

# Modellierung und Simulation von Prozessen in Abfallheizkraftwerken – am Beispiel des Wasser-Dampf-Kreislaufs –

Dr. Reiner Pawellek, Entwicklungsleitung, STEAG Energy Services GmbH, Zwingenberg  
Christoph Jannasch, STEAG Energy Services GmbH, Zwingenberg  
Dr.-Ing. Ragnar Warnecke, GKS - Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt GmbH, Schweinfurt

## Inhalt

1. Motivation.....	1
2. Das Programm.....	2
3. Die Anlage.....	4
4. Das Modell.....	6
4.1 Modellierung der Brennstoffvorgabe.....	7
4.2 Modellierung der Dampferzeuger.....	8
4.3 Modellierung der Dampfturbinen.....	10
4.4 Modellierung der Fernwärme und des kalten Endes.....	11
5. Die Berechnung.....	12
6. Ausblick.....	14
7. Zusammenfassung.....	16
8. Quellen.....	16

## 1. Motivation

Wann ist es sinnvoll, einen Prozess zu simulieren?

Möglichkeit 1: man benötigt eine **Simulation**, weil der Prozess in der Realität (noch) nicht existiert, zum Beispiel bei der Untersuchung neuer Konzepte, der Planung einer neuen Anlage oder des Umbaus einer Anlage oder der Änderung von Randbedingungen (Brennstoff, Umgebungsbedingungen, rechtliche Rahmenbedingungen). In diesem Fall muss die Simulation eine **Vorausberechnung** des Verhaltens der Anlage durchführen. Die Eigenschaften der Komponenten müssen bekannt sein.

Möglichkeit 2: der Prozess existiert, es soll aber überwacht werden, ob die Anlage das gewünschte Verhalten zeigt. Insbesondere soll eine Verschlechterung von Teilen der Anlage diagnostiziert werden können. In diesem Fall muss die Simulation aus vorhandenen Daten (in der Regel Messwerten) eine **Rückrechnung** auf den Zustand der einzelnen Anlagenkomponenten durchführen. Dazu ist es erforderlich, das Modell zu einem bestimmten Zeitpunkt möglichst genau an die Realität anzupassen, und zwar in allen relevanten Betriebs- und Lastpunkten. Hilfreich ist es, wenn das Simulationsprogramm in der Lage ist, nicht nur den Zustand der Anlagenkomponenten zu visualisieren, sondern auch

Schnittstellen zu Programmen bietet, die automatisch auf Störungen reagieren können, beispielsweise eine automatische („closed loop“) Ansteuerung von Rußbläsern zur Reinigung von als verschmutzt erkannten Heizflächen. Solche Systeme sind beispielsweise bei EON in Staudinger, bei RWE in Neurath und bei EnBW in Altbach im Einsatz.

Möglichkeit 3: der Prozess existiert, es besteht jedoch die Möglichkeit, die Fahrweise zu variieren. Dann kann die Simulation dazu verwendet werden, verschiedene Fahrweisen zu vergleichen und eine Optimierung vorzunehmen. Dies kann sich auf einen einzelnen Zeitpunkt oder auch auf eine Zeitspanne beziehen, für die bestimmte Vorgaben als Randbedingungen gemacht werden. Ziel der Simulation ist dann, einen Fahrplan zu erstellen, um die Anlage möglichst optimal zu nutzen. Bei dieser Möglichkeit ist wie bei Möglichkeit 1 eine Vorausberechnung des Verhaltens der Anlage erforderlich. Aus softwaretechnischer Sicht stellt also die Möglichkeit 3 keine neue Aufgabe dar. Voraussetzung für die **Optimierung der Fahrweise** ist es aber, wie bei Möglichkeit 2 das Modell möglichst nahe an die Realität anzupassen.

Hilfreich zur Optimierung der Fahrweise für eine Zeitspanne ist die Möglichkeit, zeitabhängige Eingaben zu verarbeiten und darzustellen.

## 2. Das Programm

Das Programm **EBSILON®Professional**, für dessen Entwicklung ich seit 1999 verantwortlich bin, ist für all die oben beschriebenen Aufgaben geeignet, da fast alle Komponenten Vorwärts- und Rückwärtsrechnungen unterstützen.

Das Programm ist seit 1991 auf dem Markt, entstanden aus einem von Professor Janicka (TU Darmstadt) entwickelten hocheffektivem und konvergenzstabilen Rechenkern, der jedoch nur über Ein- und Ausgabedateien bedient werden konnte, und einer professionellen graphischen Benutzeroberfläche. Mittlerweile wird es weltweit von 350 Kunden eingesetzt, darunter alle großen deutschen Energieversorger, viele Anlagenbauer und Komponentenhersteller, aber auch Ingenieurbüros sowie Hochschulen und Forschungsinstitute. Haupteinsatzgebiete sind Kraftwerke aller Art, von konventionellen Kohlekraftwerken, Kernkraftwerken und GUD-Anlagen bis zu Biomasse-Anlagen, ORC (Organic Rankine Cycle)- und Kalina-Kreisläufen, Blockheizkraftwerken, IGCC (integrierte Kohlevergasung mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung) sowie Solarthermie-Anlagen. Daneben wurde das Programm auch schon zur Modellierung von Meerwasser-Entsalzungsanlagen, Gebäudeheizungssystemen, Zement- und Zuckerfabriken und spaßeshalber auch zur Modellierung eines 2l-VW Dieselmotors eingesetzt. Auch in Forschungsprojekten wie der „ETA-Fabrik“ [3] zur kombinierten Effizienzsteigerung von Gebäude und Maschinen kommt das Programm zum Einsatz. In diesem Vortrag soll als Beispiel die Modellierung des Kohleheizkraftwerks mit thermischer Abfallbehandlungsanlage und die Einbeziehung von Spitzenheizwerken der Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt GmbH (GKS) dienen.

Einer der Hauptfaktoren für den Erfolg des Programms ist die Flexibilität (offene Softwarearchitektur). Die Anwender haben die Möglichkeit, auf verschiedenen Ebenen von ihnen selbst programmierte Module in das Programm zu integrieren. So kann ein Hersteller von Dampfturbinen beispielsweise das im Programm hinterlegte Turbinenberechnungs-

programm durch sein eigenes ersetzen, und dadurch das exakte Verhalten seiner Turbine im Zusammenwirken mit dem gesamten Kreislauf modellieren, ohne dass er sein internes Know-how offenlegen muss.

Eigene Module können wahlweise innerhalb des Programms mit dem EbsScript-Modul generiert werden oder als DLL, die mit der eigenen Entwicklungsumgebung des Kunden erstellt wurde. Diese Ersetzung bzw. Ergänzung ist auf folgenden Ebenen möglich:

- Einzelne Vorgabewerte: statt einen einzelnen Zahlenwert (zum Beispiel eine Temperatur) kann man in das Vorgabefeld auch einen komplexen Ausdruck, eine Funktion und in vielen Fällen auch ein komplettes eigenes Programm zur Berechnung dieses Wertes (im Beispiel für diese Temperatur) hinterlegen
- Stoffdaten: wenn einem Anwender die 25 Bibliotheken mit mehr als 200 Substanzen nicht reichen, besteht die Möglichkeit, eigene Stoffe hinzunehmen, entweder durch Vorgabe von Polynomkoeffizienten für Größen wie spezifische Wärme und Dichte, durch Modifikation einer REFPROP .fld-Datei oder durch eine komplett selbsterstellte DLL
- KernelScripting bzw. Programmable-DLL: das komplette Verhalten eines Bauteils (d.h. die Gleichungen, die das Bauteil generiert) wird durch ein eigenes Programm bestimmt
- Makro-Scripte: Für Gruppen von Komponenten, die zu Makros zusammengefasst werden, lassen sich zusätzliche Berechnungen vor (Präprozessor) und nach (Postpräzessor) der Simulation integrieren
- Selbsterstellte Oberflächenelemente, beispielsweise eigene Eingabemasken (Anmerkung: um eigene Grafiken für Komponenten zu hinterlegen, ist kein Programmieraufwand erforderlich, hierfür kann man einfach das vorhandene Bild durch eine eigene Grafikdatei ersetzen)
- Datenaustausch

Darüber hinaus bietet das Programm zahlreiche Schnittstellen, beispielsweise zu Excel. Insbesondere steht ein **Excel-Addin** zur Verfügung, mit dem man komplette Berechnungsgänge von Excel aus steuern kann, wobei das Programm lediglich im Hintergrund läuft. Hierfür ist lediglich eine Runtime-Version erforderlich. Dadurch kann man dem Kunden die Möglichkeit geben, Berechnungen selbst durchführen zu können mit Hilfe eines Excel-Sheets, das eine Verknüpfung zu einem Modell aufweist, welches man zuvor mit der Vollversion erstellt hat. Mit der Runtime-Version kann der Kunde das Modell selbst nicht öffnen und insbesondere auch keine topologischen Änderungen vornehmen.

Alternativ besteht auch die Möglichkeit, das Programm von außen (durch andere Programme) zu bedienen (EbsOpen-Schnittstelle).

Schnittstellen gibt es auch zu anderen Programmen der STEAG, die weitere Diagnosemöglichkeiten bieten wie beispielsweise eine Lebensdauerüberwachung für Rohrleitungssysteme und für dickwandige Bauteile oder eine statistische Prozesskontrolle.

### 3. Die Anlage

GKS [1] wurde gegründet, um die ortsansässigen Gesellschafter mit Heizwärme zu versorgen. Der Bau eines Kohleheizkraftwerkes, in dem umweltfreundliche Fernwärme mittels Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) bereitgestellt werden sollte, wurde 1990 realisiert. In das Heizkraftwerk wurde eine thermische Abfallbehandlungsanlage integriert. Seit 1994 werden die in der Region Main-Rhön anfallenden Restabfälle (Hausmüll) hier entsorgt.

Die Anlagen befinden sich im Wesentlichen auf einem Grundstück und sind im Verbund zu betrachten.

Es sind folgende Anlagen vorhanden:

#### **Hauptanlagen:**

##### Kohleheizkraftwerk

- 2 Steinkohle-Dampfkessel zur Erzeugung von Hochdruck-Dampf mit einer Brennstoffwärmeleistung (BWL) von je 63 MW entsprechend je 70 t Dampf pro Stunde bei 113 bar und 535 °C (für Strom und Fernwärme). Der Jahresbedarf an Steinkohle von rund 40.000 t/a wird per Schiff und Bahn angeliefert.

##### Müllverbrennungsanlage:

- 3 Kesselanlagen (je 25 t Dampf pro Stunde bei 65 bar und 435 °C) mit einer BWL von je 20,8 MW und einem Jahres-Mülldurchsatz von rund 175.000 t/a, die ausschließlich per LKW angeliefert werden.

#### **Nebenanlagen:**

##### Spitzenheizwerk (SHW) Nord

- 2 Flammrohr-Dampfkesselanlagen, bivalent für Erdgas oder Heizöl EL (BWL: 21,2 MW und 49,5 MW) für insgesamt bis zu 100 t Dampf pro Stunde mit 190 °C und 5 bar (nur für Fernwärme).

##### Dieselmotoren:

- 2 Verbrennungsmotorenanlagen (BWL je 11 MW) (nur zur Stromerzeugung), die vorwiegend als Notstromdiesel dienen.

##### Dampfturbinen:

- 1 Gegendruck-Dampfturbine mit einer elektrischen Leistung von 12 MW und
- 1 Entnahmekondensations-Dampfturbine mit einer elektrischen Leistung von 17 MW

Fernwärmenetz mit Dampfeinspeisung von rund 5 bar und 190 °C:

- Gegendruck aus Gegendruck-Dampfturbine
- Entnahme aus Entnahmekondensations-Dampfturbine
- Umleitstation

SHW Nord

- Übergabestationen an Kunden bzw. Weiterverteiler

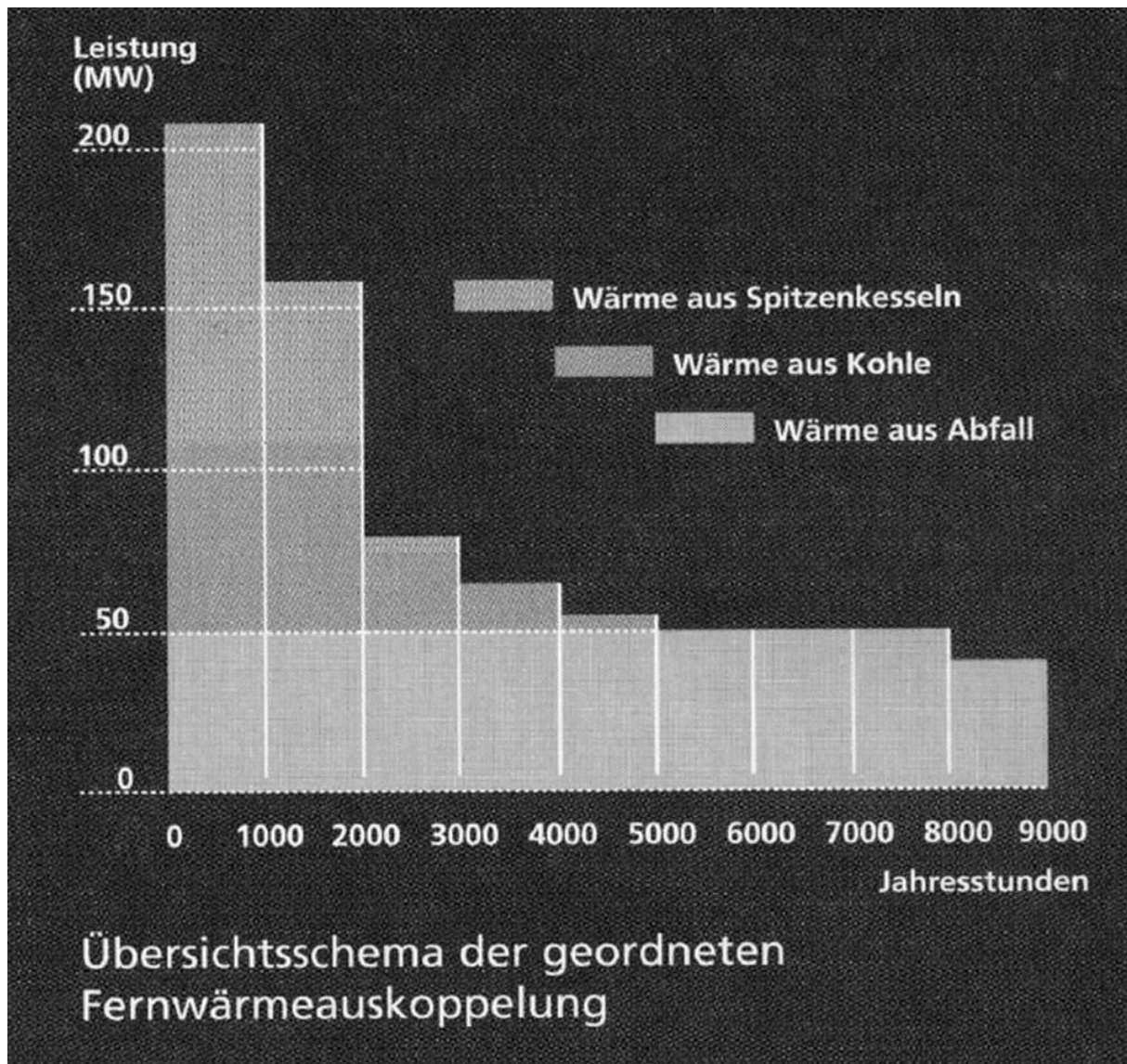
Der in den 3 Müll-Verbrennungsanlagen erzeugte Hochdruck-Dampf strömt zum MD-Teil der Entnahme-Kondensations-Turbine TG1 und zum „Endteil“ der Gegendruck-Turbine TG2 sowie zu den DT-angetriebenen Speisewasserpumpen der Müll- Verbrennungsanlagen.

Der in den 2 Steinkohle-Kesseln erzeugte Hochdruck-Dampf strömt zum HD-Teil der Entnahme-Kondensations-Turbine TG1 und der Gegendruck-Turbine TG2.

Die Fernwärme wird mittels Dampf aus der 5,5 bar-Entnahme an der Turbine TG1 und aus Gegendruckdampf der Turbine TG2 erzeugt. Nicht für die Fernwärme benötigter Dampf wird im Kondensationsteil Teil der Turbine TG1 verstromt.

Das Spitzenheizwerk-Nord versorgt den Kunden FAG und kann sowohl Dampf vom GKS beziehen als auch Dampf ins Fernwärmenetz speisen.

Das folgende Diagramm zeigt den typischen Verlauf des Fernwärmebedarfs eines Jahres und die Inanspruchnahme der einzelnen Anlagen [2].



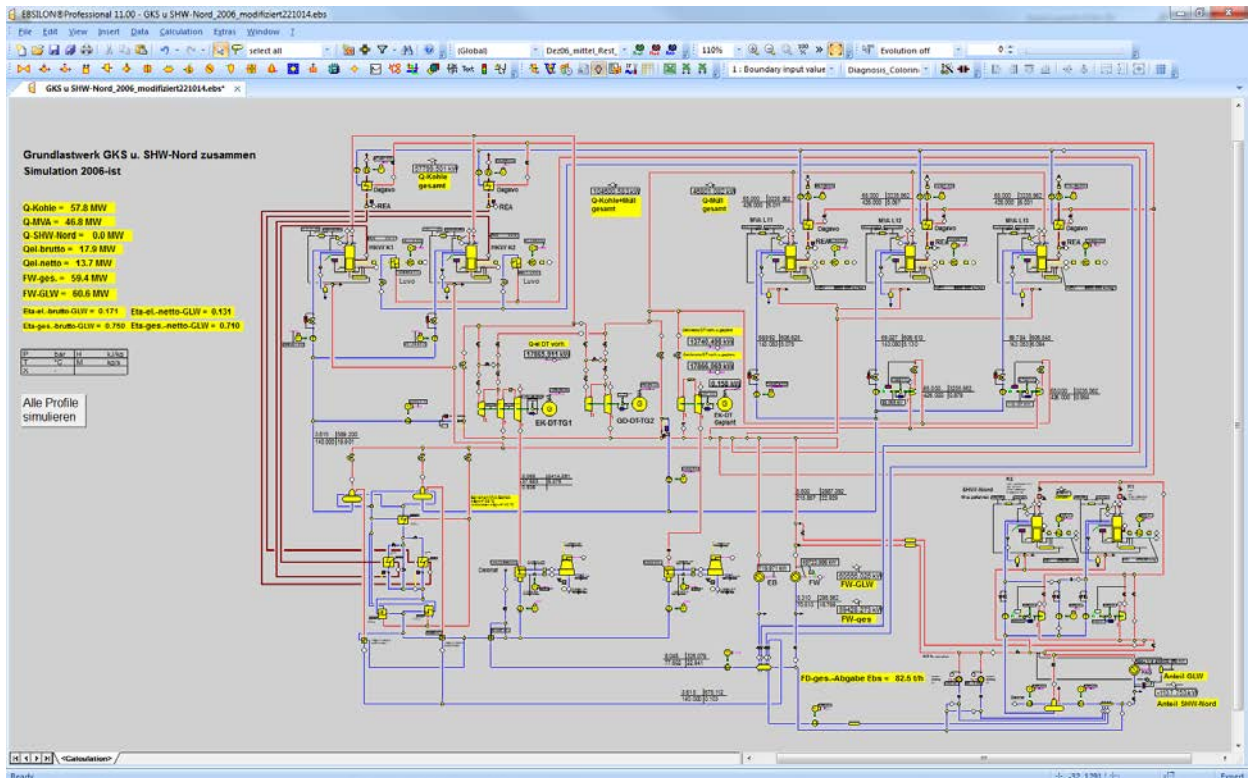
Durch die Verbrennung von Restmüll wird Kohle eingespart. Ohne die Wärmenutzung in der Müllverbrennungsanlage müssten pro Jahr rund 50000 t Kohle mehr verfeuert werden. Die Emissionen, die dabei entstehen würden, liegen deutlich oberhalb des Emissionsniveaus der Abfallbehandlungsanlage.

#### 4. Das Modell

Im Jahr 2007 wurde von Herrn Jannasch ein Simulationsmodell der Anlage erstellt.

Im Modell sind die Daten des Jahres 2006 abgebildet. Das Modell ist so konzipiert, dass die in den Kesseln erzeugten Dampfmengen vorgegeben werden. Daraus werden die erzeugten Strom- und Fernwärmemengen berechnet. Die geplante neue Entnahme-Kondensationsturbine ist im Modell nicht durchströmt und wurde auch nicht realisiert.

Die folgende Abbildung zeigt dieses Modell:



Das Modell besteht aus 561 Komponenten und 587 Leitungen. Es dient in erster Linie zur Abbildung des Wasser-/Dampfkreislaufs. Zur Ermittlung des Wirkungsgrades musste allerdings die Verbrennungsrechnung mit abgebildet werden. Der Rauchgasweg musste ebenfalls mit abgebildet werden, da es an drei Stellen einen Wärmeaustausch mit dem Wasser-/Dampfkreislauf gibt:

- vom Abgas der Kohlekessel wird in den Kondensat-Ecos Wärme aus dem Abgas zur Vorwärmung des Kondensats benutzt,
- das Abgas der Kohlekessel wird hinter REA in den Dagavos durch Dampf von der 5,5-bar-Schiene wieder aufgewärmt, um Kondensation im Kamin zu vermeiden.
- das Abgas der Müllverbrennung wird hinter REA in den Dagavos durch Dampf von der 5,5-bar-Schiene wieder aufgewärmt, um Kondensation im Kamin zu vermeiden.

#### 4.1 Modellierung der Brennstoffvorgabe

Zur Vorgabe des Brennstoffs bietet das Programm für die Kohle eine Auswahl aus über 100 gängigen Kohlesorten mit ihrer jeweiligen Zusammensetzung (Elementaranalyse) und dem Heizwert an. Elementaranalyse und Heizwert können aber auch manuell vorgegeben werden. Im Modell wurde die „Fettkohle Ruhr“ gewählt, die aus 80% Kohlenstoff besteht und einen unteren Heizwert von 31448 kJ/kg aufweist.

Für den Müll wurde eine Leitung vom Typ „benutzerdefiniert“ gewählt. Dieser Leitungstyp bietet die Möglichkeit, Koeffizienten für die Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärme vorgeben zu können. In diesem Fall wurde eine konstante spezifische Wärme von  $c_p = 1$  kJ/kgK gewählt. Der untere Heizwert wurde zu 9500 kJ/kg angegeben.

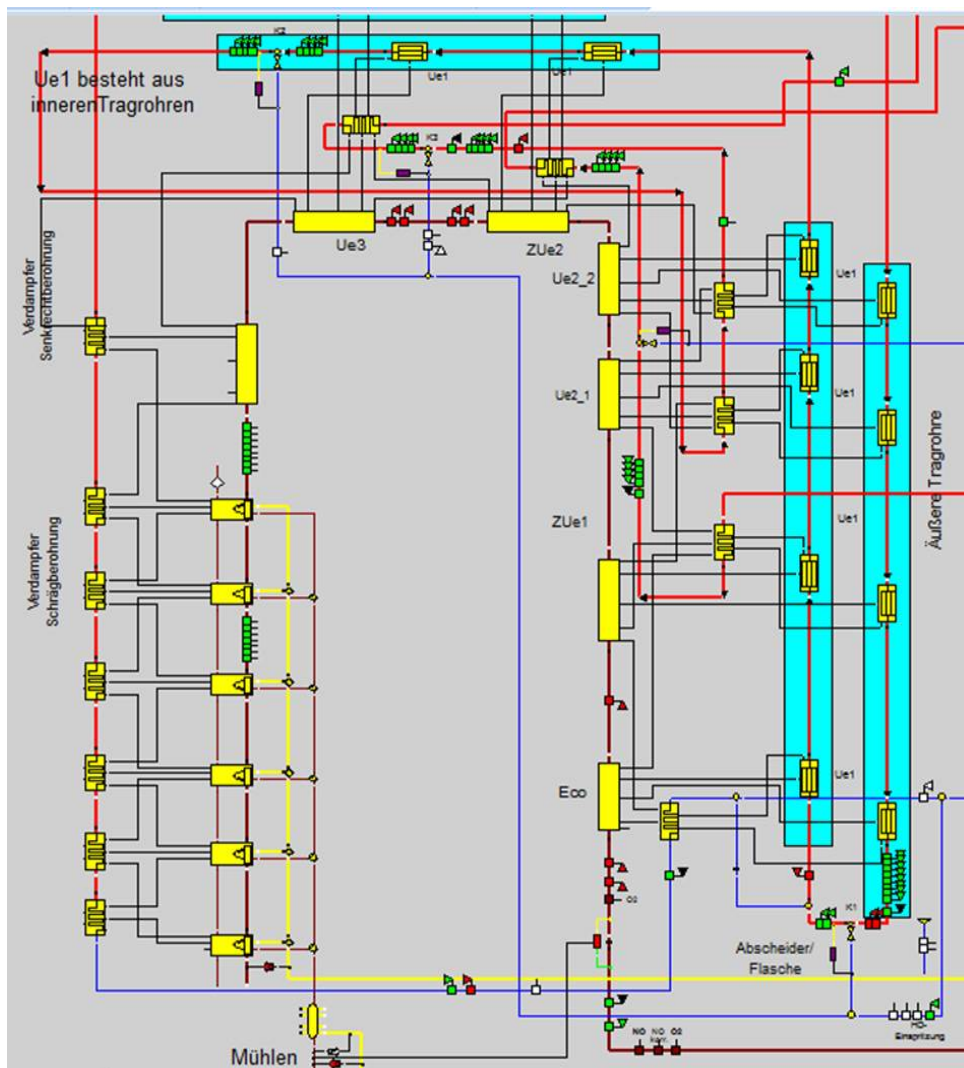
Für das Öl wurde ein unterer Heizwert von 42700 kJ/kg angenommen.

## 4.2 Modellierung der Dampferzeuger

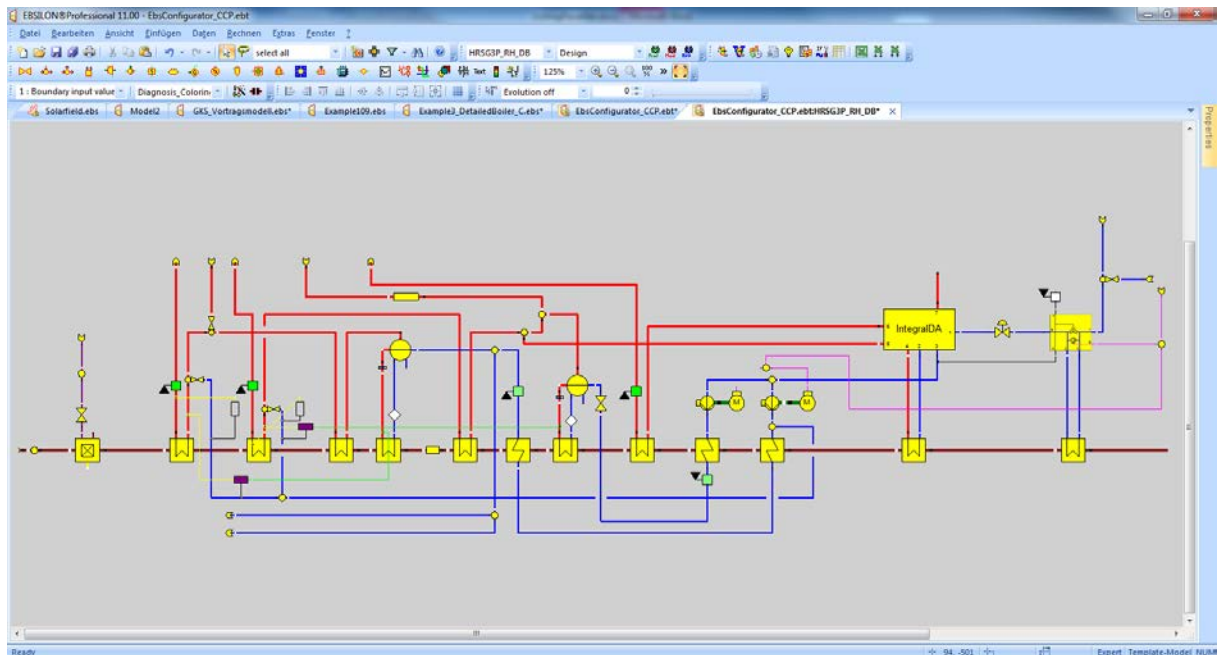
Für die Modellierung der Dampferzeuger bietet das Programm drei verschiedene Detaillierungstiefen:

- 1.) **Geometrische Abbildung** des gesamten Kessels mit allen Haupt- und Neben-Heizflächen (einschließlich Tragrohren): Die Berechnung erfolgt gemäß den Vorschriften im VDI Wärmeatlas [4]. Hierbei wird auch der Strahlungsaustausch innerhalb der Rauchgaszone und zu benachbarten Rauchgaszonen berücksichtigt. Dies kann dadurch erreicht werden, dass bei dieser Modellierung der Rauchgasweg und der Wasser-/Dampf-Weg durch getrennte Bauteile abgebildet werden und die Wechselwirkung zwischen beiden durch logische Leitungen vermittelt wird. Rauchgasseitig gibt es ein Bauteil (90) zur Modellierung der Feuerung (Brennerebene) und ein Bauteil für die Rauchgaszone (88). Wasser-/Dampf-seitig gibt es ein Bauteil Hauptheizfläche (89), bei dem alle Geometrie- und Materialinformationen vollständig angegeben werden müssen, und ein Bauteil Nebenheizfläche (91), bei der eine Datenübernahme von der zugeordneten Hauptheizfläche erfolgt.

Die folgende Abbildung zeigt als Beispiel die detaillierte geometrische Auslegung eines Steinkohlekessels:



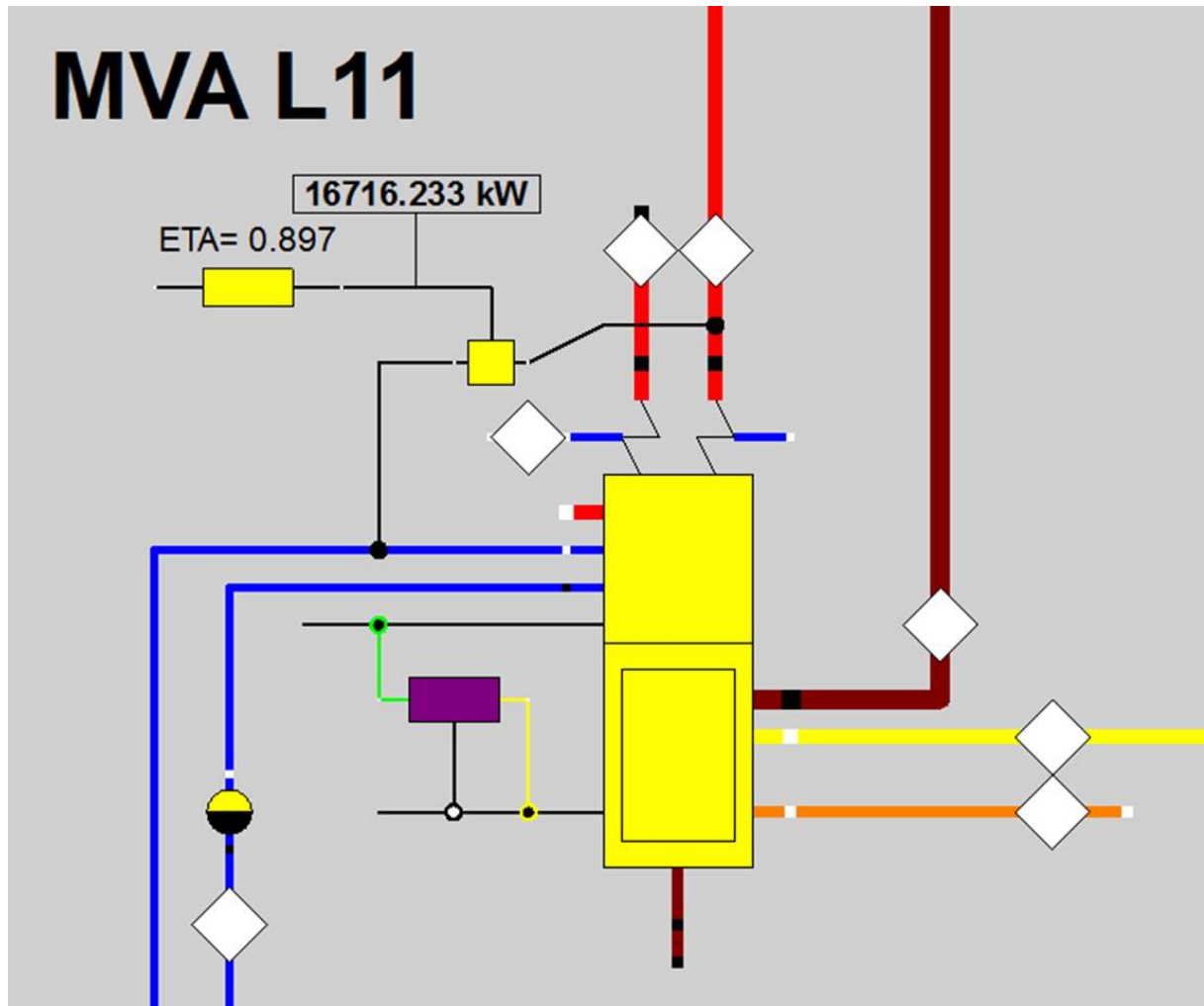
- 2.) Detaillierte **phänomenologische Auslegung** der einzelnen Wärmetauscher: Hierfür werden keine geometrischen Daten benötigt. Die Auslegung erfolgt durch Vorgabe bestimmter Temperaturdifferenzen bzw. Temperaturen. Für den Aufbau eines solchen Modells stehen verschiedene Wärmetauscher-Komponenten zur Verfügung, die sich im Einsatzgebiet und im Teillastverhalten unterscheiden. So gibt es spezielle Bauteile für Hochtemperaturanwendungen, bei denen die Strahlung mit berücksichtigt wird, Bauteile mit integrierter Dampftrommel und Bauteile, die eine Verschiebung der Phasengrenze ermöglichen. Das Teillastverhalten ergibt sich bei manchen Bauteilen durch einfache Kennlinien, andere basieren auf physikalischen Skalierungsgesetzen mit Teillastexponenten. Das folgende Beispiel zeigt eine detaillierte phänomenologische Abbildung eines Abhitzekessels:



- 3.) Einfache **globale Bilanzierung**: der Austrittszustand des Frischdampfs (Druck, Temperatur) und einer eventuell vorhandenen Zwischenüberhitzung wird vorgegeben. Die Bauteilphysik beschränkt sich auf Massen- und Energiebilanzen sowie die Elementarbilanzen bei der Verbrennungsrechnung. Die Modellierung erfolgt hierbei mit einem Bauteil (5) für die Bilanzierung des Wasser-/Dampf-Teils und einem Bauteil (21) für die Bilanzierung der Verbrennung. Beim Bauteil 5 werden im Auslegungsfall die Parameter für den Frischdampf und die Zwischenüberhitzung sowie eventuelle Einspritz- und Abschlamm-Mengen und die Druckverluste auf dem Hochdruck- und dem Mitteldruck-Strang vorgegeben. Das Teillastverhalten wird dann über Kennlinien abgebildet. Beim Bauteil 21 werden das Luftverhältnis und die Austrittstemperaturen für Abgas und Schlacke vorgegeben. Die Zusammensetzung des Abgases ergibt sich aus der Verbrennungsrechnung, auch für die Schadstoffe SO<sub>2</sub> und HCl. Für NO<sub>x</sub> und CO ist allerdings keine Berechnung möglich, deshalb sind hierfür die erzielten Konzentrationen als Vorgabewert zu hinterlegen. Weitere Vorgabewerte und Schalter gibt es für den Verbrennungswirkungsgrad und die Aufteilung von Asche und Unverbranntem. Das Bauteil bietet auch die Möglichkeit einer Direktentschwefelung durch Kalkzugabe. Aus der Energiebilanz ergibt sich die Feuerungswärmeleistung. Die Übereinstimmung der von der Feuerung gelieferten mit

der vom Dampferzeuger benötigten Wärmemenge wird durch einen Regelmechanismus gewährleistet, wodurch die Stabilität der Konvergenz erhöht wird.

Für das hier vorgestellte Simulationsmodell genügt eine globale Bilanzierung gemäß Punkt 3. Das folgende Beispiel zeigt die global-bilanzierende Abbildung eines der Müllkessels der Anlage:



Für alle Feuerungen wurde ein Verbrennungswirkungsgrad von 99% angenommen, wobei das Unverbrannte vollständig ins Abgas und die Asche vollständig in die Schlacke-Leitung geleitet wurde. Das Luftverhältnis beträgt beim Kohlekessel 1.5, beim Müllkessel 1.6 und beim Spitzenheizkessel 1.1. Für die Abgastemperaturen wurden beim Kohlekessel 160°C, beim Müllkessel 180°C und beim Spitzenheizkessel 125°C vorgegeben. Als rauchgasseitiger Druckverlust wurde in den Spitzenheizkesseln 10 mbar und bei den übrigen 15 mbar angenommen. Wasser-/Dampf-seitig beträgt der nominale Druckverlust bei allen Dampferzeugern 5 bar.

#### 4.3 Modellierung der Dampfturbinen

Auch zur Modellierung von Dampfturbinen bietet das Programm verschiedene Komponenten mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad. Für die Studie war die einfache Turbine (Bauteil 6) ausreichend, da diese sich leicht an vorhandene Planungs- oder Messdaten anpassen lässt.

Für die Kraftwerksplanung empfiehlt sich dagegen Bauteil 122, das nach der Methode von Spencer, Cotton, Cannon rechnen kann, wo man mit wenigen Vorgaben recht realistische Ergebnisse erzielt.

Für die Stromerzeugung wurden folgende drei Turbinen modelliert:

- Die EK-DT-TG1 besteht aus drei Stufen mit Auslegungsdrücken von 110, 60 und 5.4 bar (jeweils am Eintritt) und isentropen Wirkungsgraden von 83,8, 82,7 und 79,2 %.
- Die GD-DT2 besteht aus zwei Stufen mit Auslegungsdrücken von 110 und 60 bar und isentropen Wirkungsgraden von 83,8 und 82,7 %.
- Die EK-DT neu besteht aus zwei Stufen mit Auslegungsdrücken von 60 und 5,4 bar und isentropen Wirkungsgraden von 85 und 80 %. Diese Dampfturbine wurde allerdings nicht realisiert. Im Modell wurde deshalb ein Dampfmassenstrom von 0 t/h angenommen.

Diese Turbinen können sowohl von den Kohle- als auch von den Müllkesseln versorgt werden.

Zusätzlich befinden sich im Modell noch vier weitere Turbinen, die zum Antrieb der Speisewasserpumpen verwendet werden, zwei davon für die Müllkessel und zwei für die Spitzenheizkessel. Die Speisewasserpumpen für die Kohlekessel werden elektrisch angetrieben.

#### 4.4 Modellierung der Fernwärme und des kalten Endes

Die **Fernwärme-Auskopplung** wurde in der Schaltung durch einen einfachen „Verbraucher“ (Bauteil 35) abgebildet. Hierbei wurden die Rücklauftemperatur (73.36 °C) und der Druckverlust im Bauteil (1 bar) vorgegeben. Die Wärmemenge (110 MW) wird mit Hilfe eines Reglers eingestellt, der den Dampfstrom durch den Verbraucher so einstellt, dass sich die gewünschte Wärmemenge ergibt. Als weitere Verbraucher wurden FAG, Eigenbedarf und Warmhaltung modelliert.

Zur Kondensation des Niederdruck-Dampfes gibt es zwei Kondensatoren mit Auslegungsdrücken von 108 bzw. 70 mbar. Das Programm bietet die Möglichkeit, die Berechnung des Kondensators geometrisch (d.h. aufgrund Fläche, Durchmesser, Zahl und Material der Rohre) oder phänomenologisch (d.h. Vorgabe von Temperaturdifferenzen oder Kühlwassermassenstrom im Auslegungsfall, Teillastverhalten durch Kennlinien definiert) durchzuführen. Im vorliegenden Modell wurde eine phänomenologische Berechnung gewählt. Die Auslegung erfolgt mit einer Grädigkeit von 9 bzw. 4,5 K.

Jedem Kondensator ist ein Ventilator-Kühlturm zugeordnet. Auch hier bietet das Programm unterschiedliche Komponenten an. In diesem Fall wurde mit einem kennlinienbasierten Kühlturm (Bauteil 79) gearbeitet. Als Alternative bietet Bauteil 112 eine Berechnung nach dem Merkel-Mechanismus, der auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten beruht.

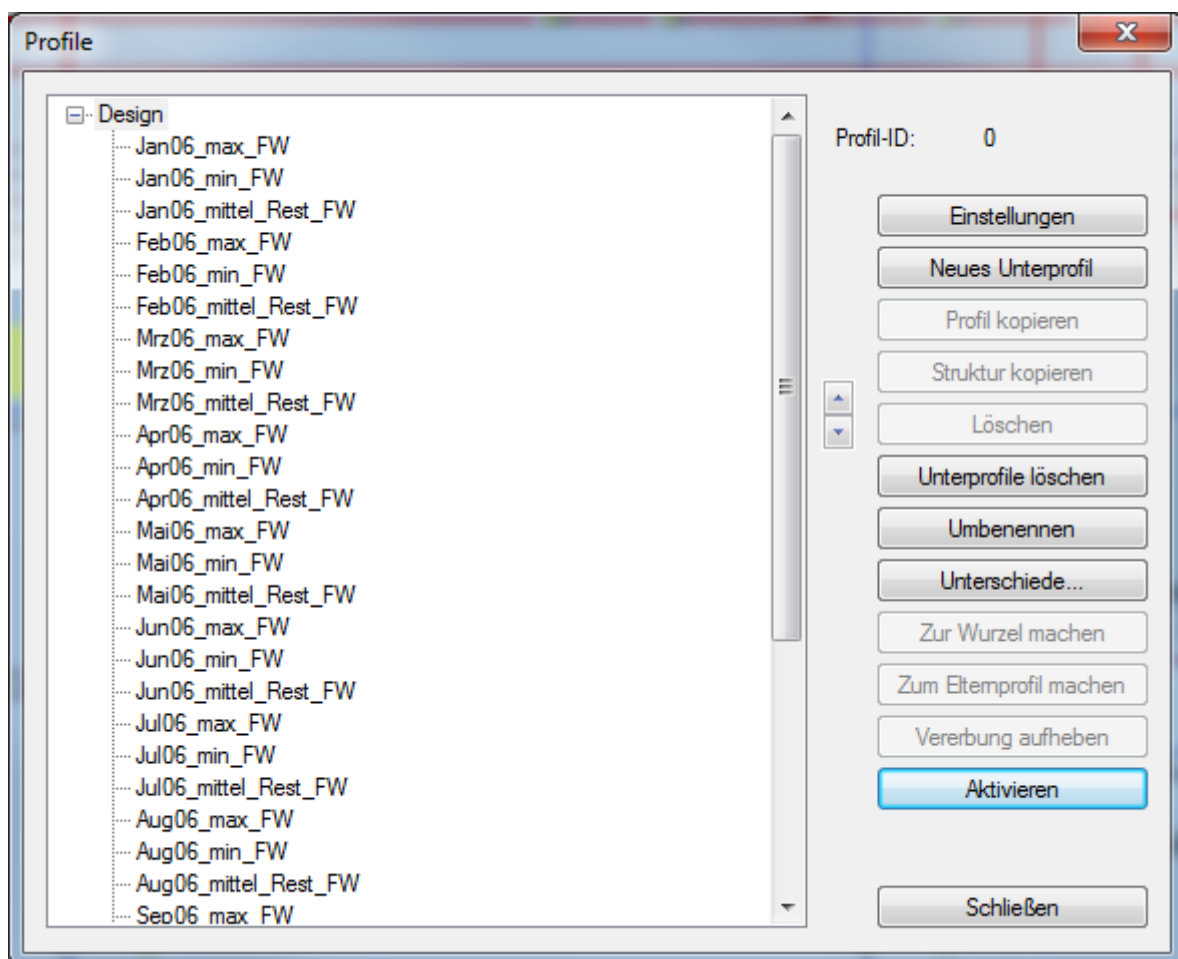
## 5. Die Berechnung

Nach der Erstellung des Modells wird zunächst eine **Auslegungsrechnung** durchgeführt. Dabei ermittelt das Programm für alle Komponenten die Referenzwerte, auf die in den Teillastrechnungen Bezug genommen wird. Diese können automatisch in den Komponenten gespeichert werden.

Das Programm bietet die Möglichkeit, für **Teillastrechnungen** separate Unterprofile anzulegen. Diese sind topologisch (d.h. in Bezug auf die Komponenten und Leitungen und ihre Anordnung) mit dem Hauptprofil identisch, können sich aber in Bezug auf die Daten unterscheiden. Die Profile werden in einer Baumstruktur angelegt, wobei jedes Profil die Daten vom jeweiligen Elternprofil erbt, sofern man nicht im Profil selbst Daten ändert. Diese Änderungen wirken sich dann auch auf die jeweiligen Kind-Profile aus.

Ziel des Simulationsmodells war die Untersuchung des Verhaltens der Anlage im Jahresgang. Zu diesem Zweck wurden für jeden Monat jeweils drei Profile angelegt:

- ein Profil mit maximaler Fernwärmeauskopplung
- ein Profil mit minimaler Fernwärmeauskopplung
- ein Profil mit dem Mittelwert der verbleibenden Fernwärmeauskopplung



Als Datenbasis für die Studie dienten Stundenmittelwerte für das Jahr 2006, die in Form von Excel-Dateien vorlagen.

Das Programm bietet zahlreiche Möglichkeiten, um einen Datenaustausch mit Excel zu ermöglichen:

- Kopieren über die Zwischenablage in beide Richtungen aus allen tabellenartigen Strukturen, die im Programm verwendet werden. Insbesondere gibt es eine Wertetabelle für alle Vorgabe- und Ergebniswerte, die nach verschiedenen Kriterien ausgewählt werden können und auch für den hier benötigten Zweck genutzt werden könnte.
- Standard-Excelschnittstelle mit festem Layout, wobei hier der Datenaustausch stets alle Vorgabe- und Ergebniswerte für die ausgewählten Komponenten umfasst.
- Benutzerdefinierte Excelschnittstelle, bei der die Zuordnung über Namen erfolgt, die für bestimmte Zeilen und Spalten der Excel-Datei vergeben werden.
- Excel-Addin: wenn dieses Addin in Excel installiert ist, ermöglicht dies die vollständige Steuerung aller Berechnungen von Excel aus.

ModelFile	BeginData	Name	Description	Unit	FirstProfile	LastProfile	@ProfileName	@Errors	@Warnings	@Status	@ExecutionTime	spec	result	result
C:\Programme\Epsilon\900\Data\Examples\BLOCK750.ebs												DSP_MEASM	GEN_LEISTG_RE	Efficiency_meter.ETA
												Measured or start	Calculated value	Efficiency
												kg/s	kW	-
					Design	Load100		0	0	Success	17:51:55	600	826685.7601	0.489547969
					Load100	Load90		0	7	Success	17:51:56	600	825772.3583	0.489098124
					Load90	Load40		0	0	Success	17:51:56	540	737326.5661	0.484952569
					Load40	Load10		0	0	Success	17:51:56	240	287509.1286	0.432602168
					Load10			0	41	Success	17:51:56	60	67121.4849	0.414099881

Für die Studie wurde die benutzerdefinierte Excel-Schnittstelle zum Datenaustausch verwendet:

		Jan06_max_FW	Jan06_min_FW	Jan06_mittel_FW	Feb06_max_FW	Feb06_min_FW
5 Profil						
6 Beschreibung						
8 Dauer	h/a	1 h/a	1 h/a	742 h/a	1 h/a	1 h/a
10 Brennstoff						
11 Kohle-Kessel1	kW	50 850	51 MWWhU	26 381	26 MWWhU	40 070
12 Aufschlag für An- u. Abfahren		0.5%	0 MWWhU	0.5%	0 MWWhU	0.5%
13 Kohle-Kessel2	kW	48 894	49 MWWhU	25 513	26 MWWhU	38 968
14 Aufschlag für An- u. Abfahren		0.5%	0 MWWhU	0.5%	0 MWWhU	0.5%
15 Kohle gesamt	kW	99 724	100 MWWhU	51 894	52 MWWhU	79 058
16						
17 MVA-Kessel-L11	kW	18 731	19 MWWhU	18 821	19 MWWhU	16 947
18 Aufschlag für An- u. Abfahren		0.5%	0 MWWhU	0.5%	0 MWWhU	0.5%
19 MVA-Kessel-L12	kW	17 764	18 MWWhU	18 588	19 MWWhU	18 344
20 Aufschlag für An- u. Abfahren		0.5%	0 MWWhU	0.5%	0 MWWhU	0.5%
21 MVA-Kessel-L13	kW	17 652	18 MWWhU	18 416	19 MWWhU	18 206
22 Aufschlag für An- u. Abfahren		0.5%	0 MWWhU	0.5%	0 MWWhU	0.5%
23 Multi gesamt	kW	54 158	54 MWWhU	55 824	56 MWWhU	53 498
24						
25 SHW-Nord-Kessel1	kW	4 915	5 MWWhU	0	0 MWWhU	1 339
26 Aufschlag für An- u. Abfahren		0.5%	0 MWWhU	0.5%	0 MWWhU	0.5%
27 SHW-Nord-Kessel3	kW	16 038	16 MWWhU	0	0 MWWhU	2 313
28 Aufschlag für An- u. Abfahren		0.5%	0 MWWhU	0.5%	0 MWWhU	0.5%
29 SHW-Nord gesamt	kW	20 953	21 MWWhU	0	0 MWWhU	3 652
30						
31 Brennstoff gesamt	kW	174 845	176 MWWhU	107 718	108 MWWhU	136 208
32						
33 Strom						
34 Brutto-Erzeugung						
35 E-K-DTG1	kW	12 423.4	12 MWWhel	11 670.9	12 MWWhel	12 338.9
36 G-DT2	kW	11 246.6	11 MWWhel	8 403.3	8 MWWhel	10 508.7
37 E-K-DT-geplant	kW	0.2	0 MWWhel	0.2	0 MWWhel	0.2
38 Brutto-Erzeugung Epsilon gesamt	kW	12 423.6	24 MWWhel	11 671.0	20 MWWhel	12 337.1
39						
40 E-K-DTG1	kW					9 011 MWWhel
41 G-DT2	kW					7 463 MWWhel
42 E-K-DT-geplant	kW					0 MWWhel
43 Brutto-Erzeugung Messung gesamt	kW					16 474 MWWhel
44						
45 Netto-Erzeugung frei Trafos	kW	0.0	0 MWWhel	0.0	0 MWWhel	0.0
46 Trafoverluste	kW	12 423.6	24 MWWhel	11 671.0	20 MWWhel	12 337.1
47 Netto-Erzeugung DT frei Trafos gesamt	kW					16 952 MWWhel
48						
49 el Eigenbedarf						
50 Grundlastwerk	kW	5 252.3	5 MWWhel	4 203.2	4 MWWhel	4 669.8
51 SHW-Nord	kW	210.5	0 MWWhel	0	0 MWWhel	40.1
52 Eigenbedarf gesamt	kW	5 462.9	5 MWWhel	4 203.2	4 MWWhel	4 709.9
53 Eigenbedarf spez	WWhel/MWWh					
54						
55 Nettostrom-Erzeugung frei GWK	kW	6 960.7	18 MWWhel	7 467.9	16 MWWhel	7 627.2
56						
57 Fernwärme-Abgabe						
58 EB-Heizung + BiWW	Wh	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
59 FAG	Wh	29.1	29.1	13.8	13.8	20.1
60 Rest	Wh	143.5	143.5	58.7	58.7	93.3
61 gesamt Epsilon	Wh	173.5	173.5	73.5	73.5	119.3

## 6. Ausblick

Die Studie wurde im Jahr 2007 mit der Version 6.01 des Programms erstellt. In der Zwischenzeit gibt es eine Version 11.01, die viele neue Möglichkeiten bietet.

Besonders interessant für diese Art von Studien ist die Möglichkeit, mit der **Zeitreihe** direkt im Programm eine Jahresgangrechnung durchführen zu können. Dabei wird auch die Bildung von Mittelwerten, Summen und Integralen unterstützt. Entwickelt wurde dieses Feature für Anwendungen in der Solarthermie, es ist aber auch allgemein einsetzbar. In diesem Zusammenhang wurden auch Speicher (direkte und indirekte) implementiert.

Die folgende Abbildung zeigt eine solche Zeitreihe für einen Tagesgang mit automatischem Einfügen von Zwischenzeitschritten bei Erreichen von Grenz-Füllständen von Speichern:

Zeitreihen-Berechnung

Zeitreihe Rechnen Ansicht Bearbeiten Extras

Testday [0] > Abbrechen Wiederholen  Auto-Scroll Profil Offdesign\_2106\_1600  bei Fehler anhalt

	A	B	C	D	E	F	G	H	M	
1										
2	Date/Time	auto-inserted	dep_spec	result	dep_spec	result	dep_spec	dep_spec	result	result
3			HotTank.LEVACT	HotTank.LEVNEW	ColdTank.L...	ColdTank.L...	HotTank.TS...	ColdTank.T...	QField.Q	@calc
4									integral	
5			t	t	t	t	°C	°C	MWh	
6	2009-06-21 00:00:00		15000	12126.1	14315	17188.9	384	292	0	3600
7	2009-06-21 01:00:00		12126.1	9252.2	17188.9	20062.8	384	293	0	3600
8	2009-06-21 02:00:00		9252.2	6378.4	20062.8	22936.6	384	293.6	0	3600
9	2009-06-21 03:00:00		6378.4	3504.5	22936.6	25810.5	384	294.2	0	3600
10	2009-06-21 04:00:00		3504.5	815	25810.5	28500	384	294.6	0	3369.0
11	2009-06-21 04:56:09	x	815	815	28500	28500	384	294.9	0	231
12	2009-06-21 05:00:00		815	815	28500	28500	384	294.9	0	3600
13	2009-06-21 06:00:00		815	1013.5	28500	28301.5	384	294.9	0.879	3600
14	2009-06-21 07:00:00		1013.5	4576.7	28301.5	24738.3	385.7	294.9	2.474	3600
15	2009-06-21 08:00:00		4576.7	8408.6	24738.3	20906.4	378.3	294.9	4.116	3600
16	2009-06-21 09:00:00		8408.6	12268.8	20906.4	17046.2	376.9	294.9	5.764	3600
17	2009-06-21 10:00:00		12268.8	16001.6	17046.2	13313.4	376.3	294.9	7.389	3600
18	2009-06-21 11:00:00		16001.6	19591.6	13313.4	9723.4	376.1	294.9	8.989	3600
19	2009-06-21 12:00:00		19591.6	23107.1	9723.4	6207.9	376.1	294.9	10.574	3600
20	2009-06-21 13:00:00		23107.1	26664	6207.9	2651	376.2	294.9	12.167	3600
21	2009-06-21 14:00:00		26664	28500	2651	815	376.2	294.9	12.972	1792.2
22	2009-06-21 14:29:52	x	28500	28500	815	815	376.1	294.9	13.792	1808
23	2009-06-21 15:00:00		28500	28500	815	815	376.1	294.9	15.437	3600
24	2009-06-21 16:00:00		28500	28500	815	815	376.1	294.9	17.097	3600
25	2009-06-21 17:00:00		28500	28500	815	815	376.1	294.9	18.73	3600
26	2009-06-21 18:00:00		28500	28500	815	815	376.1	294.9	20.101	3600
27	2009-06-21 19:00:00		28500	26579.7	815	2735.3	376.1	294.9	20.451	3600
28	2009-06-21 20:00:00		26579.7	23108.1	2735.3	6206.9	376.1	299.4	20.451	3600
29	2009-06-21 21:00:00		23108.1	19636.5	6206.9	9678.5	376.1	302.4	20.451	3600
30	2009-06-21 22:00:00		19636.5	16164.9	9678.5	13150.1	376.1	303.2	20.451	3600
31	2009-06-21 23:00:00		16164.9	12693.4	13150.1	16621.6	376.1	303.6	20.451	3600
32	2009-06-22 00:00:00		12693.4	12693.4	16621.6	16621.6	376.1	303.8	20.451	12317

Hauptfokus der aktuellen Entwicklung ist eine Erweiterung des Programms um dynamische Komponenten zur Modellierung von instationären Vorgängen (Transienten, An- und Abfahrvorgänge).

## 7. Zusammenfassung

Es wurde dargelegt, welche Anwendungsmöglichkeiten für die Simulation von Prozessen in Abfallheizkraftwerken bestehen. Am Beispiel des Gemeinschaftskraftwerks Schweinfurt wurde gezeigt, wie eine solche Modellierung aussieht und welche Möglichkeiten die eingesetzte Software bietet.

## 8. Quellen

[1] Die Informationen sind der Homepage der GKS entnommen (<http://www.gks-schweinfurt.de>)

[2] Prospekt „GKS Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt“, Stand 9/2002

[3] [www.eta-fabrik.de](http://www.eta-fabrik.de) (Technische Universität Darmstadt)

[4] VDI-Wärmeatlas, 10. Aufl. 2006, Springer-Verlag (Berlin, Heidelberg)