

Prozessbewertung und Exergieanalyse für ein Heizkraftwerk

Mathias Penkuhn, Mathias Hofmann, Sebastian Meinke und Christian Lösche

1.	Einleitung	1
2.	Prozessgütebewertung und Exergieanalyse	2
3.	Prozessbeschreibung, Modellbildung und Simulation	4
4.	Ergebnisse	8
5.	Fazit und Ausblick	11
6.	Quellen	12

1. Einleitung

Konventionelle Kraftwerke zur Bereitstellung von Strom und Wärme stehen durch den Ausbau von Erzeugungsanlagen auf Basis erneuerbarer Energiequellen vor dem Hintergrund der Sicherstellung der Versorgungssicherheit, der Einsatzflexibilität und eines ökonomischen Betriebs vor Herausforderungen. Dabei sind vor allem die variablen Kosten, die Brennstoff- und Betriebs- und Wartungskosten, relevant [1]. Vor diesem Hintergrund sind Systeme zur Prozessgüteüberwachung, eingesetzt zur Sicherstellung einer kontinuierlichen Überwachung und Optimierung des Kraftwerksprozesses, von großer Bedeutung, da nur so ein Betrieb mit höchstmöglicher Effizienz und Rentabilität sichergestellt werden kann [2].

Die Prozessgüteüberwachung [3] stützt sich dabei grundlegend auf mathematische Prozessmodelle, welche die anfallenden Prozessdaten der Anlage verarbeiten. Dies ermöglicht es, den Zustand der Gesamtanlage sowie einzelner Teile davon kontinuierlich zu bewerten, bspw. durch die Bestimmung von Wirkungsgraden, den Vergleich von Soll- und Istzuständen und die Messdatenvalidierung. Die damit verbundenen Informationen können direkt zur thermodynamischen und prozesstechnischen Verbesserung des Anlagenbetriebs, zur Minimierung der Kosten und zur Erhöhung der Verfügbarkeit genutzt werden.

Mit dem VGB-Standard S-012 [4] steht dabei ein Regelwerk zur Prozessgüteüberwachung in der Energietechnik zur Verfügung. Dabei spielen Gütegrade, die den

Soll- und Ist-Vergleich für den Gesamtprozess als auch für entsprechende Teilprozesse und einzelne Komponenten widerspiegeln, eine tragende Rolle. Da ein Sollzustand dabei nur hypothetisch durch entsprechende Simulationen von Vergleichsprozessen unter Berücksichtigung veränderlicher Lastzustände sowie Umgebungs- und Randbedingungen definiert werden kann, ergibt sich eine dazugehörige, inhärente Unsicherheit. Damit stellt sich die Frage, ob die damit bestimmten Einsparpotenziale für einzelne Komponenten und den Gesamtprozess realisiert werden können, da diese beispielsweise durch anlagentechnische Einflüsse und veränderte Betriebsbedingungen nicht immer zur Verfügung stehen. Aufbauend auf den Ergebnissen der konventionellen, thermodynamischen Ansätze steht mit der Exergieanalyse [5] ein Werkzeug zur Verfügung, welches zusätzliche Informationen über die thermodynamische Prozessgüte bereitstellt, die bei vorgenannten Ansätzen nicht zur Verfügung stehen. Dabei besteht keine Abhängigkeit von zu definierenden Vergleichsprozessen und es können sowohl einzelne Komponenten als auch der Gesamtprozess abschließend bewertet werden.

Im Folgenden soll daher am Beispiel des Heizkraftwerks Moabit die Anwendbarkeit der Exergieanalyse zur Prozessgüteüberwachung durch die Implementierung im Simulationsprogramm Epsilon Professional sowie die Bewertung und den Vergleich verschiedener Betriebszustände der Anlage untersucht werden.

2. Prozessgütebewertung und Exergieanalyse

Die Anwendung modellbasierter Systeme ermöglicht die Bestimmung geeigneter Kennzahlen zur Prozessgüteüberwachung, die es erlauben, die Qualität des Kraftwerksprozesses kontinuierlich zu bewerten.

Konventionelle Prozessgütebewertung

Auf der Ebene des Gesamtprozesses ist der thermische Wirkungsgrad zur Bewertung des Prozesses geeignet. Dabei sind, je nach Art und Zweck der Anlage, der elektrische Nettowirkungsgrad des gesamten Kraftwerksblocks oder der Brennstoffausnutzungsgrad, bei gleichzeitiger Erzeugung von elektrischer Energie und Wärmeauskopplung für Fernheizsysteme, als Vergleichs- und Bewertungsgrößen heranzuziehen. Um derartige Wirkungsgraddefinitionen für verschiedene Anlagen, Technologien und Zeiten vergleichbar zu machen, müssen diese auf einheitliche Randbedingungen bezogen worden sein und betreffen grundsätzlich bestimmte Festlegungen und Daten an der Gesamtsystemgrenze, die zum Zeitpunkt der Bewertung nicht beeinflussbar sind.

Wird im Rahmen einer Prozessgüteüberwachung [3] der Anlagenzustand kontinuierlich bewertet, so kann der aktuelle Anlagenzustand anhand eines thermodynamischen Simulationsmodells, bspw. in Epsilon Professional, bestimmt und die dazugehörigen Kennzahlen berechnet werden. Anschließend können sukzessiv, potenziell optimale Anlagenzustände (What-if-Analyse) unter Berücksichtigung der gegebenen Rand- und Umgebungsbedingungen sowie vorgegebe-

ner Referenzkurven einzelner Modellkomponenten bei bestmöglichem Verhalten bestimmt werden [6]. Durch den Vergleich der jeweils aktuellen Werte mit dem berechneten Referenzwert können zusammenfassende Kennzahlen (KPI – Key Performance Indicator), bspw. in Form von Gütegraden, Verlusten oder Brennstoffmehrerbräuchen, bestimmt werden. Gleichzeitig können die Auswirkungen der Veränderung einzelner Einflussgrößen berechnet werden. Entsprechende Abweichungen zwischen den Soll- und Istzuständen eignen sich zur Darstellung möglicher Einsparpotenziale, welche jedoch stark durch die vorher getroffenen Annahmen zum Referenzprozess beeinflusst sind.

Exergieanalyse

Zur thermodynamischen Analyse des Kraftwerksbetriebs kann die Exergieanalyse [5] [7] auf der Ebene des Gesamtprozesses und der einzelnen Komponenten eingesetzt werden. Da die Exergie ein Maß für die Quantität und Qualität der Energie ist, können verschiedene Energieformen konsistent verglichen werden, was die Prozessbewertung im Sinne der Einheit von Stoff- und Energieumwandlung ermöglicht. Damit können bei einem KWK-Prozess die energetisch nicht vergleichbaren Koppelprodukte Strom und Wärme abschließend bewertet werden. Dabei lässt sich die thermodynamische Effizienz sowohl für den Gesamtprozess als auch für einzelne Komponenten bestimmen, wobei keine zusätzliche Definition und Berechnung etwaiger Referenzprozesse notwendig ist.

Auftretende thermodynamische Verluste in einem System können durch die Bestimmung der Exergievernichtung E_D auf Basis der Exergiebilanz aufgedeckt werden. Treten auf Basis des Gesamtprozesses Verluste in Form von Stoff- oder Energieströmen an die thermodynamische Umgebung auf, so sind auch exergetische Verluste E_L an die Umgebung identifizierbar. Gleichzeitig können, analog zur konventionellen, energetischen Prozessbewertung, auch die entsprechenden Beträge des exergetischen Aufwands E_F und Nutzens E_P [5] und damit auch der exergetische Wirkungsgrad bestimmt werden. Im stationären Fall ergibt sich damit:

$$\text{Gleichung 1: } 0 = E_F - E_P - E_D - E_L$$

$$\text{Gleichung 2: } \varepsilon = E_P/E_F$$

Da sich die Exergievernichtung des Gesamtsystems aus den Beiträgen der einzelnen Komponenten zusammensetzt, kann der Einfluss der einzelnen Komponenten auf die Verringerung des Gesamtwirkungsgrad aufgezeigt werden. Die Verbindung zwischen Komponente und Gesamtprozess kann über den Exergievernichtungskoeffizienten bestimmt werden.

$$\text{Gleichung 3: } y_{D,i} = E_{D,i}/E_{F,ges}$$

Grundsätzlich stellt die Exergieanalyse Informationen bereit, die nicht mithilfe einer konventionellen, thermodynamischen Analyse unter Nutzung von Massen- und Ener-

giebilanzen zur Verfügung stehen. Die meisten Simulationsprogramme, bspw. Epsilon Professional, stellen dabei aber nur rudimentäre Möglichkeiten zur Exergieanalyse bereit. Während die physikalische Exergie einzelner Stoffströme grundsätzlich bestimmt werden kann, fehlen die Möglichkeiten zur integrierten Berechnung chemischer Exergien auf Basis eines definierbaren thermodynamischen Umgebungsmodells, zum Aufstellen und Lösen der Exergiebilanzen für generische Komponenten, zur Definition zusammengefasster, benutzerdefinierter Komponenten, und zur Bestimmung und Ausgabe der entsprechenden exergetischen Kennzahlen vollständig. Um eine einfache Anwendung zu ermöglichen, wurden die entsprechenden Funktionen in Epsilon Professional per EbsScript ergänzt, sodass auf Grundlage einer vorhandenen Simulation eine vollständig automatisierte Exergieanalyse durchgeführt werden kann. Der Aufbau der Programmmodule ist in Abbildung 1 dargestellt.

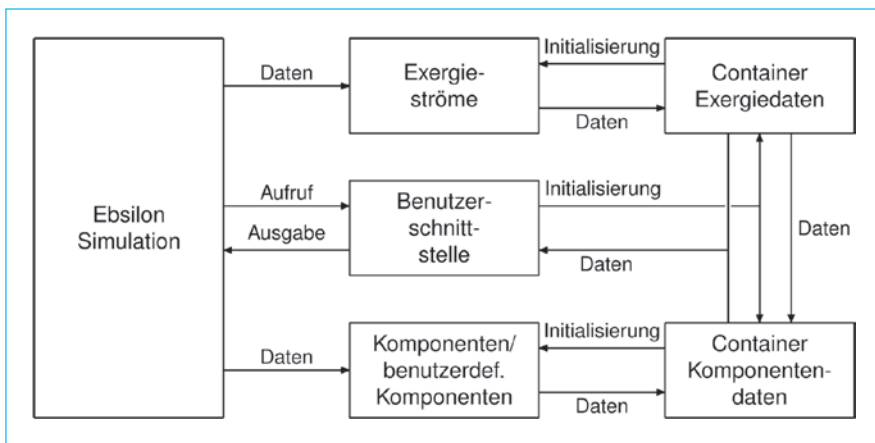


Abb. 1: Programmstruktur der automatischen Exergieanalyse in Epsilon Professional

3. Prozessbeschreibung, Modellbildung und Simulation

Die vorgestellten Entwicklungen und anschließenden Untersuchungen werden am Beispiel des Heizkraftwerks Moabit (HKW Moabit) durchgeführt. Das HKW Moabit arbeitet nach dem Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und wird zur Erzeugung von Elektroenergie und Fernwärme eingesetzt.

Prozessbeschreibung

Die Anlage ist als zirkulierende, atmosphärische Wirbelschichtfeuerung [8] ausgeführt. Diese besteht aus einer Wirbelbrennkammer (WBK), zwei parallel geschalteten Rückführzyklonen (RFZ), zwei Fließbettkühlern (FBK), einer Nachschaltheizfläche (NSHF), einem Heißgas-Elektrofilter (Efi) und einem rekuperativ-arbeitenden Röhrenluftvorwärmer (LuVo). Als Brennstoffe werden Steinkohle und Biomasse, bis zu einem Anteil von 20 % am Gesamtbrennstoffmassenstrom, eingesetzt.

Der Dampferzeuger selbst ist als Benson-Zwangsdurchlaufkessel mit einfacher Zwischenüberhitzung und Schwachlastschaltung ausgeführt. Die Heizflächen des Kes-

sels für Economiser, Verdampfer, Überhitzer und Zwischenüberhitzer sind dabei auf Wirbelbrennkammer, Rückführzyklone, Fließbettkühler und Nachschaltheizfläche aufgeteilt. Diese sind über Rohrleitungen, mit dazwischen angeordneten dazugehörigen Sammlern, Einspritzkühlern und Trenngefäßen, miteinander verbunden.

Im Designfall kann ein Frischdampfmassenstrom von 90,7 kg/s mit einer Temperatur von 540 °C und einem Druck von 196 bar erzeugt werden. Die Zwischenüberhitzung erfolgt bei 42 bar und erreicht eine Dampftemperatur von 540 °C. Der Turbosatz, bestehend aus Dampfturbine und Generator, kann eine elektrische Nettoleistung von maximal 89 MW bereitstellen. Durch die eingesetzte Entnahmekondensationsturbine kann zusätzlich Wärme in das Fernheiznetz ausgekoppelt werden, wobei mit der eingesetzten Durchlaufkühlung auch ein vollständiger Kondensationsbetrieb realisiert werden kann.

Modellbildung

Das Simulationsmodell des Kraftwerksprozesses ist der wesentliche Bestandteil eines Systems zur Prozessgüteüberwachung und bildet die Basis für weitergehende Untersuchungen. Dabei waren zu Projektbeginn neben Simulationen des Wasser-Dampf-Kreislaufs und aktuellen verfahrenstechnischen und R&I-Fließbildern, auch Abnahmemessungen von Dampferzeuger [9] und Wasser-Dampf-Kreislauf [10] und aktuelle Leistungskontrollmessungen am Turbosatz und Dampferzeuger [11], verfügbar.

Aus Sicht einer ganzheitlichen Betrachtung und Bewertung des Gesamtsystems, ergibt sich die Notwendigkeit, dass vorhandene Simulationsmodell um die Teilsysteme Dampferzeuger und Rauchgasweg zu erweitern. Eine Übersicht des Gesamtmodells ist in Abbildung 2 zu finden. Dabei ergeben sich, bedingt durch die technologischen Besonderheiten der Anlage, besondere Herausforderungen bei der Modellbildung des Dampferzeugers.

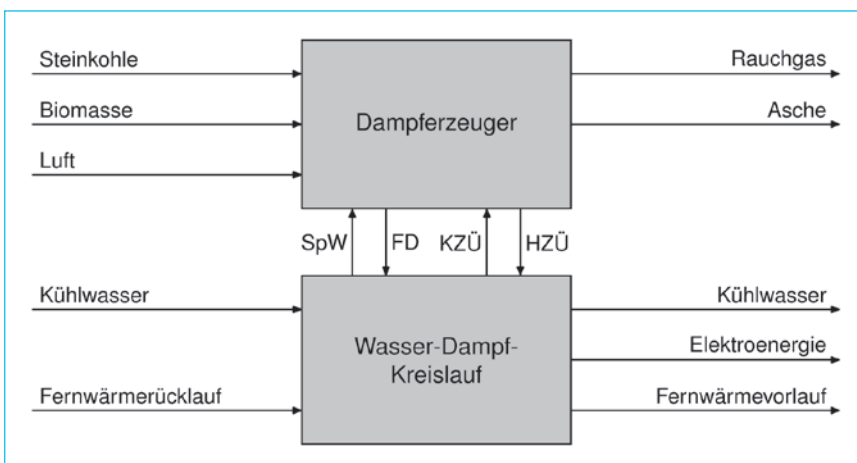


Abb. 2: Gesamtmodell des Kraftwerksprozesses mit einzelnen Modellteilen und zugeordneten Stoff- und Energieströmen

In der zirkulierenden, atmosphärischen Wirbelschichtfeuerung findet eine in-situ Entschwefelung der Rauchgase statt und diese weist prozessbedingt nur geringe Emissionen von Stickoxiden auf. Dies wird durch große Umlauf- und Rückführströme der Asche erreicht, wodurch die Verbrennung unter nahezu isothermen Bedingungen bei rund 850 °C stattfindet und ein vollständiger Umsatz der Brennstoffe erreicht wird. Die Ascheströme verteilen sich dabei über verschiedene, teilweise parallel geschaltete Komponenten wie Fließbettkühler, Nachschaltheizfläche und Elektrofilter. In Abbildung 3 ist die Verschaltung der Komponenten des Dampferzeugers und des weiteren Rauchgaswegs dargestellt. Auch hier ergeben sich Besonderheiten der Modellierung durch die große Anzahl an Gebläsen zur Fluidisierung der Feststoffe, Brennstoff und Asche, und dem eingesetzten Röhrenluftvorwärmer.

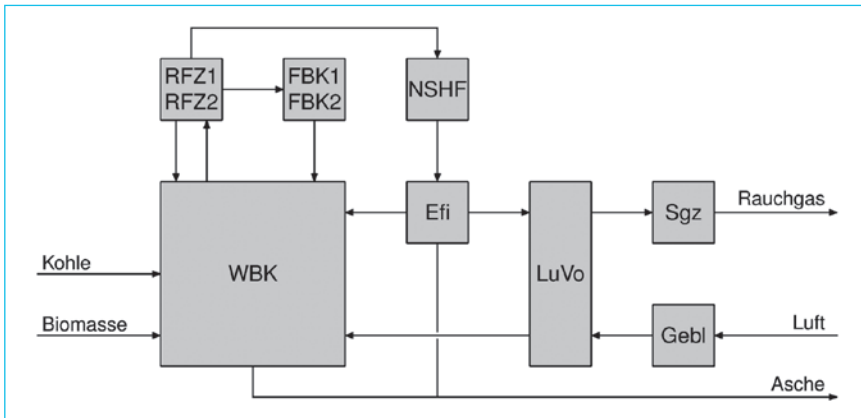


Abb. 3: Technologieschema des Dampferzeugers mit Rauchgasweg des HKW Moabit

Diese Besonderheiten bei der Modellierung von Dampferzeuger und Rauchgasweg führen zu numerisch instabilem Verhalten, das sich durch eine starke Abhängigkeit von Start- und Stoffwerten und einer teilweise vorhandenen Nichtbeobachtbarkeit von Massenströmen innerhalb des Ascheumlaufs mit den Gas-Feststoffströmungen von Asche, Luft und Rauchgas äußert. Dies geht einher mit zeitlichen und räumlichen Inhomogenitäten modelltechnisch relevanter thermodynamischer Zustandsgrößen innerhalb der realen Anlagenbestandteile, womit sich Auswirkungen auf die Simulationsrechnungen ergeben.

Parametrierung und Validierung

Die oben beschriebenen Besonderheiten des Prozesses erschweren die Modellbildung und -validierung. Dabei zeigt sich, dass aus den quantifizierbaren Größen und Systemen nicht zwangsläufig eine geschlossene Simulation der Prozesse möglich ist.

Um die auftretenden Probleme zu lösen und nutzbare Ergebnisse für die verschiedenen Teilsysteme zu erzielen, werden bewährte Ansätze verwendet. Thermodynamische Stoffdaten für Luft und Rauchgase als auch Brenn- und Feststoffe werden auf Basis der FDBR-Gleichungen [12] [13] und der dazugehörigen Empfehlungen einzelner chemischer Bestandteile berechnet. Für Wasser und Wasserdampf wer-

den die Berechnungsvorschriften nach IAPWS-IF97 [14] angewendet. Soweit möglich, werden berechenbare Teilsysteme definiert und anhand vorhandener Daten parametrisiert. Innerhalb des Dampferzeugers können die Ascheumlaufströme teilweise über Temperaturdifferenzen berechnet werden. Nicht quantifizierbare Luftmassenströme, zu denen keine Daten vorliegen, werden als zusammengefasste Ströme zum Schließen von Massen- und Energiebilanzen berücksichtigt.

Auf Basis dieser Annahmen und Parameter wird die Validierung des Modells anhand vorhandener historischer Betriebsdaten durchgeführt. Die umfangreiche Instrumentierung ermöglicht die Nutzung von über 300 verfügbaren Messstellen, die anhand ihrer Fließbildposition mit den dazugehörigen Messwertsignalen identifiziert und, soweit im Betriebsdatenarchiv der Anlage verfügbar, ausgewählt und in das Modell eingefügt werden. Da hierbei jedoch keine detaillierten Daten zu den vorhandenen Genauigkeiten und Fehlern der Messstellen vorhanden sind, wird die Validierungsrechnung vereinfacht mithilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate ohne Berücksichtigung einer besonderen Gewichtung einzelner Messstellen durchgeführt.

Zur Modellvalidierung stehen die Jahre 2018 und 2019 mit jeweils viertelstündlich gemittelten Daten aus dem Kraftwerksbetrieb zur Verfügung. Um diese für den Einsatz im Modell nutzbar zu machen, ist eine vorherige Datenaufbereitung mit entsprechender Vorbereitung, Sichtung und Bereinigung notwendig. Aufgrund der Eigenschaften des Modells ist es notwendig, stationäre Zustände zu identifizieren und den Betriebszustand auf Plausibilität zu prüfen. Dabei wird wie folgt vorgegangen:

1. Identifikation stationärer Zustände durch Vergleich der Soll-Ist-Differenz der Feuerungswärmeleistung
2. Überprüfung des Lastpunktes durch Vergleich mit vorhandenen Betriebsdaten zur Erzeugung von Elektroenergie und der Auskopplung von Wärme zur Fernheizung im P, Q -Diagramm
3. Identifikation vorhandener Betriebspunkte in den Ecken des P, Q -Diagramms
4. Datenaggregation in den identifizierten Eckpunkten innerhalb vorgegebener Grenzen

Die identifizierten Betriebspunkte in den Eckpunkten des P, Q -Diagramms werden als Referenzpunkte genutzt. Um etwaige Schwankungen und Probleme in den Daten auszugleichen, werden mithilfe einer einfachen Kreisgleichung zusätzliche Daten zu den Referenzpunkten aggregiert. Der Radius r gibt dabei die positive und negative Differenz zum Referenzpunkt an.

$$\text{Gleichung 4: } (r_{\text{ref}})^2 = (P - P_{\text{ref}})^2 + (Q - Q_{\text{ref}})^2$$

Die Daten des Lastbereichs des HKW Moabit sind im P, Q -Diagramm in Abbildung 4 dargestellt. Darin sind nicht genutzte Betriebspunkte, bspw. Anfahrzustände, rot gekennzeichnet. Potenziell nutzbare Datensätze sind in blau dargestellt und die

berücksichtigten Lastfälle mit den aggregierten Daten sind grün markiert. Damit ergeben sich die in Tabelle 1 aufgeführten Lastfälle, die aufgrund ihrer charakteristischen Daten den Betrieb in Voll- und Teillast in Sommer und Winter darstellen.

Tab. 1: Ausgewählte Lastfälle zur Modellvalidierung

Lastfall	P/P_{\max} (-)	Q/Q_{\max} (-)	T_0 (°C)	Jahreszeit
1) P_{\max}, Q_{\max}	0,791	0,975	3,7	Winter
2) P_{\max}, Q_{\min}	0,909	0,316	21,1	Sommer
3) P_{\min}, Q_{\max}	0,631	0,112	19,4	Sommer
4) P_{\min}, Q_{\max}	0,529	0,663	6,1	Winter

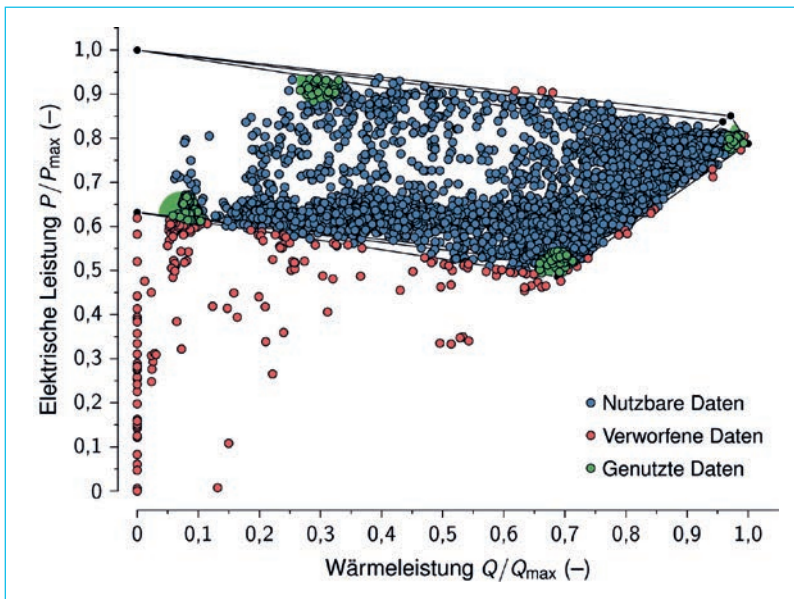


Abb. 4: Betriebspunkte im P, Q -Diagramm

4. Ergebnisse

Die Simulation für das HKW Moabit A hat gezeigt, dass die Modellierung des Kraftwerksprozesses unter detaillierter Berücksichtigung von Dampferzeuger und Rauchgasweg erfolgreich war. Für die in Tabelle 1 gegebenen Lastfälle sind die Validierungsrechnungen erfolgreich durchgeführt worden. Die Güte des Modells kann dabei über die Abweichung der Feuerungswärmeleistung ΔF zwischen Simulation und Messdaten aus dem Prozessleitsystem bewertet werden.

Aus den ausgeführten Simulations- und Validierungsrechnungen ergeben sich die energetischen Kennzahlen des Gesamtprozesses mit der heizwertbasierten Feuerungswärmeleistung F , der elektrischen Leistung P , der Fernwärmeleistung Q und dem daraus ermittelten thermischen bzw. energetischem Wirkungsgrad η .

Darüber hinaus sind die verschiedenen exergetischen Kennzahlen des Gesamtprozesses mit den Werten für den brennwertbasierten exergetischen Aufwand E_F , den exergetischen Produkten für die elektrische Leistung P und die Fernwärmeleistung E_Q und daraus folgend der exergetische Wirkungsgrad ε verfügbar. Zusätzlich ergeben sich die Werte für die Exergievernichtung E_D und die auftretenden Exergieverluste E_L des Gesamtprozesses.

Die Ergebnisse der Simulation für den Gesamtprozess sind in Tabelle 2 für alle vier untersuchten Lastfälle zusammengefasst. Dabei zeigt sich die grundsätzliche Eignung des Modells, da die relative Abweichung der Feuerungswärmeleistung zwischen Simulation und Kontrolldaten 2 % nicht überschreitet. In besonderem Maße tritt der niedrige Exergiestrom der ausgekoppelten Wärme für das Fernheizsystem, bedingt durch die geringe Differenz zur thermodynamischen Umgebungstemperatur, hervor. Weiterhin zeigt sich, dass die spezifische Exergievernichtung, die spezifischen Exergieverluste sowie der exergetische Wirkungsgrad des Gesamtprozesses nur wenig veränderlich sind. Der Einfluss veränderlicher Lastzustände als auch Umgebungsbedingungen tritt jedoch deutlich hervor.

Tab. 2: Simulationsergebnisse für den Gesamtprozess für die verschiedenen Lastfälle

Lastfall	1	2	3	4
ΔF (%)	0,73	0,23	-1,52	-0,48
P/F (%)	27,52	31,99	25,59	31,21
Q/F (%)	55,93	18,36	52,84	9,16
η (%)	83,45	50,36	78,43	40,37
P/E_F (%)	26,08	30,32	24,25	29,59
E_Q/E_F (%)	9,21	3,51	8,76	1,75
E_D/E_F (%)	57,61	58,36	59,42	60,10
E_L/E_F (%)	7,10	7,78	7,59	8,57
ε (%)	35,30	33,83	33,01	31,33

Die Aufteilung der Exergievernichtung auf verschiedene Komponentengruppen ist für alle vier untersuchten Lastfälle in Abbildung 5 und Abbildung 6 vergleichend dargestellt. Hier wird der Unterschied zwischen Volllast- und Teillastbetrieb mit und ohne Wärmeauskopplung besonders deutlich. Dabei zeigen sich betragsmäßig verschiedene Beiträge, wobei der Kessel die betragsmäßig größte Exergievernichtung und damit den größten Einfluss auf den Wirkungsgrad des Gesamtprozesses aufweist. Weiterhin zeigt sich, dass die Komponentengruppen Fließbettkühler/Nachsalthheizfläche und Turbosatz sowie die Verluste an die Umgebung ebenfalls größere Beträge an Exergievernichtung und damit einen Einfluss auf den Gesamtprozess aufweisen. Interessant ist der Vergleich der Exergievernichtung in den Heizkondensatoren und dem Hauptkondensator, die betragsmäßig in Summe konstant, sich jedoch auf die verschiedenen Komponenten je nach Lastfall aufteilen.

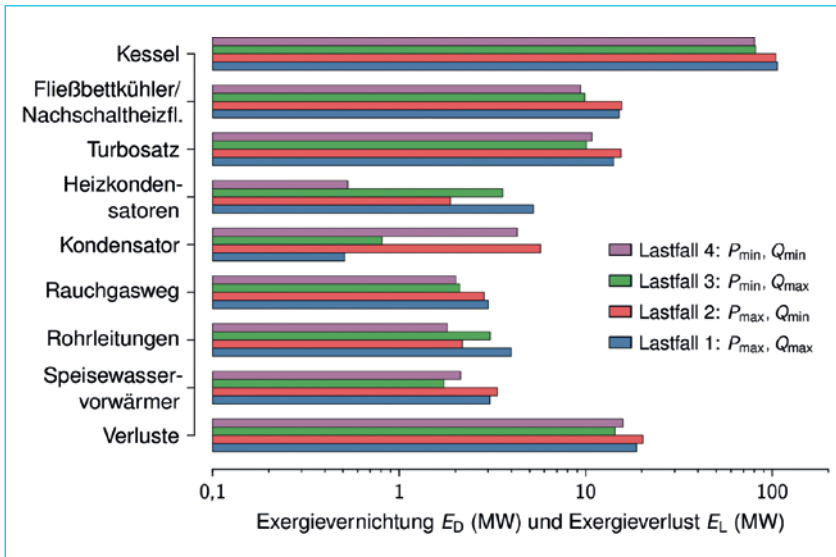


Abb. 5: Exergievernichtigungen und Exergieverluste des Gesamtprozesses

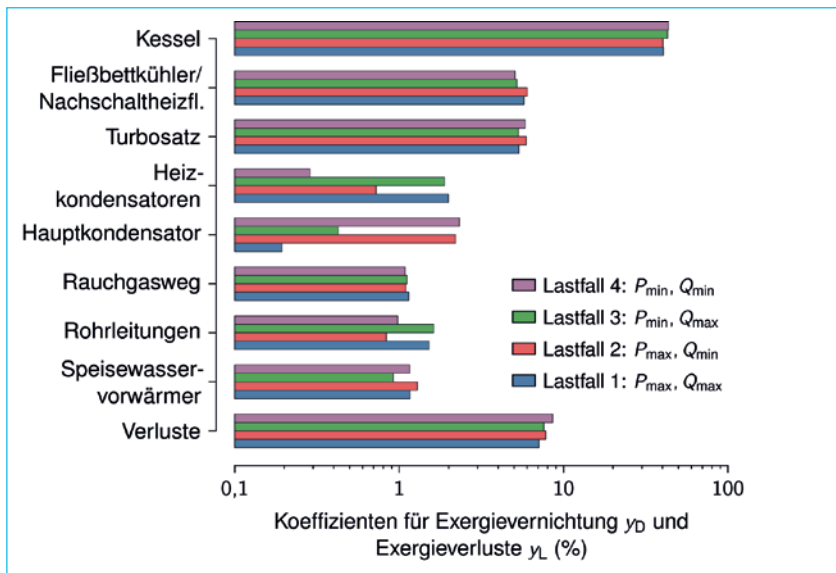


Abb. 6: Vergleich der Koeffizienten für Exergievernichtung und Exergieverluste für verschiedene Komponentengruppen hinsichtlich der verschiedenen Lastfälle

Nutzt man die Informationen, die durch die Bestimmung der Koeffizienten der Exergievernichtung und dem Exergieverlust zur Verfügung stehen, so kann unter Zugrundelegung einer Abfolge verschiedener Teilprozesse der Einfluss dieser auf den exergetischen Wirkungsgrad des Gesamtprozesses, hier beispielhaft in Abbildung 7 für den Lastfall 1, dargestellt werden.

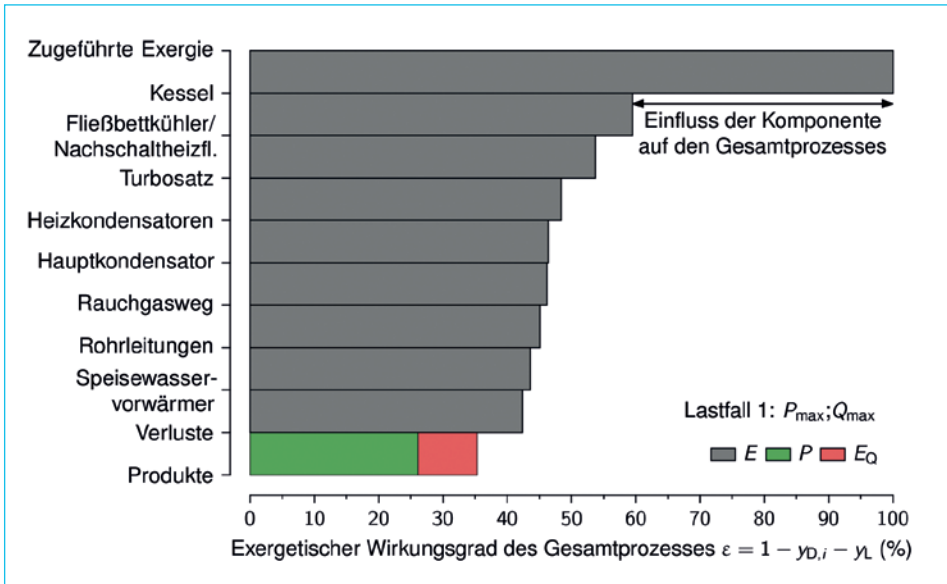


Abb. 7: Einfluss verschiedener Komponentengruppen auf den exergetischen Wirkungsgrad des Gesamtprozesses

Die Ergebnisse der durchgeführten Exergieanalyse zeigen, dass damit der Gesamtprozess und die Komponenten ganzheitlich bewertet werden können. Weiterhin ist die Exergieanalyse geeignet, die Beiträge verschiedener Komponentengruppen zur Exergievernichtung des Gesamtprozesses zu quantifizieren sowie die Verminderung des Gesamtwirkungsgrad in Abhängigkeit der Komponenten und des Lastzustands visuell darzustellen. Abschließend kann sowohl die Exergievernichtung und der Exergievernichtungskoeffizient zur Bewertung und Überwachung einzelner Komponenten und von Komponentengruppen genutzt werden.

5. Fazit und Ausblick

Im Rahmen der Zusammenarbeit der Projektpartner wurde das Simulationsmodell für das Heizkraftwerk Moabit A ertüchtigt und mit der Abbildung des Dampferzeugers und des Rauchgasweges umfassend erweitert. Die Validierung des Modells konnte mit historischen Betriebsdaten erfolgreich durchgeführt werden. Zur automatischen Bewertung des Prozesses wurde die komponentenbasierte Exergieanalyse direkt in Epsilon Professional implementiert. Auf dieser Grundlage konnten verschiedene Lastfälle automatisch simuliert, validiert und die Ergebnisdaten ausgelesen werden.

Die Ergebnisse der Exergieanalyse zeigen dabei die Möglichkeiten der einfachen und konsistenten Bewertung der Koppelprodukte Strom und Wärme in Hinblick auf die thermodynamische Effizienz des Gesamtprozesses. Gleichzeitig konnte die thermodynamische Effizienz einzelner Komponentengruppen und deren Einfluss auf den Gesamtprozess bei unterschiedlichen Lastfällen und externen Randbedingungen aufgezeigt werden.

Die bisher zur Verfügung stehenden Arbeiten werden zukünftig genutzt, um das Modell im Rahmen der Prozessgüteüberwachung des HKW Moabit anzuwenden. Dabei wird das Modell noch um die Möglichkeiten der konventionellen, energetischen Prozessgüteüberwachung mit den dazugehörigen Gütegraden erweitert. Damit wird der Vergleich von konventionellem, energetischem Ansatz mit dem hier vorgestellten exergetischen Ansatz möglich. Nachfolgende Arbeiten werden weitere Betrachtungen zu den Unterschieden beider Ansätze hinsichtlich der bereitgestellten Informationen und den daraus möglichen Ableitungen umfassen. Zusätzlich soll die Eignung der verschiedenen exergetischen Kennzahlen für eine zeit- und lastfallabhängige Prozessgüteüberwachung untersucht werden.

6. Quellen

- [1] Kumar, N.; Besuner, S.; Lefton, D.; Agan, D.; Hilleman, D: Power Plant Cycling Costs, NREL/SR-5500-55433, 2012.
- [2] Frank, M. J.; Mylonas, J.: Prozessgüteüberwachung – Ein einfaches Tool zur nachhaltigen Verbesserung der Betriebsführung und Effizienz. In: VGB PowerTech 85 (2005), H. 12, S. 86-89.
- [3] Knieschke, A.; Deeskow, P.; Hufmann, T.; Pels Leusden, C.: Prozessgüteüberwachung – Moderne Informationssysteme zur Effizienzsteigerung der Kraftwerksprozesse. In: VGB PowerTech 89 (2009), H. 10, S. 62-67.
- [4] VGB-S-012-00-2016-02-DE (2016). Prozessgüte in der Energietechnik, VGB Standard, 08/2016.
- [5] Bejan, A.; Tsatsaronis, G.; Moran, M. J.: Thermal Design and Optimization. New York: Wiley, 1996.
- [6] Schulze, F.; Knieschke, A.; Lösche, C.: Wie (un-)genau sind prozesstechnische KPIs, die als Entscheidungshilfe für die Betriebsführung und Instandhaltung von Kraftwerken verwendet werden? In: Beckmann, M.; Hurtado, A. (Hrsg.): Kraftwerkstechnik 2019. Power Plant Technology. Freiberg: SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH, 2019, S. 483-493.
- [7] Fratzscher, W.; Brodjanskij, V. M.; Michalek, K.: Exergie: Theorie und Anwendung. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1986.
- [8] Bade, H.; Jahn, P.: Umweltfreundliche und abfallfreie Energieerzeugung im Heizkraftwerk Moabit der Bewag. In: VGB Kraftwerkstechnik 71 (1991), H. 1, S. 14- 17.
- [9] Bewag AG: Nachweis der Gewährleistungen sowie Leistungs- und Wirkungsgradversuche am Dampferzeuger Block A des Heizkraftwerkes Moabit, 1990.
- [10] Bewag AG: Nachweis der Gewährleistungen am Turbosatz A im Heizkraftwerk Moabit bei Kondensations- und Heizbetrieb, 1990.
- [11] VPC GmbH: Leistungskontrollmessung am Turbosatz und Dampferzeuger sowie Bestimmung des Blockwirkungsgrades Block A im Heizkraftwerk Moabit 2015, 2016.
- [12] Brandt, F: Brennstoffe und Verbrennungsrechnung. Essen: Vulkan-Verlag, 1999.
- [13] Brandt, F: Dampferzeuger: Kesselsysteme, Energiebilanz, Strömungstechnik. Essen: Vulkan-Verlag, 1999.
- [14] Kretzschmar, H.-J.; Wagner, W.: International Steam Tables – Properties of Water and Steam based on the Industrial Formulation IAPWS-IF97. Berlin: Springer Vieweg, 2019.