

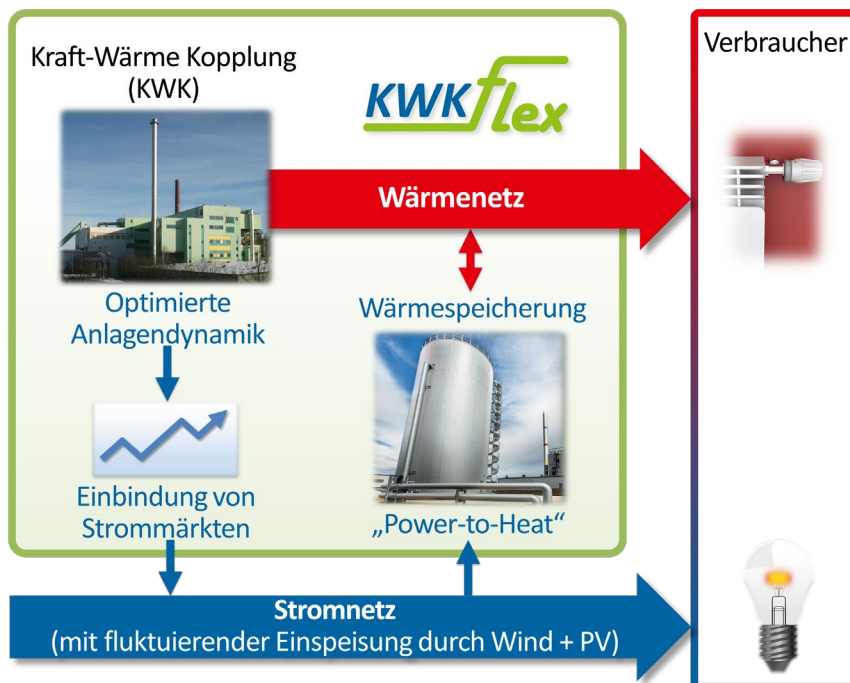


KWK-Flex: Anwenderleitfaden für die Fernwärmebranche

Forschungsvorhaben „Hochflexible stromgeführte Kraft-Wärme-Kopplung
durch thermische Speicher und Power-to-Heat-Technologien“
(2016 - 2020)

Die Integration fluktuierender erneuerbarer Energien erfordert **hochflexible Kraftwerke, Energiespeicher und Power-to-X-Anlagen** zur Netzstabilisierung und bedarfsgerechten Abdeckung der verbleibenden Netzlasten.

Im Projekt *KWK-Flex* untersucht die **Hochschule Kempten** mit den Partnern **Fernwärme Ulm GmbH (FUG)** aus Baden-Württemberg und der **ZAK Energie GmbH (ZAK)** aus Bayern die Entwicklung innovativer Methoden und Anlagenbetriebsstrategien zur flexiblen, stromgeführten Fahrweise von Kraft-Wärme-Kopplungs-(KWK)-Anlagen mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien. Die Analysen wurden unterstützt von der **AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.**



Übergeordnete Ziele der Untersuchungen sind:

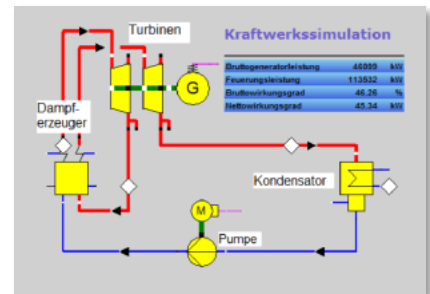
- Die **Steigerung der Energieeffizienz** bei der Bereitstellung, Verteilung und Nutzung von Energie durch die Flexibilisierung und Ressourcenoptimierung von Kraft-Wärme-Kopplungs-(KWK)-Anlagen mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien, und die Unterstützung der verstärkten Einspeisung fluktuierender erneuerbarer Energien.
- Die **Senkung der Treibhausgasemissionen** durch die mit der Systemintegration verbundenen erhöhten Gesamteffizienz der Anlagenverbunde, insbesondere durch Verdrängung fossil gefeuerter Spitzenlastkessel mit Wärmespeichern, Energiespeichern und „Power-to-Heat“-Technologien.
- Die **Reduzierung von Erzeugungskosten** durch erhöhte Wirkungsgrade und numerisch optimierte Anlageneinsatzplanung.

Die Entkopplung von Strom- und Wärmeerzeugung ist ein Schlüssel für Flexibilitäts- und Effizienzsteigerungen in der Fernwärmeversorgung.

Das Projekt *KWK-Flex* kombiniert Forschungsarbeiten zur instationären Prozesssimulation von KWK-Kraftwerken, Wärmespeichern und Power-to-Heat-Anlagen zur Erhöhung der stromseitigen Anlagendynamik mit dem Einsatz numerischer Methoden zur optimierten Anlageneinsatzplanung aller beteiligten Anlagen.

Kernziele der instationären Prozesssimulation

- Modellenentwicklung zur (in)stationären Prozesssimulation von KWK-Kraftwerken, von zur Lastflexibilisierung benötigten thermischen Energiespeichern sowie „Power-to-Heat“-Technologien wie Großwärmepumpen oder Direkterhitzern
- Experimentelle Validierung der Prozesssimulationsmodelle anhand von Betreiberdaten
- Optimierung der Betriebsstrategien für einzelne KWK-Kraftwerkstypen sowie KWK-Verbunde, in Kombination mit thermischen Energiespeichern und „power-to-heat“-Anlagen zur Erhöhung der Anlagenflexibilität



Kernziele der numerischen Anlageneinsatzplanungsoptimierung

- Entwicklung numerischer Optimierungsmethoden zur optimierten Anlageneinsatzplanung von KWK-Verbunden
- Erstellung einer Wärmelastprognose
- Entwicklung von Strategien für eine optimierte, ressourcenschonende Anlageneinsatzplanung für KWK-Anlagen in Kombination mit thermischen Energiespeichern und „power-to-heat“-Anlagen



Eckdaten des untersuchten Fernwärmeverbundnetzes

- 170 km Fernwärmenetz (600 GWh / Jahr)
- Steinkohle-, Öl- und Gaskessel
- 2 Biomasse-Heizkraftwerke
- 1 Müllheizkraftwerk
- 1 Wärmespeicher
- 5 Biogasanlagen
- Einsatz von Power-to-Heat (Großwärmepumpe, Elektrodenheizkessel)



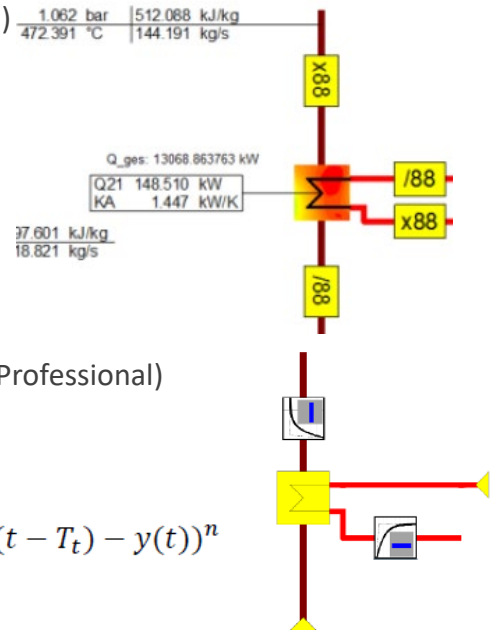
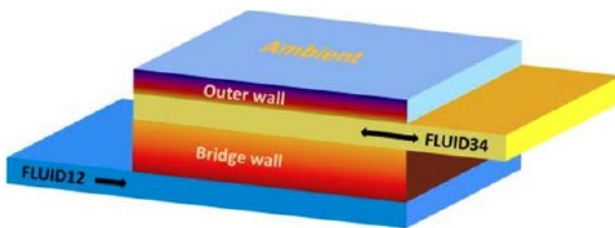
Die Kombination von Prozesssimulation und Anlageneinsatzplanung ermöglicht sowohl technische als auch wirtschaftliche Untersuchungen und Optimierungen.

Stationäre Prozesssimulatoren werden in der Kraftwerksbranche seit vielen Jahren als „digitaler Zwilling“ zur Auslegung, Optimierung und Prozessgüteüberwachung eingesetzt. Seit kurzem ermöglichen höhere Rechnerleistungen und leistungsfähigere Simulationsumgebungen auch instationäre Berechnungen, die zeitabhängiges Verhalten samt (insbesondere thermischer) Trägheiten berücksichtigen. Ihr Einsatz beschränkte sich bislang aufgrund des Aufwands für die Modellerstellung und -parametrierung meist auf größere Kraftwerke.

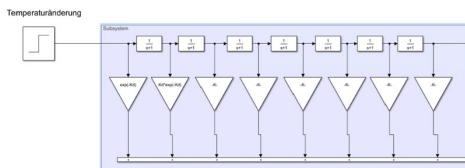
Im Projekt *KWK-Flex* wurden Strategien zur Modellierung des instationären Verhaltens von Kraftwerken bzw. Komponenten untersucht und in Bezug auf Rechengenauigkeit (anhand typischer Laständerungen im SRL-Präqualifikationstest) und -geschwindigkeit verglichen:

- Physikalische Modelle
- Abbildung zeitlicher Verzögerungen über Übertragungsfunktionen („Blockregelung“)
- Modellierung über künstliche neuronale Netze (unten nicht dargestellt)

Instationärer Wärmeübertrager (in EBSILON Professional) (physikalisches Modell)

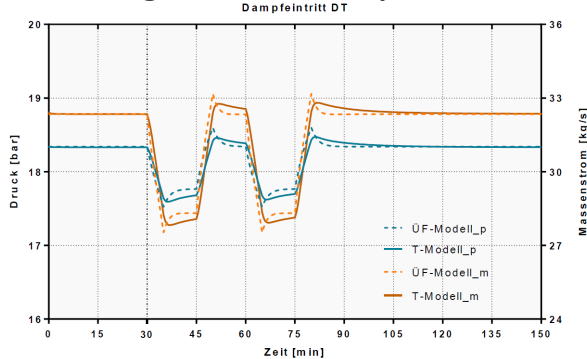


Instationärer Wärmeübertrager (in Matlab und EBSILON Professional) (Übertragungsfunktionsmodell)

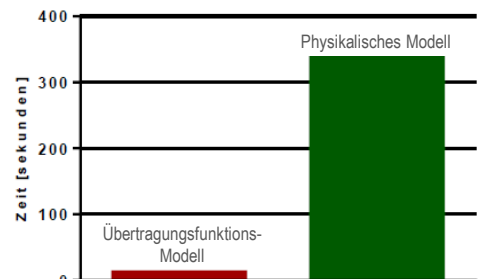


$$\frac{dy(t)}{d(t)} = \frac{1}{\tau} (Ku (t - T_t) - y(t))^n$$

Modellvergleich im SRL-Präqualifikations-Test



Modellvergleich (Rechenzeit)



Die Vorteile physikalischer Modelle (Flexibilität, Nachvollziehbarkeit, Genauigkeit) zur Prozesssimulation wiegen die Rechenzeitvorteile von Übertragungsfunktionen und neuronalen Netzen auf.

Exemplarisch soll die Umsetzung der instationären Prozesssimulation zunächst anhand eines Biomasseheizkraftwerks der Fernwärme Ulm GmbH gezeigt werden.

Die Modellierung und Simulation erfolgte in der Simulationsumgebung EBSILON® Professional.

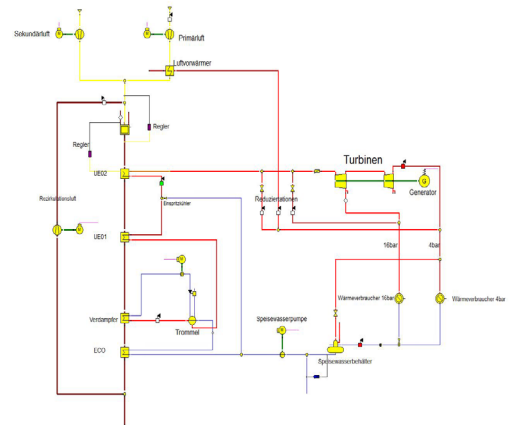


Eckdaten des Biomasseheizkraftwerks 1 der FUG

- Feuerungsleistung: 58 MW
- Elektrische Nennleistung: ca. 9,6 MW
- Brennstoff Altholz

Modellierung des Kraftwerks

In der Simulationsumgebung wurde anhand von Fließ- und Schaltplänen zunächst das Kraftwerk abgebildet. Für die Parametrierung der Komponenten standen umfangreiche Auslegungs- und Betriebsdaten zur Verfügung.



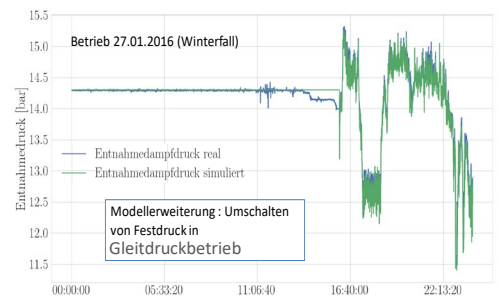
Implementierung der Regelungsstrategie

Wichtige Regelstrategien wurden anschließend in das Kraftwerksmodell implementiert. Nebenstehend ist ein Beispiel einer Umschaltung in den Gleitdruckbetrieb gezeigt.

Validierung des Kraftwerksmodells

Mit dem Kraftwerksmodell wurden reale Lastgänge in Vollast, Teillast und Lastübergängen nachsimuliert. Die berechneten Werte für wichtige Parameter wie z.B. Wirkleistung, Dampfmassestrom und Dampfdruck wurden anschließend mit im Betrieb gemessenen Daten verglichen. Durch Abgleich der Daten konnte das Simulationsmodell validiert werden, so dass ein „digitaler Zwilling“ des Kraftwerks vorliegt.

Modellvalidierungsbeispiele



Durch moderne Simulationsumgebungen ist die Prozesssimulation und -optimierung nicht mehr nur Großkraftwerken vorbehalten, sondern auch für kleineren Anlagen realisierbar.

Wärmespeicher spielen eine Schlüsselrolle bei der Flexibilisierung kommunaler KWK-Anlagen. Als Anwendungsbeispiel wird hier die Modellierung des Wärmespeichers am Standort des Müllheizkraftwerkes der Fernwärme Ulm gezeigt.



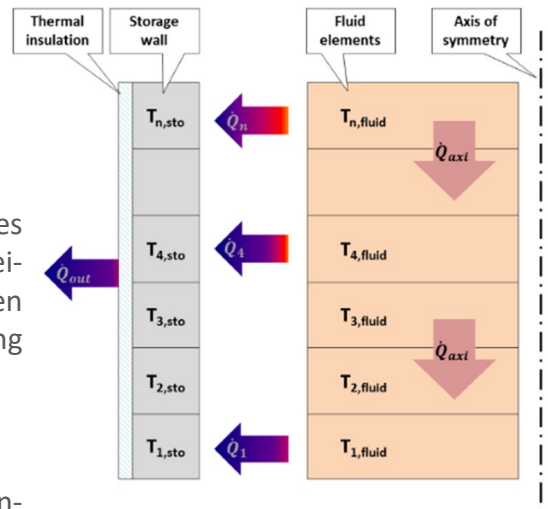
Die Modellierung und Simulation erfolgte in der Simulationsumgebung EBSILON® Professional.

Eckdaten Wärmespeicher der FUG

- Bauart: Heißwasserdruckspeicher, Inhalt: 2427 m³
- Durchmesser 11,50 m x Höhe 29,00 m
- Betriebstemperaturen: 60 - 130 °C, Druck: > 5,8 bar
- Wärmehalt: ca. 140 MWh
- Be- u. Entladeleistung: 15 MW, 20 MW

Modellierung des Wärmespeichers

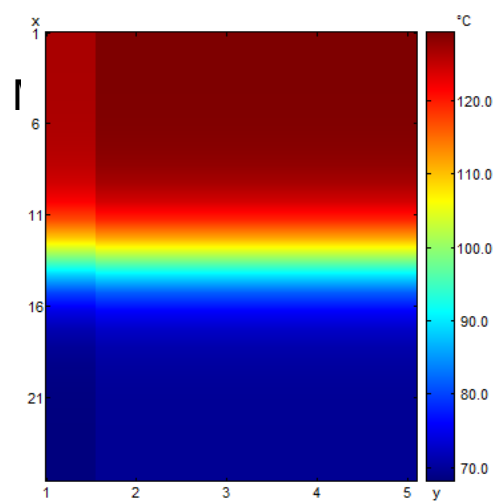
Nebenstehend ist der schematische Aufbau des Wärmespeichermodells mit den Kernbereichen Speicherfluid, Speicherwand und Isolierung sowie den Hauptwärmeströmen gezeigt. In vertikaler Richtung erfolgt eine ortsabhängige Diskretisierung.



Simulationsergebnisse

Das Simulationsmodell ermöglicht eine detaillierte Untersuchung des thermischen Verhaltens des Wärmespeichers. Eine Anwendung der Simulation ist die optimale Auslegung der Wärmespeichergröße im Fall neu zu installierender Wärmespeicher oder der Erweiterung bestehender Anlagen. Dazu können Zeitreihen mit Wärmelastprofilen nachsimuliert werden.

Aus Betreibersicht von besonderem Interesse ist darüber hinaus die Betrachtung des zeitlichen und räumlichen Verhaltens der im Wärmespeicher auftretenden Temperaturschichtung (Thermokline). Sehr häufige oder sehr schnelle Lade- oder Entladeaktivitäten führen zu einer ausgedehnteren Mischzone zwischen dem warmen und kalten Bereich. Dadurch sinkt die nutzbare Wärmespeicherkapazität. Mit dem Simulationsmodell kann dieser Effekt untersucht und geeignete Betriebsstrategien entwickelt werden.

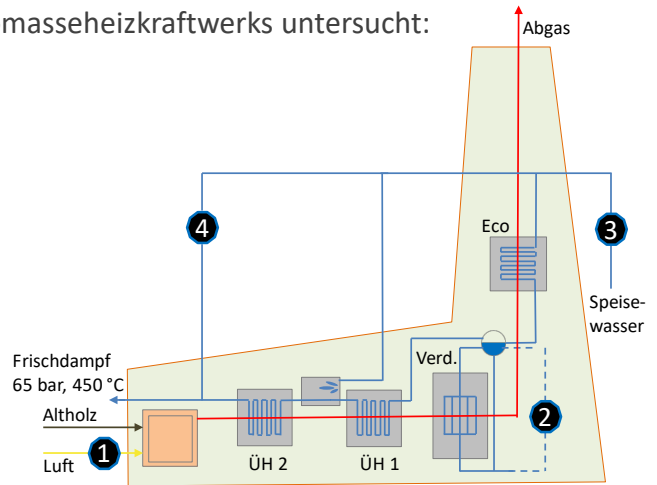


Die Wärmespeicherauslegung und -betrieboptimierung sind wichtige Anwendungsfelder der instationären Prozesssimulation.

Mit Hilfe des Simulationsmodells lassen sich unterschiedliche Optimierungsszenarien durchspielen. Nachfolgend wird die Wärmenutzung von Überschussstrom in Form von „Power-to-Heat“ in vier verschiedenen Bereichen eines Biomasseheizkraftwerks untersucht:

1. zur Vorwärmung der Primärluft
2. zur Dampferzeugung parallel zum bestehenden Verdampfer
3. zur Speisewasservorwärmung
4. zur Dampferzeugung parallel zum bestehenden Abhitzedampfkessel

Das Simulationsmodell ermöglicht unter Berücksichtigung praktischer Limitierungen, die maximal über „Power-to-Heat“ einspeisbare thermische Leistung zu quantifizieren. Die Ergebnisse sind nachfolgend gezeigt.



	Einsatzort für „Power-to-Heat“	max. therm. Leistung	Limitierung
1	Elektrische Vorwärmung der Primärluft	850 kW	maximal zulässige Temperatur der Primärluft
2	Elektrischer Dampferzeuger parallel zum Verdampfer	7.500 kW	minimale Last im Verdampfer
3	Speisewasservorwärmung	5.000 kW	maximale Temperatur am Einlass des Speisewasservorwärmers (Economiser)
4	Elektrischer Dampferzeuger parallel zum Abhitzedampfkessel	11.000 kW	minimale Last im Abhitzedampfkessel

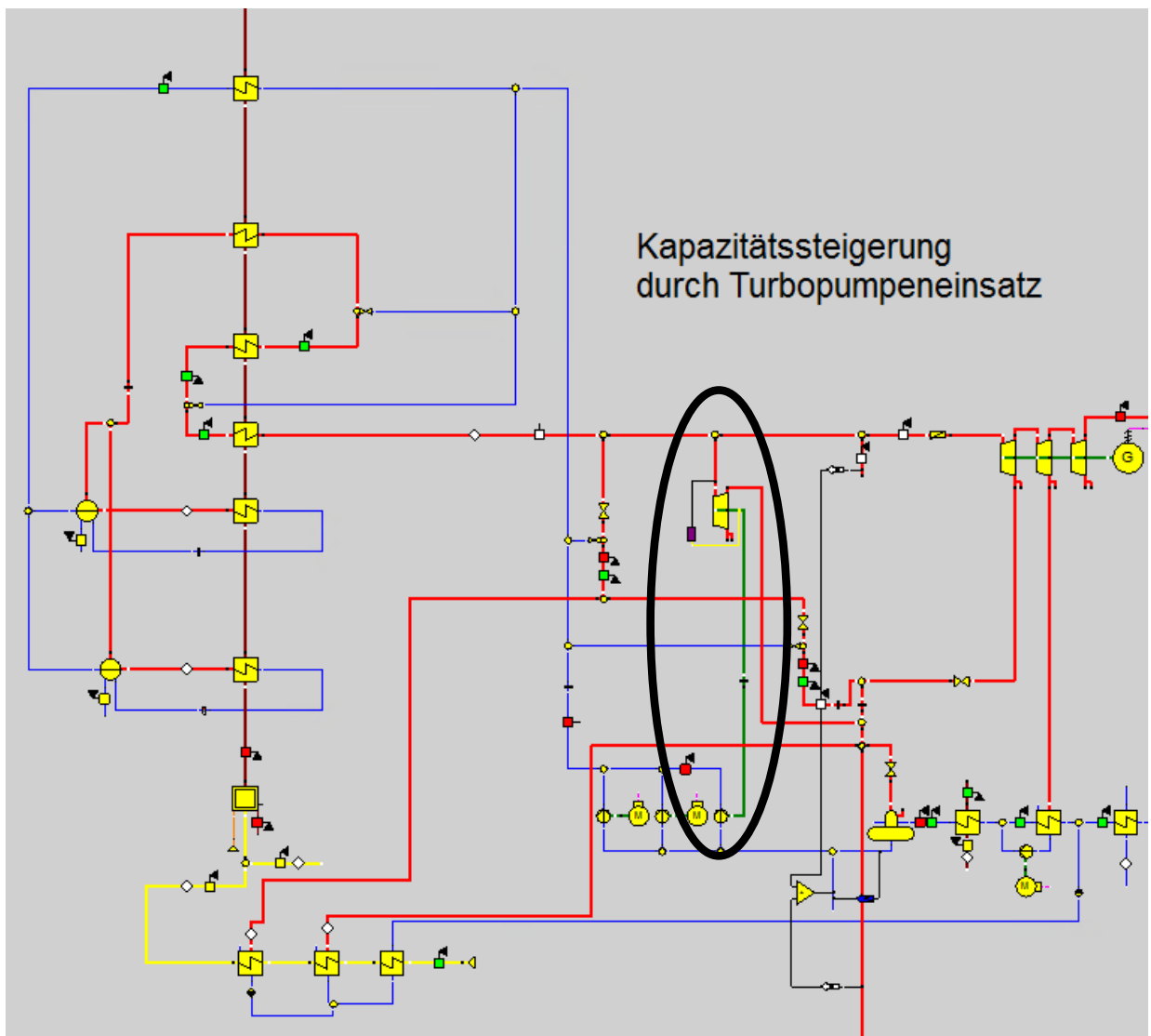
Leistungssteigerungen, Brennstoffeinsparungen und das Verhältnis beider Größen zueinander („Effizienz P2H“) sind nachfolgend aufgeführt.

P2H-Option	Leistung P2H [MW]	Brennstoffeinsparung [MW]	Effizienz P2H
1	0,9	0,1	12%
2	7,5	9,8	131%
3	5	2,8	55%
4	11	17,1	155%
1,2	8,4	9,9	118%
1,3	5,9	2,8	48%
2,3	12,5	14,1	113%
1,2,3	13,4	17,7	132%
1,3,4	16,9	23,5	140%

Die Prozesssimulation berücksichtigt die komplexen Wechselwirkungen im Wasser-Dampf-Kreislauf und ermöglicht so quantitative Aussagen zur Einbindung von „Power-to-Heat“.

Mit den Modellen können Einzelmaßnahmen zur Prozessoptimierung untersucht werden, z.B. wie zusätzliche Kapazitäts- oder Flexibilitätssteigerungen trotz bestehender Limitierungen in einzelnen Anlagenkomponenten ermöglicht werden können.

In einem Anwendungsfall wurde die Möglichkeit untersucht, die Dampf-erzeugung in einem Müllheizkraftwerk und damit die Müllverbrennungskapazität weiter zu steigern, obwohl die Aufnahmekapazität der Dampfturbine bereits ausgereizt war. Dafür wurde in der Prozesssimulation der Ersatz einer elektrisch angetriebenen Speisewasser-pumpe durch eine dampfbetriebene Turbopumpe untersucht.



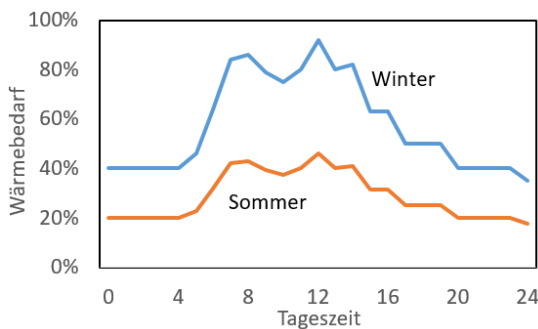
Komponenten- oder Anlagenmodifikationen zur Optimierung einzelner Anlagenteile oder des Gesamtkraftwerks oder Verbundsystems können effizient analysiert werden.

Für einen effizienten Anlageneinsatz spielt die möglichst genaue Kenntnis der zu erwartenden Fernwärmelast eine zentrale Rolle. Für die Fernwärmelastprognose kommen in der Praxis meist nur sehr einfache Verfahren auf Basis von Typtagen zum Einsatz.

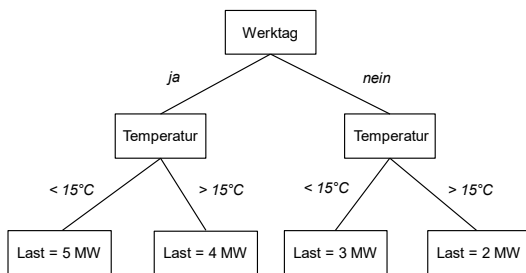
Im Projekt *KWK-Flex* wurde das Potential untersucht, mit maschinellen Lernverfahren die Prognosegüte für die Fernwärmelast deutlich zu erhöhen. Konkret verglichen wurden:

- Typtag/-stundenverfahren (als gängige Praxis)
- Entscheidungsbäume
- Künstliche neuronale Netze
- Deep Learning Verfahren aus der Spracherkennung
- Kombination mehrerer Verfahren („DeepDHC“)

1. Typtag/-stundenverfahren

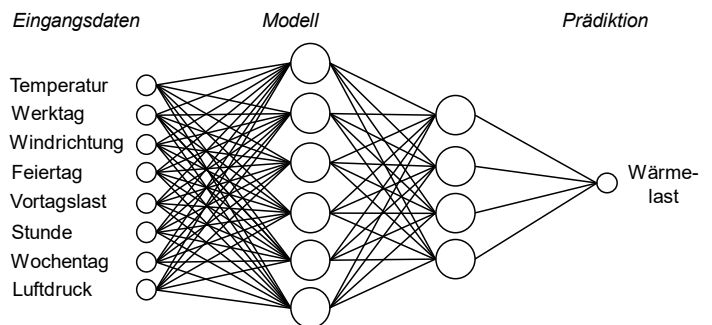


2. Entscheidungsbäume



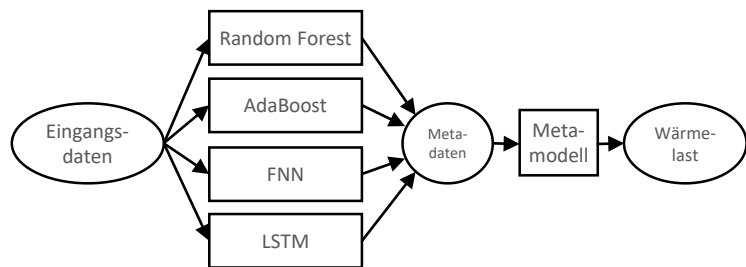
Es wurden mit allen Verfahren Fernwärmelastprognosen über einen Prognosezeitraum von 72 Stunden im Voraus erstellt und diese mit gemessenen Betriebsdaten verglichen. Typtag- und Typstundenverfahren weisen erhebliche Prognosefehler (im Mittel > 20 %) auf. Diese können durch den Einsatz von maschinellen Lernverfahren erheblich gesenkt werden. Beste Prognosergebnisse stammen von kombinierten Lernverfahren („DeepDHC“).

3. Künstliche Neuronale Netze einschließlich „Deep Learning“ (LSTM)

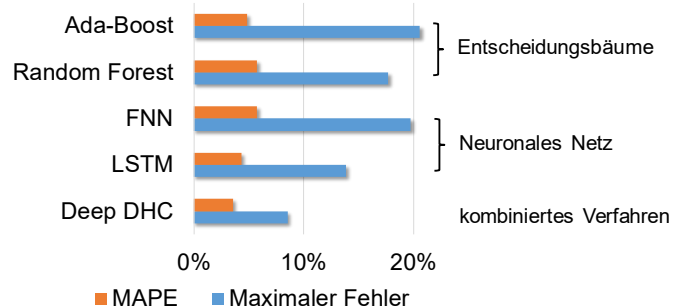


4. Deep DHC:

Kombination mehrerer Lernverfahren („Stacking“)



Typische mittlere u. maximale Fehler der maschinellen Lernverfahren



Der Einsatz moderner maschineller Lernverfahren lässt erhebliche Verbesserungen bei der Fernwärmelastprognose erwarten.

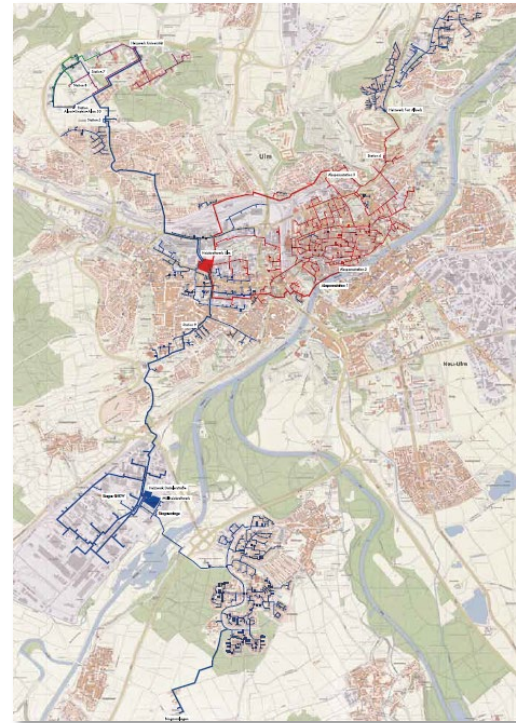
Im Projekt *KWK-Flex* wurde eine numerische Anlageneinsatzplanung für die Fernwärme Ulm erstellt, die alle Kraftwerke, den Wärmespeicher sowie das gesamte Fernwärmenetz (Hauptversorgungsleitungen) umfasst. Zur Erstellung der Betriebscharakteristiken der einzelnen Erzeugungsanlagen konnte auf umfangreiche Betriebsdaten zurückgegriffen werden.

Das Anlageneinsatzplanungsoptimierungstool ermöglicht die wirtschaftliche Untersuchung und Bewertung unterschiedlicher Strategien für eine wirtschaftlich optimierte und ressourcenschonende Anlageneinsatzplanung der KWK-Anlagen in Kombination mit thermischen Energiespeichern und „power-to-heat“-Anlagen.

Analysiert wurden sowohl kurzfristige Einzelmaßnahmen als auch langfristige Netzumstellungen, z. B.:

- die Wärmeerzeugung durch Blockheizkraftwerke in Kombination mit Großwärmepumpen,
- der Einsatz und die Abrufhäufigkeit eines Elektrodenerhitzers zur Verwendung im Regelleistungsmarkt
- die Analyse der Wirtschaftlichkeit eines weiteren Wärmespeichers
- die Auswirkungen der mittelfristig geplanten Netzumstellung des restlichen Dampfnetzes auf ein Heißwassernetz

Fernwärmenetz der FUG



Die numerische Anlageneinsatzplanungsoptimierung bietet die Basis für umfangreiche Optimierungsrechnungen und deren wirtschaftliche Bewertung.

Für weiterführende und detaillierte Informationen wird auf den ausführlichen Abschlussbericht des Forschungsvorhabens *KWK-Flex* sowie die zugehörigen Fachpublikationen verwiesen.

Kontakt:

Hochschule für angewandte Wissenschaften Kempten
Prof. Dr.-Ing. Matthias Finkenrath, M.Eng. Till Faber
Institut für Energie- und Antriebstechnik
Bahnhofstr. 61, 87435 Kempten (Allgäu)
E-Mail: matthias.finkenrath@hs-kempten.de



Bildnachweis:

Titel- und Rückseite: denismagilov - Fotolia.com
S.1: ZAK Energie GmbH, FUG/Fotoclub Ulm
S.2: Finkenrath, FUG/Fotoclub Ulm, ZAK Energie GmbH
S.3: STEAG/EBSILON Professional, Finkenrath, Bercher
S.4: FUG, Huber
S.5: FUG/Fotoclub Ulm, STEAG/EBSILON Professional, Finkenrath
S.6: Faber
S.7: Stöcker
S.8: Finkenrath, Faber
S.9: FUG

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 0324111 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages