines Terms, hier j für die drei Raumrichtungen, über den gesamten Wertebereich zu summieren ist ($j=1(1)3$). Ein möglicher Satz von zu bilanzierenden Größen ist in Tabelle

(3) zusammengestellt. Er berücksichtigt eine dreidimensionale, turbulente Zweiphasenströmung, mit der Umsetzung von Erdgas (stark vereinfacht), der thermischen Behandlung von sehr fein dispergierten Partikeln und der Energieübertragung durch Konvektion und Strahlung.

Bei jeder Flammen- oder Feuer-raumberechnung ist für jede dieser Größen eine solche Bilanzgleichung anzugeben und zu lösen^{4,6,7,8,9,10}.

Da die Gleichungen untereinander



(2) Teilbereiche der Verbrennung.

der gekoppelt sind, ist nur eine iterative, numerische Lösung möglich. Hierzu wird das Berechnungsgebiet in Berechnungszellen unterteilt und in diesen eine diskrete Näherungslösung berechnet. Im dreidimensionalen Fall werden hierfür eine Million Gitterzellen und mehr verwendet. Abbildung (15) zeigt ein solches Gitter für den Feuerraum eines Dampferzeugers einer thermischen Abfallbehandlungsanlage. Es wird klar, dass durch diese große Anzahl an Variablen, die jeweils in allen diesen Zellen berechnet werden müssen, ein sehr großer numerischer Aufwand entsteht. Mit einem PC-Cluster (zum Beispiel acht Prozessoren) kann die reine Rechenzeit ein bis zwei Wochen betragen. Durch eine Interpolation in die jeweilige Raumrichtung lässt sich der Verlauf

der betrachteten Größe näherungsweise angeben.

Gelingt es, auf dieser Basis, die jeweiligen Teilprozesse und ihre Kopplung abzubilden, dann erhält man mit solchen Simulationsrechnungen ein sehr anschauliches Abbild der Verhältnisse in der betrachteten Flamme.

Mathematische Modellierung von Kreislaufprozessen

Bei Wärmekraftprozessen wird Wärme bei erhöhter Temperatur an ein Arbeitsmittel übertragen und Wärme bei niedriger Temperatur abgeführt. Das Arbeitsmittel durchläuft dabei einen geschlossenen oder offenen Kreislauf, wobei es entsprechende Zustandsänderungen erfährt. Durch Kombination von mehreren isobaren, isochoren, isothermen, isenthalpen oder isentropen Zustandsänderungen können zahlreiche Kreisprozesse beschrieben werden, welche die Exergie (Arbeitsfähigkeit) der zugeführten Wärme als Arbeit abgeben können.

$$p v = R T$$

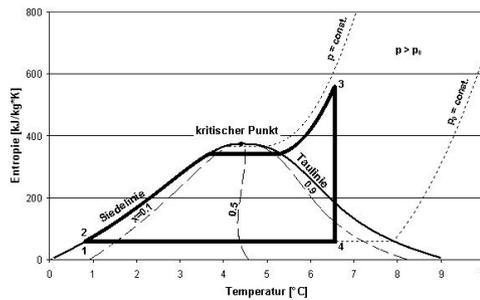
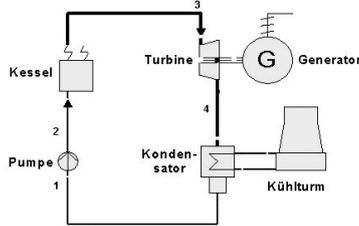
Zustandsgleichung für ideale Gase für $p \rightarrow 0$

Der einfachste und gleichzeitig beste Wärme-Kraft-Prozess ist der Carnot-Prozess. Er besteht aus zwei isentropen und zwei isothermen Zustandsänderungen. Oft stehen die Eigenschaften von Arbeitsmitteln und technische Restriktionen einer direkten Umsetzung entgegen.

Beim Dampfturbinenprozess, wie er im konventionellen Dampfkraftwerk abläuft, wird das Arbeitsmittel Wasser in einen geschlossenen Kreislauf geführt (Abb. 4). Dabei wird dem unter erhöhtem Druck stehenden Wasser Wärme zugeführt. Im Idealfall durchläuft das Arbeitsmittel eine isobare Zustandsänderung und wird verdampft. Der unter erhöhtem Druck und erhöhter Temperatur stehende so genannte

(3) Möglicher Satz von zu bilanzierenden Größen für eine einfache Erdgasflamme.

Größe	Variable	Dimension	Anzahl der Gleichungen
Geschwindigkeitskomponenten der Gasphase	u_{G1}, u_{G2}, u_{G3}	m/s	3
Geschwindigkeitskomponenten der Partikelphase	u_{P1}, u_{P2}, u_{P3}	m/s	3
Kinetische Turbulenzenergie	k	m^2/s^2	1
Dissipation an kinetischer Turbulenzenergie	ϵ	m^2/s^3	1
Gesamtenthalpie der Gasphase	h_G	kJ/kg	1
Gesamtenthalpie der Partikelphase	h_P	kJ/kg	1
Temperatur der Gasphase	T_G	K	1
Temperatur der Partikelphase	T_P	K	1
Konzentration an CH_4	c_{CH_4}	-	1
Konzentration an N_2	c_{N_2}	-	1
Konzentration an O_2	c_{O_2}	-	1
Konzentration an CO	c_{CO}	-	1
Konzentration an CO_2	c_{CO_2}	-	1
Konzentration an H_2O	c_{H_2O}	-	1
Summe			18



(4) Vereinfachtes Schema eines Kreisprozesses mit den zugehörigen Zustandsänderungen im T-s-Diagramm.

Frischdampf wird anschließend über eine Dampfturbine entspannt und erfährt im reversiblen Fall eine isentrope Zustandsänderung, wobei Arbeit an der Turbinenwelle abgegeben wird. Es folgt eine isobare und gleichzeitig isotherme Wärmeabgabe mit Dampfkondensation nahe der Umgebungstemperatur. Anschließend erfolgt eine isentrope Druckerhöhung, womit der Kreislauf von Neuem beginnt. Der so ideal (reversible) geführte Prozess wird auch Clausius-Rankine-Prozess genannt und ist der Vergleichsprozess für den Dampfkraftprozess.

Die vorher beschriebenen Zustandsänderungen können in einem realen Kraftwerk und den entsprechenden Kraftwerkskomponenten nur angenähert werden. Sie

weichen durch innere Dissipationen, die zum Beispiel durch Reibungsverluste in den Rohrleitungen, Turbinen und Pumpen entstehen sowie durch Wärmeverluste nach außen von den idealen Zustandsänderungen mehr oder weniger ab. Alle Komponenten des Dampfkraftprozesses wie Kessel, Dampfturbine, Kondensator und Speisewasserpumpe, um nur die wichtigsten anzuführen, sind jeweils als mathematisches Modell abzubilden. Zur vollständigen thermodynamischen Berechnung des Dampfkraftwerkes müssen auch die Brennstoff- und Luftzufuhr, der Verbrennungsprozess, der Ascheabzug, die Rauchgasabfuhr und -reinigung, der Generator, der Kühlturm und zukünftig auch eine CO_2 -Rückhaltung abgebildet werden. Durch

Bilanzierung der Stoff- und Energieströme kann dann ein Gleichungssystem generiert werden, welches zum Beispiel mit dem Optimierungsziel „maximaler Wirkungsgrad“ gelöst werden kann, indem die Komponenten aufeinander abgestimmt werden. Durch Parametervariation lässt sich die Sensibilität einzelner Größen auf den Gesamtwirkungsgrad aufzeigen.

Aus dieser Betrachtung lassen sich auch Schwachstellen erkennen und Anforderungsprofile (Entwicklungsziele) für Kraftwerkskomponenten ableiten, bei denen die Optimierung des Gesamtsystems nach dem jeweiligen Stand der Technik und der verfügbaren Werkstoffe im Vordergrund steht.

Für ein Kraftwerk, das auch im Teillast betrieben wird, ist neben dem Auslegungspunkt auch das Verhalten bei verschiedenen Teillastzuständen von Bedeutung. Über relative Änderungen der Komponentenwirkungsgrade in Bezug auf den Vollastbetriebszustand kann das stationäre Teillastverhalten ebenfalls abgebildet werden. Ein Kraftwerk, welches auch im Teillast betrieben werden soll, kann daher von seiner Auslegung gegenüber einem Grundlastkraftwerk abweichen.

Analog der Vorgehensweise beim Dampfkraftprozess lässt sich auch der Gasturbinenprozess abbilden. Durch Vorschaltung eines Gasturbinenprozesses vor einem Dampfturbinenprozess, wobei beide auf unterschiedlichem Temperaturniveau betrieben werden, lassen sich heute in einem so genannten GUD-Prozess die höchsten elektrischen Wirkungsgrade von bis zu 60 Prozent bei Einsatz von Erdgas realisieren. Auch die Kombination von unterschiedlichen Wärmekraftprozessen kann als Kaskaden-Schaltung entsprechend thermodynamisch abgebildet und optimiert werden. Dies gilt auch für Kraftwerksprozesse mit vorgeschalteter Kohlevergasung oder Kreisprozesse, die mit organischen Arbeitsmitteln betrieben werden (zum Beispiel ORC-Prozess).

Je höher die Anzahl der Einzelkomponenten aus der ein Kraftwerksprozess besteht, desto höher ist der Aufwand bei der Berechnung. Eine analytische Lösung des einen komplexen Kraftwerksprozess beschreibenden Gleichungssystems ist aufgrund der hohen Anzahl von Abhängigkeiten nicht mehr möglich. Hier kann eine Lösung nur mit Hilfe von numerischen Lösungsverfahren und entsprechenden EDV-Programmen gefunden werden.

Optimierungskriterien

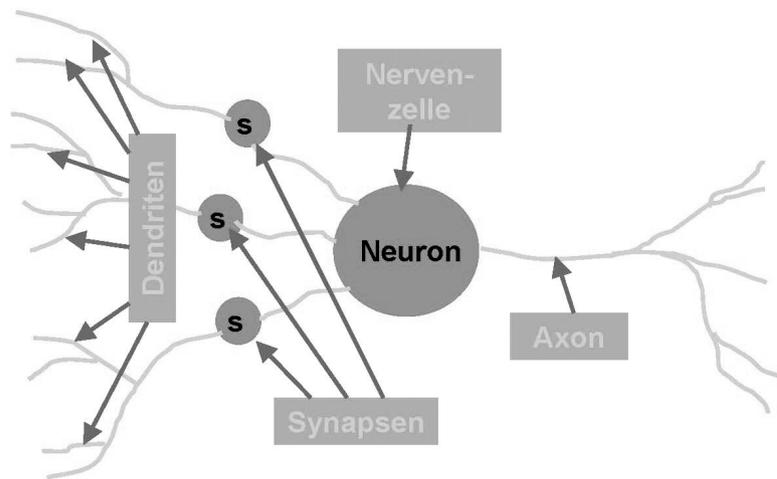
Kraftwerksanlagen können nach technischen, ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten ausgelegt werden. Oft sind die sich daraus ergebenden Optimierungskriterien gegenläufig, so dass je nach vorliegenden Randbedingungen ein Kompromiss für die Auslegung gefunden werden muss.

So kann eine Anlage nach dem maximalen Wirkungsgrad oder der maximalen Leistungsdichte ausgelegt werden. Maximaler Wirkungsgrad bedeutet aber auch hohe Investition und damit hohe Erzeugungskosten. Minimale Emissionen bedeuten erhöhten Eigenbedarf und damit geringeren Wirkungsgrad sowie erhöhte Investition.

Dies ist insofern von Bedeutung, da Kraftwerke eine Lebensdauer von 30 bis 40 Jahren aufweisen und sich die Rahmenbedingungen über einen solchen Zeitraum sehr stark ändern können. Nachträgliche Änderungen und Anpassungen sind, wenn überhaupt möglich, immer mit Einschränkungen verbunden.

Mit Hilfe der thermodynamischen Berechnung von Kreislaufprozessen können:

- Energie- und Exergieverluste aufgezeigt,
- Kraftwerksprozesse ausgelegt und optimiert,
- wirkungsgradsteigernde Maßnahmen schon vor der Umsetzung analysiert und beurteilt sowie



(5) Verschaltung von Neuronen im Gehirn. An den Verbindungsstellen sitzen die Synapsen. Sie übermitteln über Botenstoffe Informationen.

- Anforderungsprofile an die Entwicklung von Komponenten formuliert werden.

Künstlich Neuronale Netze

Das menschliche Gehirn ist in der Lage, sehr komplexe Zusammenhänge zu erfassen und zu erlernen. Das Gehirn besteht aus einer sehr großen Anzahl von Neuronen, die sich in der frühen Entwicklungsphase des Lebewesens verknüpfen. Dabei werden diese Verknüpfungen über Axone als „Leitungen“ und Synapsen als „Verbindungsstellen“ dargestellt, über die Botenstoffe ausgetauscht werden (Abb. 5). Hierdurch wird eine eindimensionale Informationsübertragung realisiert. Durch ein sehr großes Netzwerk solcher Verbindungen können auch sehr große Datenmengen „abgespeichert“ werden. In der Lernphase des Gehirns wird dabei quasi das Übertragungsverhalten dieser Synapsen für eine ganz spezielle Information festgelegt.

Bei Künstlich Neuronalen Netzen (KNN) wird versucht, diese Eigenschaften nachzubilden. Die Neuronen werden über Speicherzellen abgebildet, die Synapsen über eine Übertragungsfunktion.

Die sehr große Anzahl der Neuronen des Gehirns wird über

eine endliche Anzahl an Zellen in wenigen, so genannten verborgenen Zellen realisiert (Abb. 6).

Der Lernvorgang des Gehirns wird durch die Trainingsphase bei Künstlich Neuronalen Netzen nachgebildet. Hierzu benötigt das KNN „Erfahrungen“. Dies sind bei technischen Systemen die Ein- und Ausgangsgrößen des Systems (Abb. 7). Daraus „lernt“ das KNN das Verhalten des Systems. Führt man dieses Training für viele verschiedene Kombinationen von zusammengehörenden Ein- und Ausgangswerten durch, dann hat das KNN das Übertragungsverhalten in diesem Wertebereich gelernt. Es ist jetzt in der Lage, auf beliebige Eingangswerte die dazugehörigen Ausgangswerte zu berechnen. Die Interpolationsfähigkeit des KNN ist sehr gut, die Extrapolationsfähigkeit allerdings schlecht.

Vorteile sind, dass man bei dieser Art der Modellierung, die in der Systemtechnik auch als Identifikation bezeichnet wird, kein vertieftes Systemverständnis benötigt, und dass das KNN sehr schnell, das heißt auch in Echtzeit, das Systemverhalten beschreibt. Es ist daher unter anderem auch für Regelungszwecke einsetzbar. Die Nachteile liegen in der schlechten Extrapolationsfähigkeit und in der Tatsache,

dass es nur für bestehende reale Systeme einsetzbar ist, bei denen Ein- und Ausgangswerte messbar sind. Dies ist ein wesentlicher Unterschied zu mathematischen Modellen auf Basis von CFD-Ansätzen (first principle models). Sie lassen sich auch für die Auslegung von Prozessen und Komponenten verwenden, benötigen aber ein sehr vertieftes Verständnis der Teilprozesse im System.

Beispiele für eine Prozessbeschreibung und -Optimierung

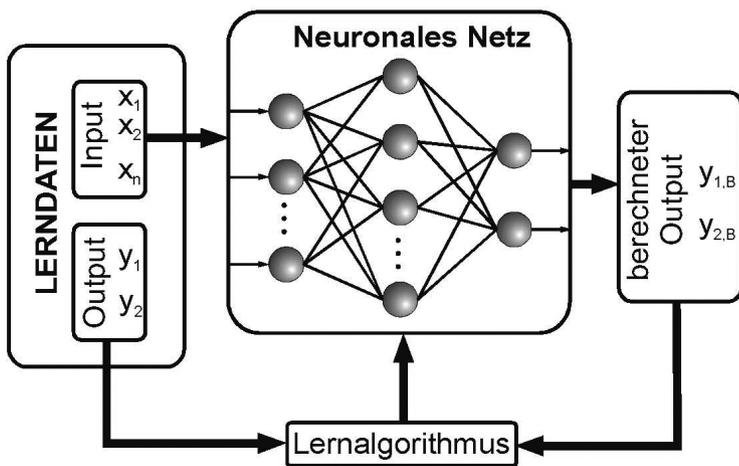
Typische Beispiele für konkret ausgeführte CFD-Studien sind Simulationen von technischen Gas- und Kohlenstaubflammen, technischen Feuerungen für Großdampferzeuger, Staubabscheidern (Schlauchfilter und Zyklonabscheider), Glasschmelzwannen, Calcinatoren in der Zementindustrie,

Sprühtrockner in der Lebensmittelindustrie und Rührkesselreaktoren in der chemischen Industrie. Bei den thermodynamischen Kreislaufberechnungen wurden aktuelle und zukünftige Kraftwerkskonzepte untersucht. Der Einsatz von Künstlich Neuronen Netzen und CFD-Studien erfolgte an Beispielen der thermischen Abfallbehandlung, der thermischen Abgasnachbehandlung und der Stromerzeugung im Dampfkraftwerk.

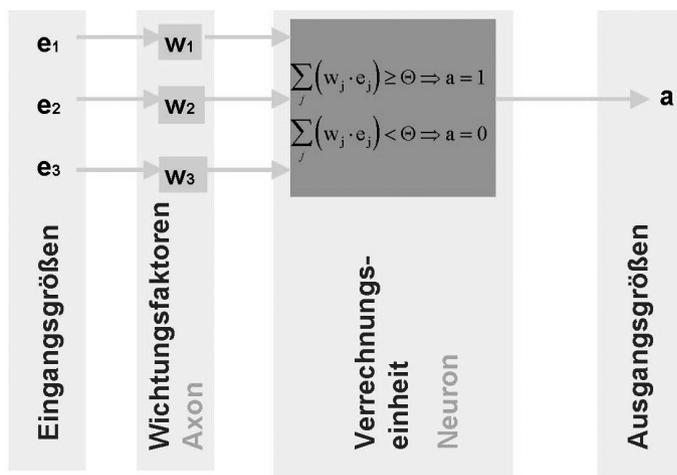
Kohlenstaubbrenner und Kraftwerksfeuerung

Durch den Brenner werden die wesentlichen Eigenschaften der Verbrennung wie Effizienz und Schadstoffausstoß bestimmt. Daher ist seine Optimierung von besonderer Bedeutung. Abbildung (8) soll eine Vorstellung von den Verhältnissen in der Flamme geben. Es zeigt die Verteilung verschiedener Größen in einer Kohlenstaubflamme^{3,11}.

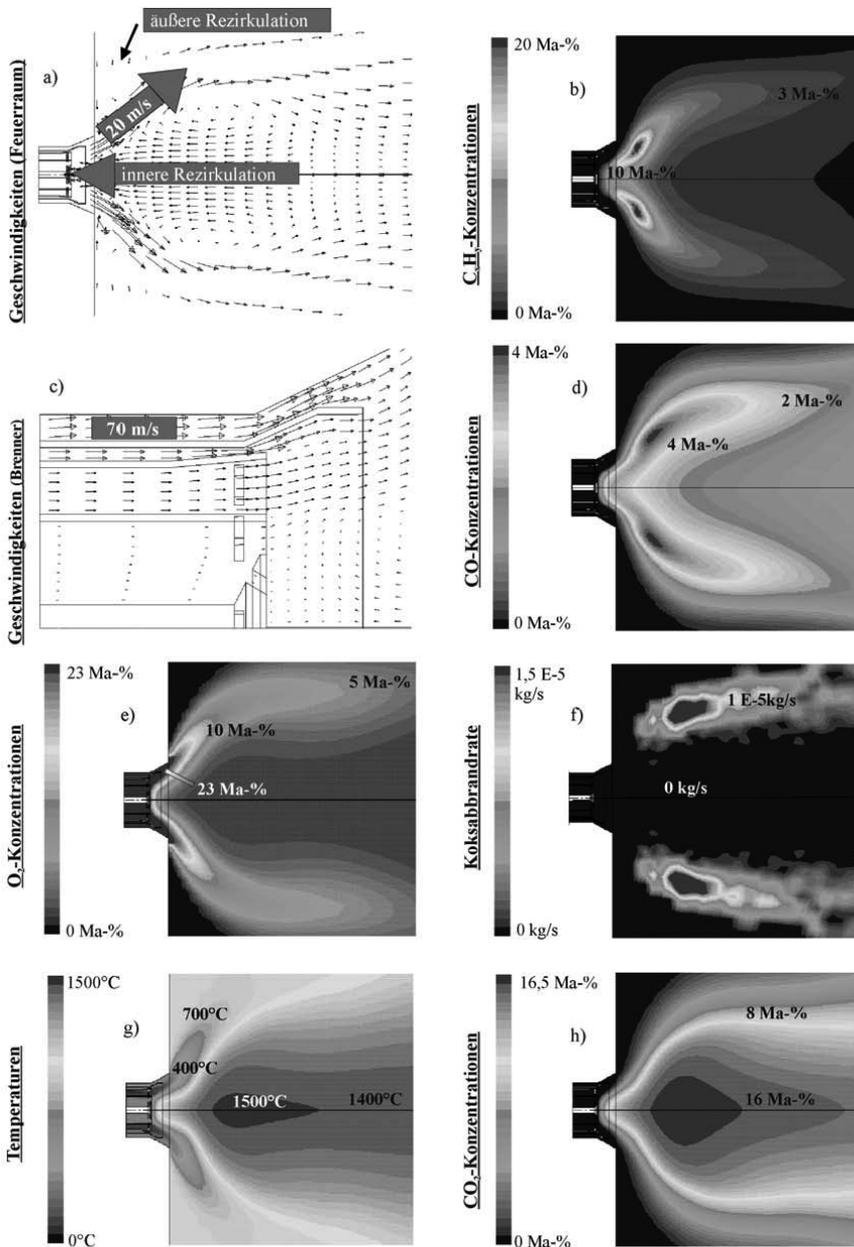
Sehr ausgeprägt lassen sich daran die aufgezeigten Effekte zeigen. Teilbild a und c geben einen Eindruck von der Geschwindigkeitsverteilung innerhalb der Flamme. In der Flammenwurzel ist eine Ansaugung von Rauchgasen aus der Umgebung der Flamme (Feuerraum) zu erkennen (äußere Rezirkulation). Durch einen starken Unterdruck auf der Flammenachse strömen auch im Flammenkern heiße Rauchgase zurück (innere Rezirkulation). Das zugeführte Kohlenstaub-Luft-Gemisch muss zunächst durch Energiezufuhr von außen aufgeheizt werden. Ab einer Temperatur von etwa 300 °C werden flüchtige Bestandteile freigesetzt, die sich dann in der Gasphase mit Sauerstoff vermischen und zünden, wobei diese Reaktionen sehr schnell ablaufen, da es sich um homogene Gasphasenreaktionen handelt. Die Konzentration der freigesetzten Gase (Pyrolysegase) ist Teilbild b, die des Sauerstoffs Teilbild e zu entnehmen. Parallel setzt ein heterogener Abbrand des Kokes ein, dessen Geschwindigkeit durch



(6) Struktur eines Künstlich Neuronen Netzes. Neuronen werden durch Speicherzellen abgebildet, Synapsen durch Übertragungsfunktionen.



(7) Schematische Umsetzung eines KNN durch Wichtungsfaktoren, die über eine Anzahl an verborgenen Ebenen die Systemeingangsgrößen (e_i) mit den Systemausgangsgrößen (a_i) verknüpfen.



a, c - Geschwindigkeitsverteilungen, g - Temperaturverteilung
 b, d, e, h - Speziesverteilungen, f - Koksabbrandrate

(8) Verteilung der Geschwindigkeit und verschiedener Spezies in einer Kohlenstaubflamme.
 Quelle: Klaus Görner in Rebhan, E.: Energiehandbuch, 2002.

diffusive Transportprozesse (Partikelgrenzschicht und im Porensystem der Kohlekörner) kontrolliert wird (vgl. Koksabbrandrate in kg/s in Teilbild f). Zwischenstufenprodukt aller Oxidationsschritte ist Kohlenmonoxid (CO, Teilbild d). Die Verteilung des Kohlendioxids als ein wesentliches Verbrennungsendprodukt ist in Teilbild h zu

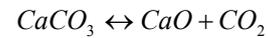
erkennen. Insgesamt also ein sehr komplexer Teilprozess. Die Reaktion der flüchtigen Bestandteile ist mit einer Wärmetönung verbunden, wodurch die Temperatur zeitlich sehr schnell ansteigt und auf der Flammenachse zu einem Maximum führt. Auf der Flammenachse selbst kann die Reaktion nicht so heftig erfolgen, da hier Sauerstoffmangel

vorliegt. Außerhalb des Flammenkerns fehlt Brennstoff und es herrscht Sauerstoffüberschuss.

Alle Teilprozesse, wie sie von Faraday an einer Kerze beschrieben wurden, treten also auch bei technischen Flammen auf.

Calcinator in einer Anlage zur Zementherstellung

Im Calcinator einer Anlage zur Zementherstellung wird der eingesetzte Kalkstein entsäuert, das heißt das chemisch gebundene CO₂ freigesetzt. Dies geschieht nach der Brutto-Reaktionsgleichung:



Zur Bereitstellung der notwendigen Energie wird Kohle im Reaktor verbrannt. Die Kohle und das Zement-Rohmehl liegen im Reaktor mit einer sehr hohen Beladung vor, so dass sowohl der turbulente Gastransport als auch die Strahlung davon beeinflusst werden. Zu diesen beiden Themenfeldern werden derzeit umfangreiche wissenschaftliche Entwicklungsarbeiten durchgeführt.

Die Geometrie des Calcinators ist in Abbildung (9) zu sehen. Darin sind die Messebenen mit Ziffern bezeichnet. Der Vergleich zwischen Messung und Rechnung ist in Abbildung (10) dargestellt. Der Reaktor wird von unten aus zwei Strängen mit Abgas aus einem Drehrohfen und einer zusätzlichen Rauchgasleitung (Messebenen 1 und 4) angeströmt. Über einen Zyklonabscheider verlässt das Abgas das System (Messebene 8).

Abbildung (11) zeigt entlang des Rauchgaswegs verschiedene Profile von gemessenen und berechneten Größen. Daraus wird ersichtlich, dass die Übereinstimmung sehr gut ist.

Kohlekraftwerk (700 °C-Kraftwerk)

Durch Anheben der Frischdampfparameter (Temperatur, Druck) kann der Wirkungsgrad

bei Dampfkraftwerken gesteigert werden. Stand der Technik sind Frischdampftemperaturen von 600 °C und Frischdampfdrücke von 300 bar. Durch weitere Anhebung auf 700 °C und 350 bar sollen Netto-Wirkungsgrade von bis zu 50 Prozent erreicht werden. Derzeit werden umfangreiche Werkstofftests für die heißgehenden Komponenten durchgeführt, und die Machbarkeit wird im Rahmen einer Predesign-Studie für ein solches Kraftwerk geprüft. Abbildung (12) zeigt ein Schaltschema für ein 700 °C Kraftwerk.

Bei solchen Kraftwerken erfolgt die Wärmezufuhr bei Drücken oberhalb des kritischen Druckes, das heißt der Phasenwechsel, also die Verdampfung des Wassers, erfolgt außerhalb des Nassdampfgebietes bei gleitender Temperatur. Der Frischdampfzustand im Temperatur-Entropie-Diagramm verschiebt sich nach links. Dies erfordert eine oder auch zwei Wiederaufheizungen des Dampfes nach Expansion in der Hochdruck- beziehungsweise der Mitteldruckturbine, um zu hohe Dampfnasen am Austritt der Niederdruckturbine zu vermeiden und einen möglichst hohen Wirkungsgrad zu erzielen. Darüber hinaus ist eine achtstufige Speisewasservorwärmung mittels Anzapfdampf auf eine Endtemperatur von rund 330 °C vorgesehen. Zur Vermeidung von Exergie-Mischungsverlusten bedingt dies auch eine Vorwärmung der Verbrennungsluft, die mit Rauchgas erfolgt. Abbildung (13) zeigt das Ergebnis einer Sensibilitätsanalyse für diesen Kraftwerksprozess.

Zur Berechnung von Teillastzuständen ist in Abbildung (14) beispielhaft der Wirkungsgrad über der Last für eine Dampfturbine aufgetragen. Sowohl bei Überlast wie auch bei Teillast sinkt der Auslegungswirkungsgrad.

Die Verbesserung der Kraftwerksprozesse hin zu immer höheren Wirkungsgraden ist durch eine an stetig veränderte technische, wirtschaftliche und gesetzliche

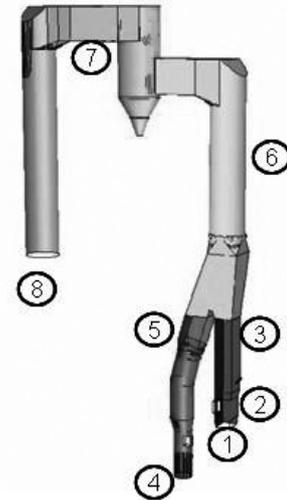
Rahmenbedingungen angepasste dynamische Entwicklung gekennzeichnet. Soweit die Erzeugungskosten gesenkt werden können, läuft diese Entwicklung automatisch ab. So konnte der "Stand der Technik" beim Steinkohle-Dampfkraftwerk in den letzten 15 Jahren in Bezug auf den Wirkungsgrad um rund fünf Prozentpunkte und im gleichen Zeitraum beim Erdgaskraftwerk sogar um rund acht Prozentpunkte verbessert werden.

Thermische Abfall- und Reststoff-Behandlungsanlage

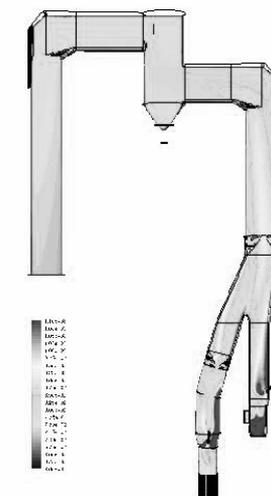
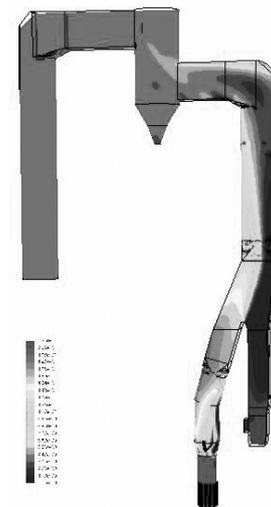
CFD-Simulation der Verbrennung im Feuer- und Strahlraum des Dampferzeugers

Der Betrieb thermischer Abfallbehandlungsanlagen gestaltet sich hauptsächlich wegen der Eigenschaften des Brennstoffs schwierig. Dies hängt mit den inhomogenen und zeitlich schwankenden Zusammensetzungen zusammen, die für die Berechnung unscharfe Randbedingungen (fuzzy conditions) nach sich ziehen. Für die Optimierung des Anlagenbetriebs haben sich daher fuzzy logic-Ansätze bewährt, die mit KNN-Modellen kombiniert wurden (siehe unten).

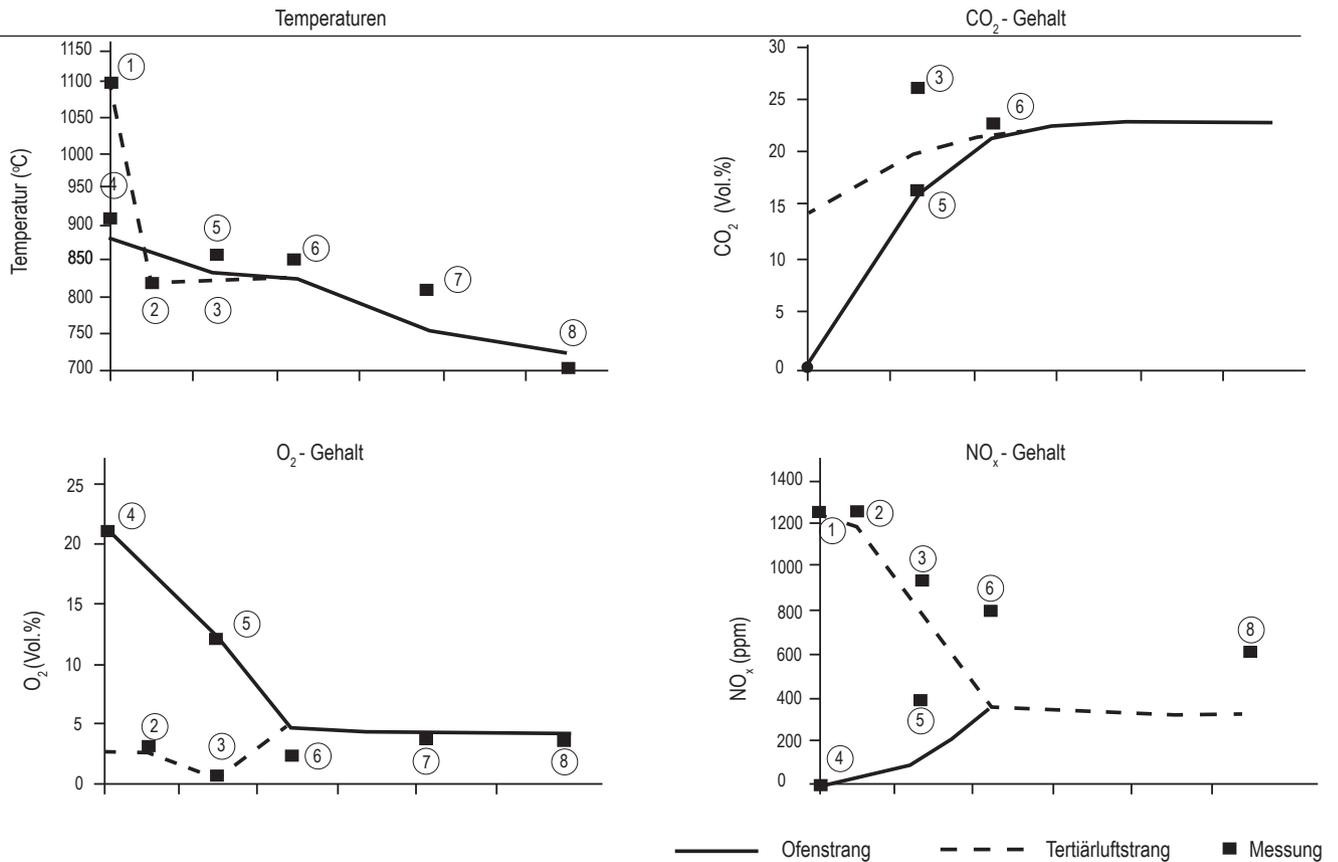
Für eine CFD-Simulation wurden als Randbedingungen zeitliche Mittelwerte für die Abfall-Zusammensetzung und den -energieinhalt angenommen. Damit lassen sich sehr wertvolle Aussagen für die Wärmefreisetzung auf dem Verbrennungsrost, die geometrische Gestaltung des Feuer- und Strahlraums, die keramische Auskleidung (Isolation und Korrosionsschutz) der Feuerraumwände und die Sekundärlufteindüsung gewinnen¹²⁻¹⁷. Für eine durchgeführte Studie zeigt Abbildung (15) das numerische Gitter und Abbildung (16) eine Temperaturverteilung in einem vertikalen Schnitt. Hierin lässt sich insbesondere die Sekundärlufteindüsung zur Nachverbrennung erkennen.



(9) Geometrie eines Calcinator in der Zementindustrie.



(10) Berechnete O₂-Konzentration (oben) und Temperaturteilung im Calcinator (unten).



(11) Berechnete Profile und Messwerte von verschiedenen Größen im Calcinator.

Diese Art der Simulation ist sowohl für die Anlagenauslegung als auch für die Optimierung im Betrieb bestens geeignet.

KNN-Simulation zur Optimierung der Feuerungsleistungsregelung

Als Beispiel für ein trainiertes KNN sei das Verhalten einer thermischen Abfallbehandlungsanlage in Bezug auf die erzeugte Dampfmenge angeführt. Zur Demonstration der Güte des Modells dient die Darstellung in Abbildung (17). Darin sind die mit dem KNN-Modell vorhergesagten über den gemessenen NO_x-Emissionen aufgetragen. Würden alle Punkte auf der Winkelhalbierenden liegen, dann wäre das Modell exakt (Idealmodell). Der Fehler (mittleres Fehlerquadrat) ist mit 0,91 aber sehr klein.

Auch das dynamische Verhalten wird sehr realitätsnah beschrieben

(Abb. 18). Lediglich in Bereichen sehr hoher Transienten sind kleinere Abweichungen zu erkennen.

Damit lässt sich ein trainiertes KNN sehr gut für die Optimierung des Fahrbetriebs einsetzen. Unter anderem wurden durch ein solches Vorgehen bei diesen Anlagen auch die Schadstoffemissionen stark reduziert.

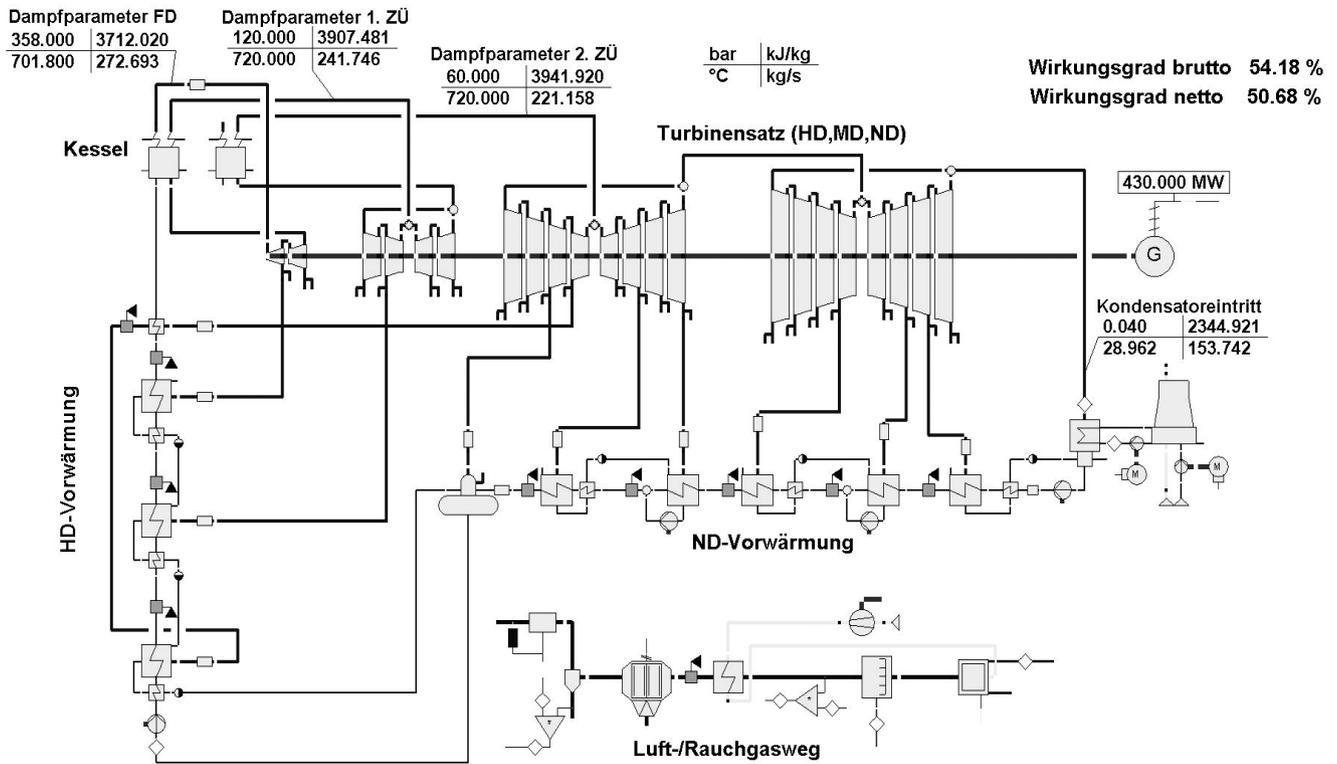
Ausblick

Die mathematische Optimierung von Prozessen der Energietechnik und der Verfahrenstechnik erstreckt sich über eine große Bandbreite. Wegen der Komplexität der einzelnen Prozesse, wie zum Beispiel der Verbrennung, gelingt es hier oft nur die Prozesse isoliert, also ohne Kopplung zu vor- und nachgelagerten Prozessen zu beschreiben. Mit steigender Rechnerleistung werden in diesem Bereich zunehmend funk-

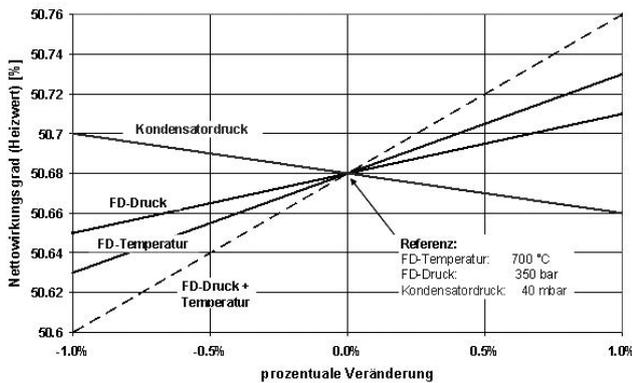
tional zusammenhängende Komponenten, zum Beispiel nacheinander durchströmte Apparate, simultan und gekoppelt beschreibbar sein.

Ein weiterer sehr wichtiger Fortschritt wird in der Kopplung von Strömungs- und Strukturberechnungen gesehen. Mit einer solchen Kopplung zum Beispiel zwischen der Berechnung einer technischen Flamme und einer Strukturanalyse der Umfassungswände lassen sich die eingesetzten Materialien optimieren, da erst dann alle Wechselwirkungen zwischen beiden Teilbereichen realitätsnah erfassbar sind.

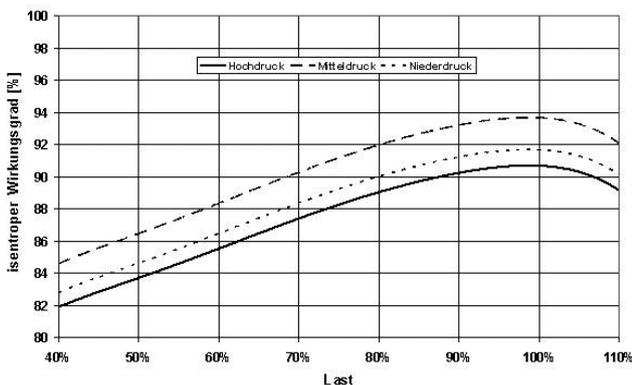
CFD-Modelle sind damit hervorragend für eine Auslegung wie eine Optimierung von Neuanlagen und Anlagen im Betrieb geeignet, benötigen aber immer ein sehr detailliertes Prozessverständnis. Im Gegensatz dazu sind Künstlich Neuronale Netze prädestiniert,



(12) Vereinfachtes Schema des Kreislaufprozesses eines 700 °C Kraftwerks mit zwei Zwischenüberhitzern.



(13) Einfluss der Frischdampf (FD)-Parameter und des Kondensatordruckes auf den Gesamtwirkungsgrad.

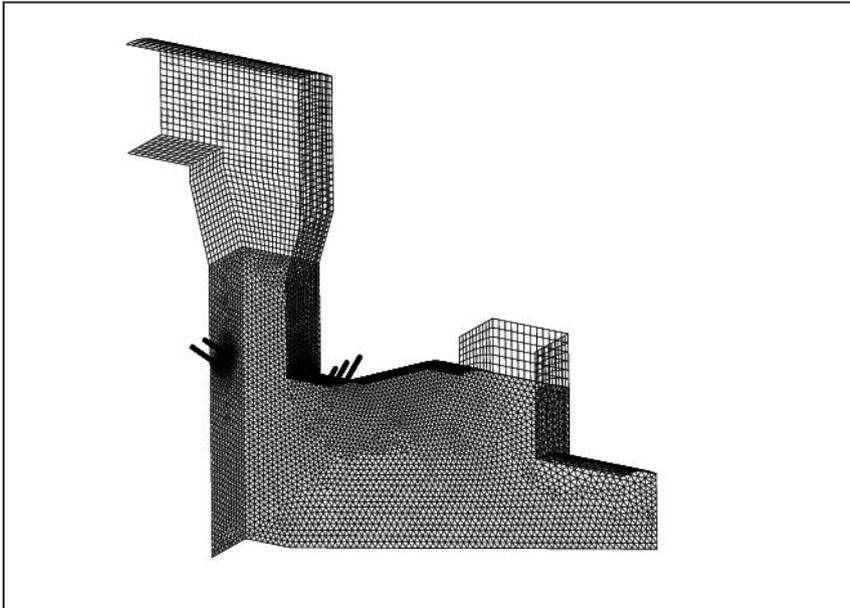


(14) Lastverhalten einer Hoch-, Mittel- und Niederdruckdampfturbine.

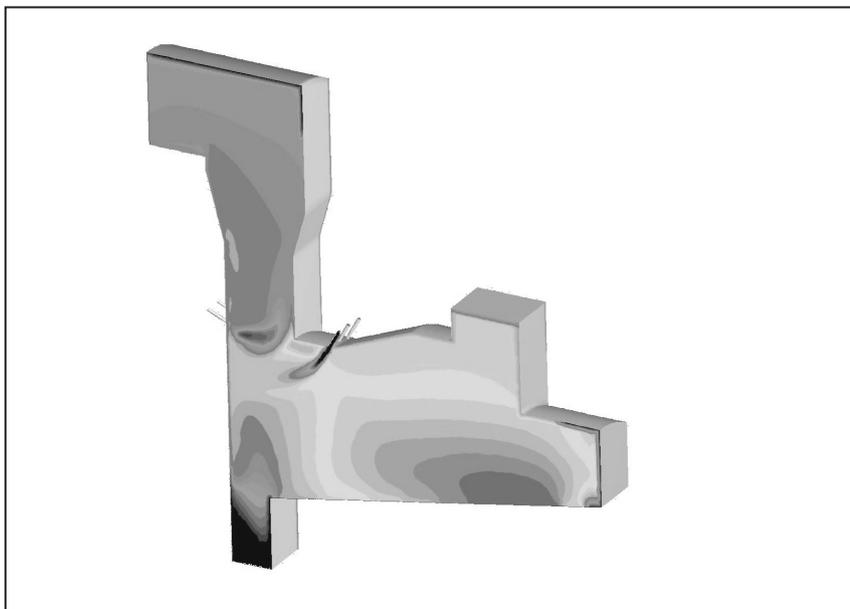
ohne ein solches Prozessverständnis das Systemverhalten aufgrund der Systemein- und -ausgänge zu „erlernen“. Damit eignen sie sich besonders für die Optimierung von bestehenden Anlagen an veränderte Randbedingungen.

Erste Ansätze zur Kopplung von CFD und KNN sind sehr Erfolg versprechend, um dem Ziel weiter näher zu kommen, ein technisches System möglichst so weit auf dem Rechner abzubilden, dass alle wesentlichen Teilprozesse, ihre Wechselwirkungen untereinander und ihre Auswirkungen auf die Umgebung exakt beschrieben und vorhergesagt werden können und dies sowohl statisch als auch dynamisch.

Isoliert werden alle diese Werkzeuge bereits eingesetzt. Zusätzliche Erkenntnisse für einen Gesamtprozess werden sich erschließen lassen, wenn dieser für die Prozessausle-



(15) Numerisches Gitter für die CFD-Simulation einer thermischen Abfallbehandlungsanlage.



(16) Berechnete Temperaturverteilung im Feuer- und Strahlraum einer thermischen Abfallbehandlungsanlage.

gung und Anlagen-/Komponenten-Optimierung in der Projektierungs- und Errichtungsphase durch eine Kopplung von:

- thermodynamischen Kreislaufberechnungen für den Gesamtprozess,
- CFD-Berechnungen für Komponenten und Anlagenteile und
- CAD/CAM-Berechnungen für die Konstruktion sowie für die Pro-

zess-Optimierung in der Inbetriebnahme und im Regelbetrieb durch:

- KNN-Systembeschreibungen ergänzt wird. Im Wesentlichen ist dieses Vorgehen derzeit durch die zur Verfügung stehende Rechnerleistung limitiert.

Triebfeder ist immer ein sicherer, wirtschaftlicher und umweltschonender Betrieb von energietechnischen Anlagen. Dabei ist "Saubere Energie" das Ziel, mathematische Modellierung und Simulation der Weg.

nischen Anlagen. Dabei ist "Saubere Energie" das Ziel, mathematische Modellierung und Simulation der Weg.

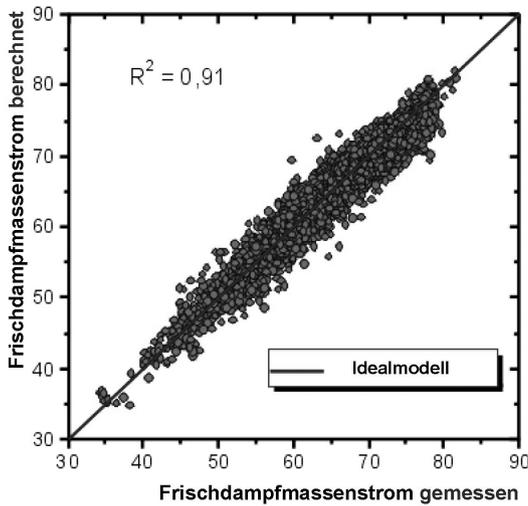
Summary

Steadily rising energy demand due to an increasing population requires the application of the best available technologies: both because energy resources are limited and because requirements for the protection of the environment have become stricter.

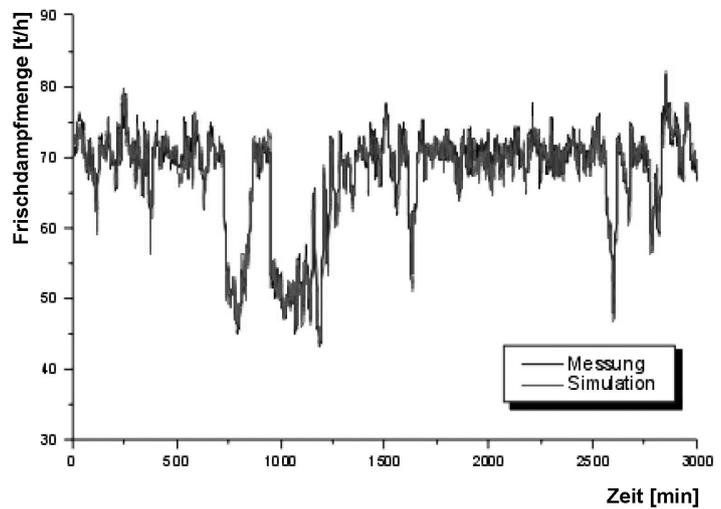
This article deals with computer models for the optimisation of energy conversion plants for different applications. For new power plants, optimal design has to be defined whereas for existing plants, the performance by changing operational parameters is more interesting. The methods presented consider design as well as operational aspects. Examples of some relevant projects are described for illustration.

Anmerkungen/Literatur

- 1) Schilling, H.-D.: Long-term Perspectives for Coal – Energy Needs versus Environment Protection. Erdöl – Erdgas – Kohle, 113 (1997) H.9
- 2) Faraday, M.: Naturgeschichte einer Kerze (Originaltitel: Lectures on the Chemical History of a Candle). Band 3 der Reihe: "reprinta historica didacta", Verlag B. Franzbecker, Bad Salzdetfurth, 1979
- 3) Rebhan, E. (Hrsg.): Energiehandbuch – Gewinnung, Wandlung und Nutzung von Energie. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2002
- 4) Görner, K.: Technische Verbrennungssysteme. Springer-Verlag, Berlin, 1991
- 5) Schmidt, E.; Stephan, K.; Mayinger, F.: Technische Thermodynamik Band 1: Einstoffsysteme. Springer-Verlag, Berlin, 1975
- 6) Görner, K.; Hübner, K. (Hrsg.): Umwelt-Hütte. Springer-Verlag, Berlin, 1999
- 7) Baumbach, G.: Luftreinhaltung. Springer-Verlag, Berlin, 1990
- 8) Strehlow, R.A.: Combustion Fundamentals. Mc Graw-Hill, Singapore, 1985
- 9) Williams, F.A.: Combustion Theory. Addison Wesley Publ. Comp., Redwood City, CA, USA, 1988



(17) Modellgüte bezüglich der Vorhersage der produzierten Dampfmenge einer thermischen Abfallbehandlungsanlage.



(18) Dynamisches Verhalten einer Abfallbehandlungsanlage in Bezug auf die erzeugte Dampfmenge.

- 10) Smoot, L.D.; Pratt, D.T.: Pulverized-Coal Combustion and Gasification. Plenum Press, New York, 1979
- 11) Klasen, Th.; Görner, K.; et al: Optimierung der Feuerung für das Kraftwerk Inowroclaw (Polen) XVII Zjazd Thermodynamikow, Konferencja Naukowa, Polytechnika Kraskomwska im. T. Kosciuszki - Kraków 1999
- 12) Klasen, T., Görner, K.: Simulation und Optimierung einer Müllverbrennungsanlage, VDI-GET Fachtagung „Modellierung und Simulation von Dampferzeugern und Feuerungen“, Braunschweig, 1998
- 13) Klasen, T., Görner, K., Kümmel, J.: Numerische Berechnung und Optimierung der MVA Bonn, VDI-Berichte 1492, 19. Deutscher Flammentag, Dresden, 1999, S. 331-336
- 14) Klasen, T., Görner, K.: Numerical calculation and optimization of a large municipal waste incinerator plant, 2nd Int. Symposium on incineration and flue gas treatment technologies, 1999, Sheffield University, U.K.
- 15) Klasen, T., Görner, K.: Einfluss von Feuerraumgeometrie und -wandmaterial auf den Verbrennungsprozess sowie Vorhersage von gefährdeten Gebieten innerhalb einer MVA - mit Hilfe von CFD-Simulationsrechnungen-, VGB-Konferenz: „Thermische Abfallverwertung 2000, 2000, Essen
- 16) Klasen, T., Görner, K.: Einfluss diverser Sekundärluftzündungskonzepte auf die Müllverbrennung mittels CFD-, VDI-Berichte 1629, 20. Deutscher Flammentag, 2001, Essen
- 17) Klasen, T., Görner, K., Auel, W., Sudau, B.: Optimierung des MHW Bremen auf Basis von CFD-Simulationen und Betriebserfahrungen nach dem Umbau, VGB-Tagung „Thermische Abfallverwertung 2006“, 2006, Hamburg

Die Autoren

Klaus Görner studierte von 1975 bis 1981 an der Universität Stuttgart Verfahrenstechnik mit den Schwerpunkten Systemdynamik und Chemische Verfahrenstechnik. Seine Promotion erfolgte 1986 mit dem Thema „Simulation turbulenter Strömungs- und Wärmeübertragungsvorgänge in Großfeuerungsanlagen“. Nach der Habilitation 1992 im Fach Verbrennungstechnik, ebenfalls an der Universität Stuttgart, ging er in die Industrie und leitete beim Anlagenbauer Lentjes in Düsseldorf die „Projektiertung Feuerungen“. Die Fusion von Lentjes mit Babcock führte ihn nach Oberhausen, wo er für die Abwicklung, die Inbetriebnahme und die MSR-Technik von Gas-, Öl- und Sonderfeuerungen mit Prokura verantwortlich zeichnete. Während der gesamten Industrietätigkeit nahm er einen Lehrauftrag an der Universität Stuttgart wahr. 1996 folgte er einem Ruf an die damalige Universität Essen auf den Lehrstuhl für Umweltverfahrenstechnik und Anlagentechnik (LUAT). Seit 2002 ist er zusätzlich wissenschaftlicher Vorstand des Gaswärme-Instituts (GWI) in Essen. Das GWI ist ein außeruniversitäres Branchen-Institut der Gaswirtschaft, das sich mit dem Einsatz von gasförmigen Brennstoffen in den unterschiedlichsten Bereichen beschäftigt. Neben der Verbrennungstechnik und der mathematischen Modellbildung und Simulation verschiedenster Prozesse, beschäftigt er sich auch mit der Prozessidentifikation und Optimierung von Prozessen mit Hilfe von Künstlich Neuronalen Netzen (KNN). Er ist Mitglied in zahlreichen Gremien verschiedenster Einrichtungen und Verbände wie Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber (VGB), Deutsche Vereinigung für Verbrennungsforschung (DVF), Verein

Deutscher Ingenieure (VDI), Energieforschung Ruhr (ef.Ruhr), Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen (AiF). Als Mitglied des Lenkungsreises des Kompetenznetzwerks Kraftwerkstechnik NRW beschäftigt er sich mit langfristigen Perspektiven der Energieversorgung.

Gerd Oeljeklaus studierte von 1976 bis 1982 an der damaligen Universität Essen Maschinenbau mit den Schwerpunkten Energie- und Verfahrenstechnik. Nach seinem Studium war er zunächst wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl „Technik der Energieversorgung und Energiewirtschaft (TEE)“ der Universität Essen. Er promovierte 1987 über das Thema „Thermohydraulische Berechnung vermaschter Fernwärmeheizwassernetze“. 1988 erfolgte seine Ernennung zum wissenschaftlichen Assistenten und 1991 zum Oberingenieur. Zum Thema fortschrittliche Kraftwerksprozesse war er insbesondere für die Bearbeitung und Abwicklung von EC-Projekten in Zusammenarbeit mit der Kraftwerksindustrie verantwortlich. Nach der Fusion der Universitäten Duisburg und Essen wechselte er 2004 zum Lehrstuhl für Umweltverfahrenstechnik und Anlagentechnik (LUAT). Er ist externer Dozent an der Kraftwerksschule e.V. in Essen und seit 2005 Geschäftsführer der Deutschen Vereinigung für Verbrennungsforschung e.V. (DVF).

Formelzeichen und Konstanten

A	Fläche		[m ²]
C ₁₂	Strahlungsaustauschzahl zwischen Fläche 1 und 2		[-]
E	Energie		[J]=[Nm]
g _i	Massenanteil der Komponente / Spezies i		[-]
h _i	spezifische Enthalpie der Komponente / Spezies i		[kJ/kg] oder [kJ/kmol]
H	Enthalpie		[J]=[Nm]
H _u	Heizwert		[kJ/kg]
L	Arbeit		[Nm=J]
m	Masse		[kg]
p	Druck		[bar]=[10 ⁵ Pa]
Q	Wärme		[J]
R	Gaskonstante		[J/(mol K)]
t	Zeit		[s]
T	Temperatur		[K]
s	Entropie		[J/(kg K)]
u	Geschwindigkeit		[m/s]
U	innere Energie		[Nm]=[J]
v	spezifisches Volumen		[m ³ /kg]
V	Volumen		[m ³]
w	Geschwindigkeit		[m/s]
z	Ortskoordinate (geodätische Höhe)		[m]
Γ	allgemeiner Austauschkoefizient		[*]
Δ _b h	Bildungsenthalpie		[kJ/kg] oder [kJ/kmol]
Δ _r h	Reaktionsenthalpie		[kJ/kg] oder [kJ/kmol]
θ	Temperatur		[°C]
ε	Emissionsgrad		[-]
φ	allgemeine Zustandsgröße (skalar oder vektoriell)		[*]
v	stöchiometrischer Koeffizient		[-]
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante	= 5,67032 · 10 ⁻⁸	[W/(m ² K ⁴)]
η	Wirkungsgrad		[- oder Prozent]

[*] Dimension der Variable von deren jeweiligen physikalischen Bedeutung abhängig.

Indizes

tiefgestellt:		hochgestellt:	
C	Carnot	RG	Rauchgas
kin	kinetisch	t	technisch
pot	potentiell	V	Verlustenergie
0	Umgebungsbedingung	1	Zustand 1
2	Zustand 2	12	Zustandsänderung von 1 nach 2
			* molenbezogen

Abkürzungen

CAD	Computer Aided Design	Rechnerunterstützte Konstruktion
CAM	Computer Aided Manufacturing	Rechnerunterstützte Fertigung
CFD	Computational Fluid Dynamics	Rechnergestützte Strömungsmechanik
KNN	Künstlich Neuronales Netz	
ORC	Organic Rancine Cycle	Organischer Rankine Kreislauf



Gerd Osjéklau. Foto: Timo Bobert

DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

ub | universitäts
bibliothek

Dieser Text wird über DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt. Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

DOI: 10.17185/duepublico/73778

URN: urn:nbn:de:hbz:464-20210201-160255-9

Alle Rechte vorbehalten.