

Techno-ökonomische Perspektive – Systeminnovationen am Beispiel des Strom-Wärme-Systems

Flexibilisierungsoptionen durch Kopplung von Strom- und Wärmemarkt

Eine zukünftige Herausforderung der Energiewende wird darin bestehen, zunehmende Stromnetzeinspeisungen von fluktuierenden erneuerbaren Energien (FEE) in das Energiesystem zu integrieren. Neben den Flexibilitätsoptionen im Stromsystem sollten dabei auch die Möglichkeiten des Wärmemarktes zur Stabilisierung des Strommarktes berücksichtigt werden. So können Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (KWK), Elektroheiz- und Wärmepumpen als Verbindungstechnologien zwischen Strom- und Wärmemarkt abhängig vom FEE-Dargebot und damit auch den Preissignalen des Strommarktes zu- bzw. abgeschaltet werden. Dazu werden Wärmespeicher benötigt, da die Flexibilisierung nur möglich ist, wenn die Produktion von der Wärmenutzung entkoppelt werden kann. Eine besonders aussichtsreiche Kopplung von Strom- und Wärmemarkt ist im Bereich der Fernwärmesysteme möglich, da sich hier große Energiemengen in Fernwärmespeichern im Vergleich zu dezentralen Lösungen kostengünstiger und effizienter speichern lassen.

„Smarte“ Fernwärmesysteme

Bislang wurden kleinere KWK-Anlagen der Nah- und Fernwärmeversorgung überwiegend wärmegeführt, d. h. ohne Berücksichtigung der Signale des Strommarktes betrieben. Mit steigendem Anteil erneuerbarer Energien im Strommarkt wird es jedoch erforderlich sein, den Betrieb der KWK durch den Einsatz großer Wärmespeicher zu flexibilisieren, um die KWK-Stromerzeugung mit dem Dargebot an FEE und damit auch den volatilen Strompreisen zu harmonisieren. Damit können KWK-Anlagen als Technologie zur Reduktion von CO₂-Emissionen und zur Einsparung von Primärenergie nicht nur zur Erreichung der energiepolitischen Ziele der Bundesregierung, sondern auch zur Stabilisierung des Strommarktes beitragen.

Ein strommarktorientierter Betrieb bedeutet für KWK-Anlagen eine Verlagerung der Produktion in Zeiten hoher Börsenstrompreise. In der Folge vermindern sich die Laufzeiten der KWK-Anlagen und damit auch die Abwärmeproduktion für die Fernwärmenetzeinspeisung. Dadurch steigt der Bedarf an alternativen Wärmeerzeugern, die die phasenweise fehlende KWK-Abwärme ersetzen können.

Eine stärkere Auslastung des i. d. R. ohnehin vorhandenen konventionellen Spitzenlastkessels (SLK) ist dabei sowohl aus ökologischer als auch ökonomischer Sicht nicht anzustreben. In Dänemark ist in diesem Zusammenhang ein regelrechter Boom der Fernwärmenetzeinspeisung solarer Wärme aus großen Freiflächenanlagen zu beobachten.

Zusätzliche Flexibilität im System bieten elektrische Widerstandsheizungen und Wärmepumpen. Diese können nicht nur phasenweise die Wärmeversorgung aufrechterhalten, sondern tragen durch die Verheizung von Stromüberschüssen zudem zur Stabilität im Strommarkt bei. Während in Deutschland eine derartige Kopplung von Strom- und Wärmemarkt als innovativ zu bezeichnen wäre, sind solche Systeme in Dänemark bereits weitverbreitete Praxis.

Techno-ökonomische Betrachtungen verschiedener Erzeugungsvarianten

Das Zusammenspiel der oben dargestellten flexiblen Erzeuger in KWK-basierten Fernwärmesystemen wird mit Hilfe dynamischer Simulationen (TRNSYS) analysiert und aus ökonomischer Sicht bewertet. Dabei steht zunächst der Einfluss volatiler Börsenstrompreise auf die Wirtschaftlichkeit von solarthermisch unterstützten Fernwärmesystemen bei heutigen energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen (Spotmarktpreisverlauf 2012) im Vordergrund. Dazu werden die Kosten eines Fernwärmesystems bestehend aus stromgeführter KWK sowie SLK verglichen mit denjenigen, die sich durch Ergänzung des Systems um ein Solarkollektorfeld ergeben. Die Untersuchungen werden beispielhaft für ein (fiktives) Fernwärmesystem mit den in *Tabelle 1* wiedergegebenen Kennwerten vollzogen. Exemplarisch ist die Schaltskizze für das Fernwärmesystem mit Einbindung des Solarkollektorfeldes in *Abbildung 1* dargestellt.

Der Einsatz der Wärmeerzeuger im Modell orientiert sich an den Preissignalen der Strombörse. Ungeachtet des solarthermischen Angebots wird die KWK-Anlage erst ab einem Börsenstrompreis betrieben, oberhalb dessen die Grenzkosten der Wärmeerzeugung der KWK-Anlage diejenigen des SLK unterschreiten. Im Modellfall liegt diese Schwelle bei 18 €/MWh. Die rote Linie in *Abbildung 2*, links, lässt erkennen, dass somit in 2012 ein gegenüber dem SLK rentabler Betrieb der KWK-Anlage (noch) in der überwiegenden Anzahl der Jahressstunden möglich ist.



DLR
Evelyn Sperber
evelyn.sperber@dlr.de

Wuppertal Institut
Dr. Peter Viebahn
peter.viebahn@wupperinst.org

Tabelle 1
Kennwerte des betrachteten Fernwärmesystems

Fernwärmenetz	Netzeinspeisung: 12.700 MWh/a, Jahreshöchstlast: 5 MW Netzauslegungsbedingungen: 95/60°C
Erdgas-BHKW	Elektrische Leistung: 1,4 MW, thermische Leistung: 1,5 MW Gesamtwirkungsgrad: 85 %
Erdgas-SLK	Thermische Leistung: 5 MW Wirkungsgrad: 90 %
Solar-Flachkollektor	Kollektorfläche: 4.000 m ² $\eta_0=0,82$ $\alpha_1=2,43$ W/(m ² K) $\alpha_2=0,012$ W/(m ² K ²) Aufstellwinkel 40°, Azimut 0°
Thermischer Speicher	Speichervolumen: 1.500 m ³ (entsprechend 12 h Jahreshöchstlast)

Abbildung 1
Schaltskizze
für ein KWK-basiertes Fernwärmenetz mit Solarkollektorfeld und Spitzenlastkessel (SLK)

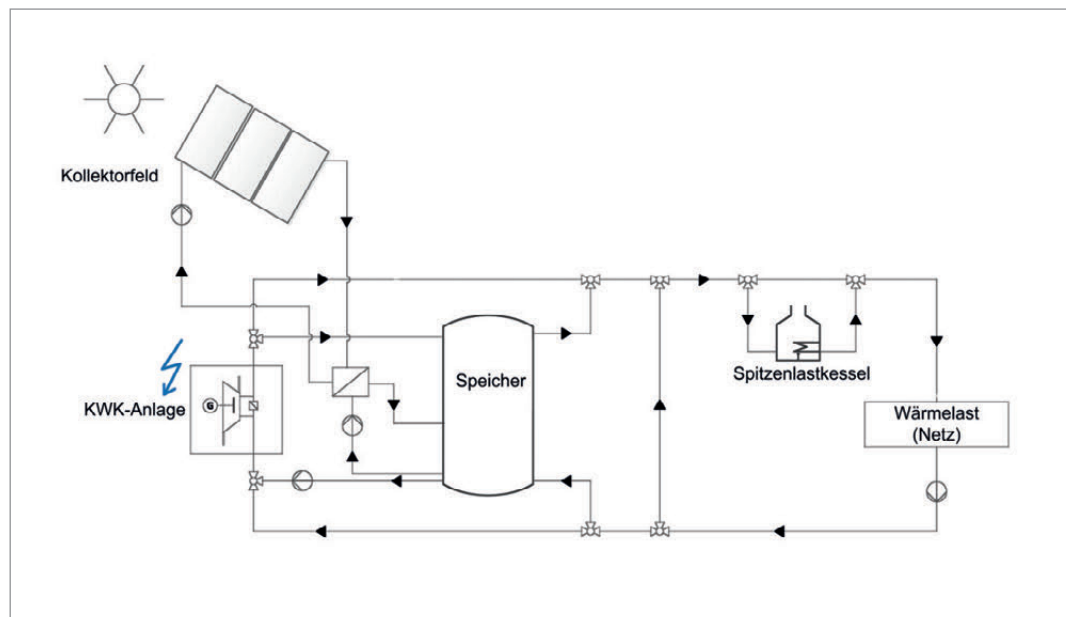
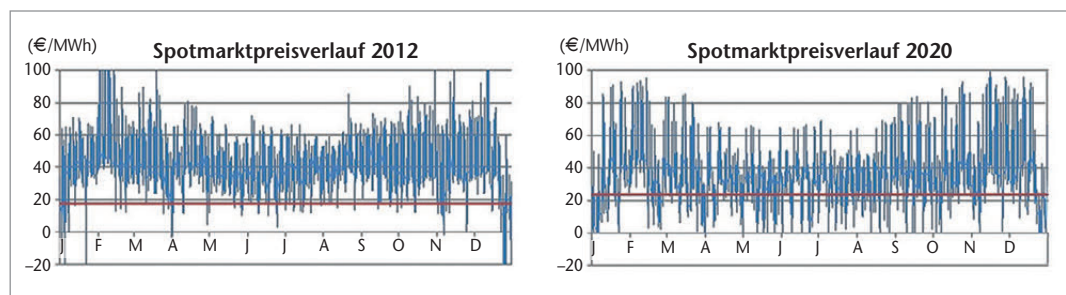


Abbildung 2
Spotmarktpreise
Verlauf der historischen Spotmarktpreise in 2012 (links) sowie der synthetisch generierten Spotmarktpreise für 2020 (rechts). Die rote Linie markiert jeweils die Strompreisschwelle, oberhalb der der Betrieb der KWK-Anlage gegenüber dem des SLK die günstigere Erzeugungsoption ist.



Unabhängig von den Signalen des Strommarktes kann die KWK-Anlage nur produzieren, solange der Speicher noch freie Kapazitäten hat. Dabei sorgt ein intelligentes Speichermanagement dafür, dass die KWK-Anlage nur in den Stunden mit den höchsten Börsenstrompreisen in Betrieb ist, um zu vermeiden, dass beispielsweise der Speicher trotz eines gerade ansteigenden Börsenstrompreisverlaufes bereits vollgeladen ist. Hierzu wird unterstellt, dass der Anlagenbetreiber die Börsenstrompreise, den Verlauf des Wärmebedarfs sowie das solare Dargebot für die nachfolgenden 24 Stunden vorhersehen kann. Die

KWK-Anlage konkurriert mit der Solarthermieranlage um freie Speicherkapazität. Dabei hat die Solarthermieranlage wegen ihrer niedrigen Grenzkosten bis zu einer Strompreisschwelle von 67 €/MWh Vorrang; erst oberhalb dieser Schwelle stellt sich der Betrieb der KWK aufgrund hoher Stromerlöse kostengünstiger dar. Der SLK ist bei fehlendem Solardargebot und Börsenstrompreisen unterhalb von 18 €/MWh die betriebswirtschaftlich günstigste Erzeugungsoption und dient generell der Nachheizung, sofern die KWK- bzw. Solaranlage nicht die erforderliche Vorlauftemperatur erbringen können.

Ökonomische Randparameter			
Zinssatz	4 %		
Kalkulationsdauer	20 a		
Erdgaspreis	34,5 €/MWh _{Hi}		
Erdgassteuer	5,5 €/MWh _{Hs} (BHKW ist von dieser befreit)		
Komponentenspezifische Parameter			
	Spez. Investition	Fixe Betriebskosten	Variable Betriebskosten
BHKW	850 €/kW _{el}	2 % /a	10 €/MWh _{el}
SLK	75 €/kW _{th}	2 % /a	0,13 €/MWh _{th}
Solarkollektorfeld	220 €/m ² (Systempreis)	–	1 €/MWh _{th}
Speicher	200 €/m ³	–	–

Tabelle 2

Ökonomische
Rahmenbedingungen

Als Bewertungskriterium der Wirtschaftlichkeit werden die spezifischen Systemwärmekosten der unterschiedlichen Erzeugungsoptionen berechnet und verglichen. Diese verstehen sich als Verhältnis der Summe der jährlichen Vollkosten der einzelnen Erzeugungsalternativen (Betriebskosten sowie annualisierte Investitionen, bei KWK abzüglich Erlösen aus dem Stromverkauf, dem KWK-Zuschlag und den vermiedenen Netznutzungsentgelten (vNNE)) zur Jahresgesamtwärmeerzeugung. Die Kosten des Fernwärmenetzes bleiben beim ökonomischen Vergleich der Erzeugungsvarianten unberücksichtigt. Die ökonomischen Parameter für die Berechnung sind in *Tabelle 2* zusammengefasst.

Getrennt nach den Erzeugungsvarianten fasst die untenstehende *Tabelle 3* die Berechnungsergebnisse der Simulationsläufe (meteorologische Daten: Würzburg 2012) zusammen. Zusätzlich werden als Referenz die Erzeugungsstruktur und -kosten bei der heute noch üblichen wärmegeführten KWK-Fahrweise¹ ausgewiesen (Vergütung des KWK-Stroms nach üblichem Preis).

Es zeigt sich, dass sich der strompreisorientierte Betrieb der KWK-Anlage trotz leicht abnehmenden Deckungsanteils und trotz zusätzlicher Investition in den Wärmespeicher bereits heute wirtschaftlicher darstellt als die wärmegeführte Fahrweise. Dies begründet sich dadurch, dass die KWK-Anlage im strompreisorientierten Betrieb im Durchschnitt höhere Stromerlöse erzielt. Mit Hilfe von TRNSYS-

Simulationsläufen kann zudem dargestellt werden, wie der Einsatz von Solarthermie die Laufzeit des SLK bei strommarktorientiertem Betrieb der KWK-Anlage verkürzt. Es wird jedoch auch ersichtlich, dass bei heutigen Börsenstrom- und Gaspreisen die Ergänzung von Fernwärmesystemen um solarthermische Anlagen (noch) nicht wirtschaftlich ist.

Mittelfristige Perspektive bei steigendem Anteil erneuerbarer Energien in der Stromerzeugung

Mit zunehmenden Anteil erneuerbarer Energien im Strommarkt sind verstärkt Situationen zu erwarten, in welchen konventionelle Kraftwerke und damit auch erdgasbasierte KWK-Anlagen nicht zur Deckung der Stromnachfrage benötigt werden. Gleichermaßen ist zu vermuten, dass die Anzahl der Stunden zunimmt, in denen die KWK-Anlage nicht wirtschaftlich betrieben werden kann. Die oben vorgestellten Flexibilitätsoptionen werden daher auch für den Szenarienhorizont 2020 simuliert und bewertet. Dazu wird der Verlauf der Börsenstrompreise in 2020 anhand einer für 2012 festgestellten Korrelation zwischen Spotmarktpreisen und Residuallast generiert (Datenquelle für Einspeisung aus FEE sowie Börsenstrompreise 2012:

<http://pfbach.dk>; für Lastdaten: ENTSO-E).

Die Residuallast in 2020 wird wiederum anhand historischer, normierter Einspeiseprofile von erneuerbaren Energien sowie der nach BMU-„Leitstudie“ [Nitsch et al. 2012] installierten Leistungen an EE-Anlagen in 2020 konstruiert. Im Gegensatz zum heuti-

¹ Anders als bei der stromgeführten Fahrweise steht der KWK-Anlage beim wärmegeführten Betrieb nur ein Speichervolumen von 30 m³ zur Verfügung.

	Referenz: wärmegeführte KWK + SLK	Stromgeführte KWK+SLK	Stromgeführte KWK+SLK+ Solar
Deckungsanteile			
KWK	74 %	71 %	61 %
SLK	26 %	29 %	24 %
Solar	0 %	0 %	15 %
Spez. Systemwärmekosten	40,2 €/MWh _{th}	40,0 €/MWh _{th}	41,3 €/MWh _{th}

Tabelle 3

Ergebnisse der techno-ökonomischen Untersuchungen unter heutigen Rahmenbedingungen

Tabelle 4

Ergebnisse der techno-ökonomischen Untersuchungen unter zukünftig zu erwartenden Rahmenbedingungen (Szenarijahr 2020, Kostenberechnung real)

	Referenz: wärmegef. KWK + SLK	stromgef. KWK + SLK	stromgef. KWK + SLK + Heizstab	stromgef. KWK + SLK + Solar	stromgef. KWK + SLK + Solar + Heizstab
Deckungsanteile					
KWK	74 %	61 %	61 %	53 %	53 %
SLK	26 %	39 %	34 %	31 %	28 %
Solar	0 %	0 %	0 %	16 %	15 %
Heizstab	0 %	0 %	5 %	0 %	4 %
Spez. Systemwärmekosten	57,6 €/MWh _{th}	52,8 €/MWh _{th}	53,2 €/MWh _{th}	51,4 €/MWh _{th}	52,2 €/MWh _{th}

gen Marktdesign werden negative Strompreise für das Jahr 2020 nicht zugelassen. Der Verlauf der synthetischen Strompreise ist in [Abbildung 2](#), rechte Seite, zu erkennen. Der Gaspreis in 2020 wird gemäß [\[Matthes 2010\]](#) mit 40 €/MWh_{Hi} (ohne Erdgassteuer) angenommen. Aufgrund des gegenüber 2012 gestiegenen Gaspreises steigt die Börsenstrompreisschwelle, oberhalb welcher der Betrieb der KWK-Anlage wirtschaftlicher als der des SLK ist, auf ca. 24 €/MWh (siehe auch [Abbildung 2](#), rechts). Als zusätzliche Erzeugungsoption wird für das Szenarijahr 2020 ein Elektroheizstab, der in den Wärmespeicher integriert ist (1 MW_{th}, 120 €/kW spez. Investition), berücksichtigt. Beim Betrieb des Heizstabes müssen für den Strombezug annahmegemäß Entgelte (Steuern, Abgaben etc.) in einer Gesamthöhe von 40 €/MWh_{el} entrichtet werden, so dass der Heizstab gegenüber dem SLK (und insbesondere gegenüber der KWK-Anlage) erst unterhalb von Strompreisen von etwa 11 €/MWh die günstigere Erzeugungsoption ist. Unter Berücksichtigung des in 2020 veränderten Börsenstrompreisverlaufes und dem höheren Gaspreis werden unterschiedliche Erzeugungsvarianten von stromgeführter KWK, SLK, Solarthermie und Heizstab techno-ökonomisch analysiert. Bezüglich der technischen Parameter und der Verschaltung der Komponenten gelten dieselben Bedingungen wie für das für 2012 untersuchte System. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in [Tabelle 4](#) wiedergegeben.

Wie aus [Tabelle 4](#) ersichtlich, sollten KWK-Anlagen nicht nur aus systemanalytischer, sondern auch aus betriebswirtschaftlicher Betrachtungsweise zukünftig stromgeführt betrieben werden. Zusätzliche Wärmeerzeuger in strommarktorientierten KWK-basierten Fernwärmesystemen können klimaschädliche Wärme aus SLK verdrängen und bringen somit CO₂-Einsparungen mit sich. Im Falle einer solarthermischen Unterstützung kann die Wärme sogar kostengünstiger bereitgestellt werden.

Darüber hinaus sind die Kostenunterschiede zwischen den einzelnen, strommarktorientierten Systemen sehr gering, so dass Fernwärmesysteme stets mit zusätzlichen strombetriebenen Erzeugern ausgestattet wer-

den sollten, um möglichst hohe Flexibilitäten in Bezug auf den Strommarkt bereitstellen zu können. Die Wirtschaftlichkeit dieser alternativen Systeme wird durch einen zunehmenden Anteil an FEE im Strommarkt, steigende Erdgaspreise sowie möglicherweise der Internalisierung von CO₂-Kosten verbessert.

Zusätzliche Erlöse lassen sich durch die Teilnahme der KWK-Anlage sowie des Heizstabes am Regelenenergiemarkt erzielen; diese Option wird hier jedoch nicht betrachtet. [Abbildung 3](#) zeigt schematisch den betriebswirtschaftlich optimierten Betrieb der unterschiedlichen Erzeuger in Abhängigkeit vom Spotmarktpreis in einer Herbstwoche 2020.

Systeminnovationen durch Integration gesellschaftlicher und sozio-ökonomischer Aspekte

Es reicht jedoch nicht aus, nur isoliert technologische Innovationen zu verfolgen, da sie häufig zu ökologischen und sozio-ökonomischen Problemverschiebungen führen und indirekte und direkte Rebound-Effekte auf Grund von Produktivitätssteigerungen zur Folge haben können. Ein Lösungsansatz bietet die Weiterentwicklung zu Systeminnovationen, die durch die Kombinationen von drei Dimensionen gekennzeichnet sind [\[Schneidewind und Scheck 2013\]](#):

- technologische Innovation
- soziale Innovation und
- Infrastrukturen, in die diese Innovationen eingebunden sind.

Systeminnovationen sind heute jedoch nicht per se etabliert, akzeptiert und umfassend untersucht und müssen gezielt gefördert werden. [Abbildung 4](#) zeigt dies am Beispiel des hier betrachteten Strom-Wärme-Systems. Ergänzend zu der oben beschriebenen eigentlichen technologischen Innovation sowie der benötigten Infrastrukturen (Ausbau der Fernwärmenetze, Errichtung von Fernwärmespeichern, Weiterentwicklung von „smart grids“ für Strom und Wärme) sind verschiedene soziale Aspekte denkbar, die umfassendere, eingebettete Veränderungsprozesse ermöglichen:

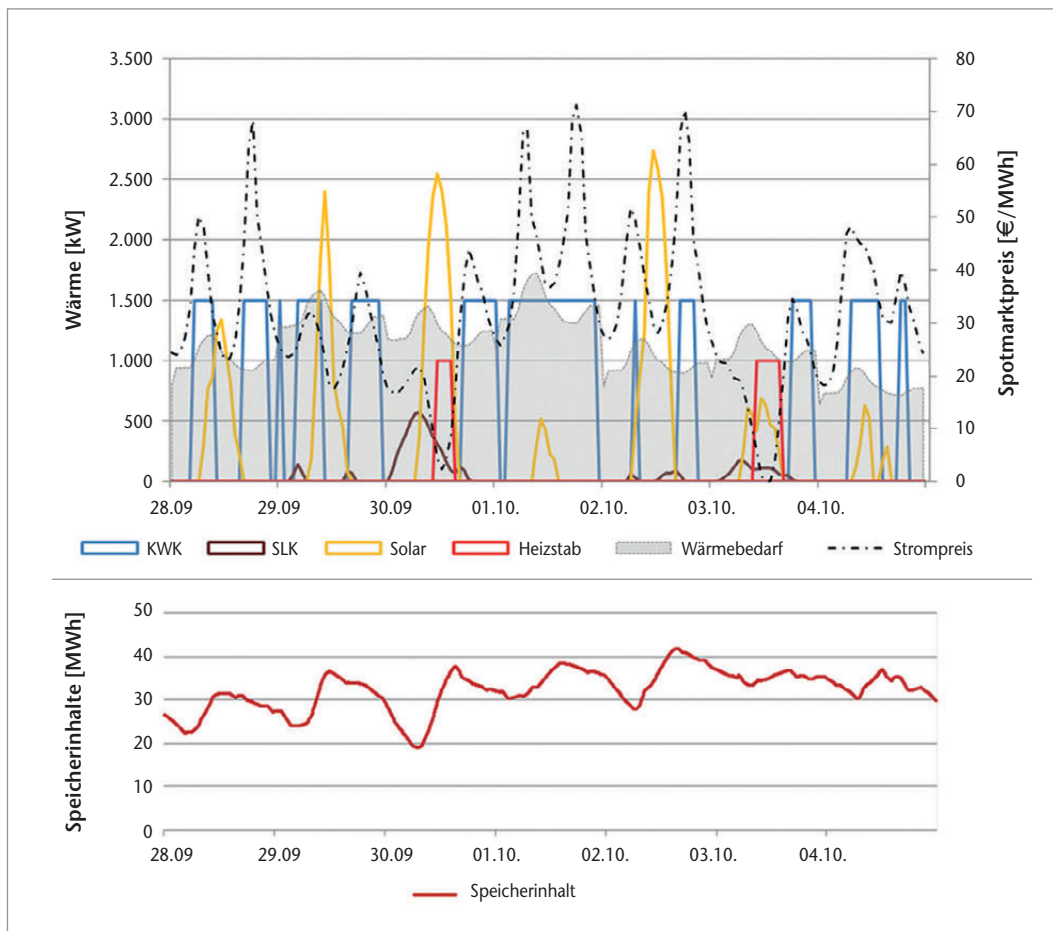


Abbildung 3

Einsatz von KWK-Anlage, SLK, Solaranlage und Heizstab in Abhängigkeit vom Börsenstrompreis am Beispiel einer Herbstwoche in 2020

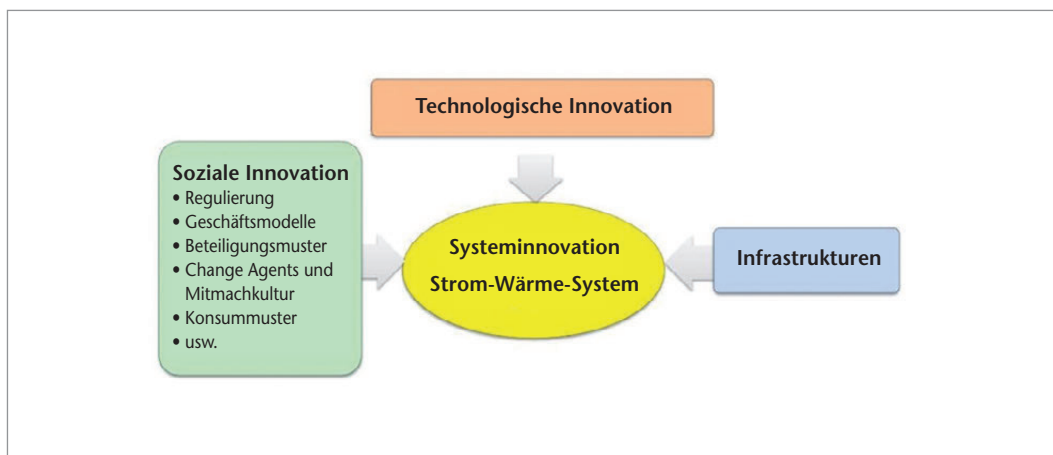


Abbildung 4

Systeminnovation Strom-Wärme-System durch gekoppelte Betrachtung von technologischer Innovation, benötigter Infrastruktur und sozialer Innovation

- Es gibt bisher keine Regulierung des Netzzugangs, so dass ein **Regulierungsmanagement** entwickelt werden sollte.
- Die neuen Konstellationen von Akteuren und Betreibern bedingen neue **Geschäftsmodelle** (Handel am Spotmarkt, Teilnahme am Regulenergiemarkt, Smart Markets z. B. für regionales Lastmanagement).
- Um die verschiedensten Akteure einzubeziehen und zur Teilnahme zu motivieren, werden **Beteiligungsmuster** benötigt.
- Es bedarf der Vorreiterrolle von **Change Agents** und der Entwicklung einer **Mitmachkultur** (Verbreitung von best-practice-Beispielen und Greifbarmachen einer eher abstrakten Strom-Wärme-Kopplung, die nicht wie Photovoltaik auf dem Dach direkt sichtbar ist).
- Es müssen **neue Konsummuster und Normen** entwickelt werden (KWK als clean energy etablieren; regionale Wertschöpfung statt Gasimport betonen; Abwägungen zwischen Sicherheit/Preisen/Ökologie/Autonomie vornehmen).

Zur erstmaligen Erprobung innovativer Systeme bieten sich Realexperimente im Sinne „ökologische[r] Gestaltungsprozesse in der Wissensgesellschaft“ [Groß et al. 2005] an. Sie können dazu dienen, Potenziale, (Wechsel-)Wirkungen und Anforderungen für sozio-technische Wandelprozesse zu analysieren und für nachhaltige Systeminnovationen fruchtbar zu machen, erfordern jedoch eine Integration unterschiedlichster Wissensbestände aus Naturwissenschaften und Technik, aber auch aus Sozial- und Kulturwissenschaften sowie der alltäglichen Praxis in Energieerzeugung und -nachfrage („Transdisziplinarität“). Das Beispiel Dänemark kann als großes Realexperiment angesehen werden; zur Übertragung auf die deutsche Situation sollten hierauf aufbauend regionale Realexperimente entwickelt, begleitet und ausgewertet werden.

Fazit

In einem von Wind- und PV-Strom dominierten Strommarkt sollten KWK-Anlagen mit Hilfe von Wärmespeichern flexibilisiert werden, um die Fluktuationen der erneuerbaren Energien in der Stromerzeugung auszugleichen.

Durch den betriebswirtschaftlich optimierten Einsatz von zusätzlichen Wärmeerzeugern im Fernwärmesystem wie Elektroheizern und Solarthermie kann zudem klimaschädliche und teure Wärme aus Spitzenkesseln verdrängt werden.

Erneuerbare Energien im Strommarkt öffnen somit auch ein Fenster für eine stärkere Durchdringung der erneuerbaren Energien im Wärmemarkt.

Während in Dänemark derartige flexible Strom-Wärmesysteme bereits praktiziert werden, besteht in Deutschland noch erheblicher Nachholbedarf in der dafür erforderlichen Infrastruktur. So müssen die Wärmespeicher, die erst den flexiblen Betrieb von KWK-Anlagen ermöglichen, im Gegensatz zu Dänemark hierzulande erst noch errichtet werden. Auch generell ist das Potenzial der flexiblen KWK-basierten Fernwärmesysteme in Dänemark einfacher erschließbar als in Deutschland, da die dortige Wärmeversorgung bereits zu einem großen Anteil auf Nah- und Fernwärme basiert. In Deutschland ist hingegen noch ein erheblicher Wärmenetzausbau notwendig.

Ergänzend sollten soziale Innovationen und Realexperimente zur optimalen Umsetzung der technischen Innovationen entwickelt werden, um auch zur gesellschaftlichen Gestaltungsaufgabe der Energiewende einen Lösungsbeitrag leisten zu können.

Literatur

[Groß et al. 2005] Groß, M.; Hoffmann-Riem, H.; Krohn W. (2005). Realexperimente. Ökologische Gestaltungsprozesse in der Wissensgesellschaft. Bielefeld: Transcript

[Matthes 2010] Matthes, F.C.: Energiepreise für aktuelle Modellierungsarbeiten. Regressionsanalytisch basierte Projektionen. Teil 1: Preise für Importenergien und Kraftwerksbrennstoffe. Berlin, März 2010

[Nitsch et al. 2012] Nitsch, J. et al.: Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Schlussbericht von DLR, IWES und IFNE für das BMU. Stuttgart, März 2012

[Schneidewind und Scheck 2013] Schneidewind, U.; Scheck, H.: Die Stadt als „Reallabor“ für Systeminnovationen. In: Rückert-John, J. (Hrsg): Soziale Innovation und Nachhaltigkeit. Perspektiven sozialen Wandels. Springer VS.