

Dietrich Balzer

## **Automatisierung und Nachhaltigkeit technologischer Lösungen**

### **1 Einleitung**

Der heute viel und manchmal auch etwas oberflächlich verwendete Begriff der Nachhaltigkeit (Sustainability) hat einen direkten Bezug zur Automatisierung. An anderer Stelle wurde bereits dargestellt, welchen Beitrag die Theorie der Prozessführung im Sinne der automatisierten Prozessoptimierung, -stabilisierung und -sicherung zur Nachhaltigkeit und Zuverlässigkeit technologischer Lösungen leisten kann (vgl. Balzer/Thierse 2014). Im vorliegenden Beitrag wird an konkreten Beispielen gezeigt, wie diese theoretischen Überlegungen in die Praxis umgesetzt werden können. Dabei wird über die Erfahrungen berichtet, die drei Konsortien aus dem Netzwerk >> [www.Eureffus.de](http://www.Eureffus.de) << bei der Planung und teilweise bereits bei der Realisierung automatisierter nachhaltiger Lösungen bei der Nutzung erneuerbarer Energien gesammelt haben.

Wenn wir von Nachhaltigkeit reden, müssen wir technische, ökonomische, ökologische und soziale Kriterien betrachten. Im Sinne der Nachhaltigkeit muss also eine polykriteriale Optimierungsaufgabe (Vektoroptimierung) gelöst werden. Es geht um die Bestimmung einer Pareto-Menge. Es liegt auf der Hand, dass die Automatisierung als Schlüssel zu nachhaltigen technologischen Prozessen angesehen werden kann.

Unter dem technischen Kriterium verstehen wir die Einhaltung von Optimalitätsbedingungen bei der automatischen Prozessführung, -stabilisierung und -sicherung. Dabei geht es erstens um adaptive Lösungen unter Nutzung echtzeitfähiger Elemente der künstlichen Intelligenz und zweitens um die Wiederverwendbarkeit von Automatisierungslösungen. Unter dem ökonomischen Kriterium verstehen wir die Wettbewerbsfähigkeit, unter dem ökologischen Kriterium die Ressouceneffizienz und unter dem sozialen Kriterium die physiologischen und psychologischen Arbeitsbedingungen. Die Automatisierung verfügt als integrierende Wissenschaftsdisziplin über alle Voraussetzungen, um diese Polyoptimierungsaufgabe zu lösen.

Die Beziehung zwischen Automatisierung und Nachhaltigkeit wird an Hand folgender Beispiele innovativer technologischer Lösungen erläutert: Gewinnung elektrischer Energie aus Abwärme im Niedertemperaturbereich, Energieautonomie von Wohn- und Gewerbegebieten durch Einsatz von virtuellen Kraftwerken sowie Nutzung von organischen Abfällen und Reststoffen zur Erzeugung von Diesel durch pyrolysefreie katalytische drucklose Verölung. In diesem Zusammenhang wird die Wechselwirkung zwischen Nachhaltigkeit und Innovation analysiert. Dabei ist zu beachten, dass Innovation grundsätzlich mit einem technischen Risiko verbunden ist. Dieses Risiko muss im Rahmen des Projektierungsprozesses minimiert werden, damit die Innovation auch tatsächlich einen Beitrag zur Nachhaltigkeit leisten kann. Es kommt also darauf an, die Sicherheit der innovativen technologischen Prozesse zu gewährleisten (vgl. Balzer 2016).

## **2 Nachhaltige automatisierte technische Lösungen des Energiemanagement und der Energieautonomie für neue Formen des Wohnens und Arbeitens**

### *2.1 Gesellschaftliches Umfeld und neue Technologien*

Es ist im gesellschaftlichen Interesse des Klima-, Natur- und Umweltschutzes, eine nachhaltige Entwicklung beim Einsatz der Energie und Ressourcen zu erreichen, die individuelle Belastung der Verbraucher mit Energiekosten zu senken und die *Weiterentwicklung und Optimierung von Technologien* zur effizienten Energienutzung zu unterstützen und damit letztendlich auch einen Beitrag zur Vermeidung von Konflikten um fossile Energieressourcen zu leisten. Ein Konsortium aus Industrieunternehmen und wissenschaftlichen Einrichtungen bearbeitet ein Projekt zur Nachhaltigkeit von automatisiertem Energiemanagement (vgl. EnergieAutark et al. 2016).

Analysen der Energienutzung insbesondere in Wohn- und Gewerbeanlagen/-parks haben ergeben, dass der Wunsch nach einer rationellen Energienutzung und klimaneutralen Energieerzeugung eine zunehmende Rolle spielt. Unter diesem Gesichtspunkt erhalten Unternehmen der Bereiche Bauwesen und Infrastruktur zunehmend Anfragen bezüglich der Rekonstruktion von Wohn- und Gewerbeanlagen einerseits als Berater bzw. Projektant mitzuwirken und andererseits die gebäudetechnischen Anlagen und Energiesysteme vor Ort auf die neuen Anforderungen einzustellen bzw. ihre Funktionalität anzupassen. Gleichzeitig gibt es einen zunehmenden Bedarf an vollständig neu konzipierten, innovativen Lösungen, die neben dem Bedürf-

nis nach innovativer Energienutzung auch ganz neue Formen des Wohnens und Arbeitens unter effizienter Nutzung der heute verfügbaren Technologien in diesem Kontext fordern (siehe Abb. 1). Mit dem Wissen, dass die Energiepreise noch weiter steigen werden, weil zunehmend Erzeuger mit umweltschonenden Technologien subventioniert werden müssen, um diese Technologien am Markt durchzusetzen, müssen die Restrukturierungen von Wohn- und Gewerbeparks und -anlagen unter dem Blickwinkel hoher Energieeffizienz voran gebracht werden und neue Anlagen unmittelbar von den aktuellen technischen Möglichkeiten Gebrauch machen.

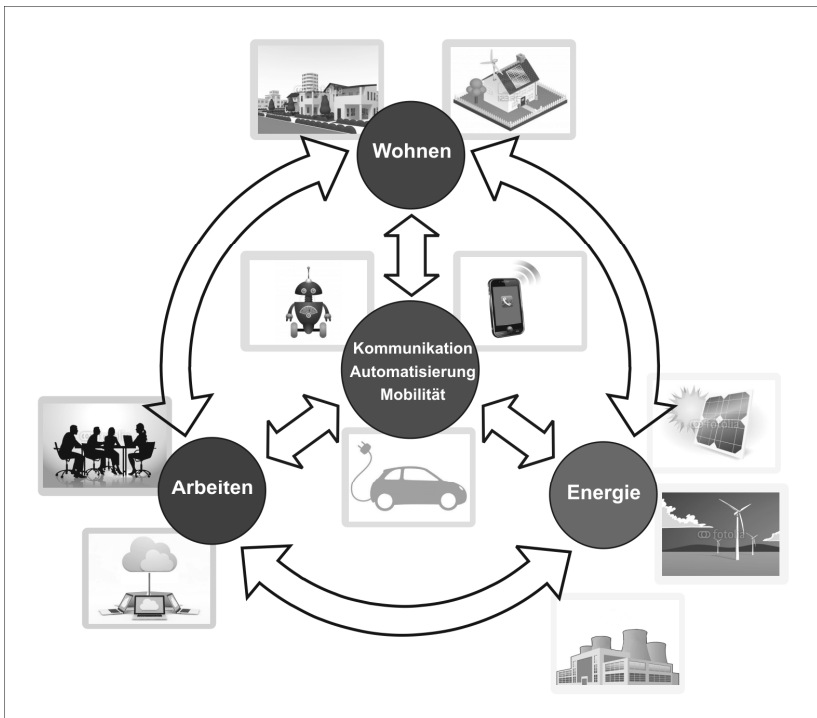


Abb. 1: Innovatives Gesamtkonzept – Neue Formen des Wohnens und Arbeitens unter den Kerngesichtspunkten Nachhaltigkeit, Energie- und Ressourceneffizienz und Gesundheit

Eigene Darstellung

Dabei ist festzustellen, dass die in diesem Umfeld bisher verfügbaren Produkte – etwa Solaranlagen, Passivhäuser, Heizanlagen unter Nutzung von Erdwärme, Ansätze des Ambient Assisted Living etc. – bisher keinen ganzheitlichen Ansatz verfolgen und nur als Insellösungen zu verstehen sind, die für sich betrachtet zwar die jeweiligen Primäranforderungen erfüllen, jedoch viele Synergien sowohl bei der Effektivität als auch bei der Nutzerfreundlichkeit insbesondere in Kombination ungenutzt lassen. Es wird das Ziel verfolgt, diese Ansätze zu einem ganzheitlichen Wohn- und Gewerbe-konzept, das den gegenwärtigen und absehbaren zukünftigen gesellschaftlichen Anforderungen gerecht wird, weiterzuentwickeln.

Dies geht über eine bloße Kombination vorhandener Technologien weit hinaus. Im Kern entsteht eine Technologieplattform, die teilweise bereits durch das Konsortium realisiert wurde und die wir im Folgenden als wissensbasiertes integriertes Prozessführungssystem im Sinne eines Smart-Grid bezeichnen.

Um die Motivation für die Schaffung dieses Systems deutlich zu machen, sollen zunächst die bestehenden gesellschaftlichen Herausforderungen in Deutschland (und einer Reihe anderer Industrienationen) betrachtet werden. Unsere Gesellschaft wird heute in erheblichem Maße durch die folgenden gesellschaftlichen Herausforderungen bestimmt:

- Demografischer Wandel, d.h. Alterung der Gesellschaft;
- Energiewandel, d.h. Umstrukturierung des Energiemixes hin zu den Erneuerbaren;
- Forderung eines ständig wachsenden Bildungsniveaus innerhalb der Gesellschaft bei kontinuierlicher Weiterbildung zur Sicherung des High-Tech-Standorts Deutschland;
- Forderung einer hohen Mobilität der Arbeitnehmer aufgrund der Globalisierung und der Schnelllebigkeit der heutigen Ökonomie;
- überproportionales Wachstum von Beschäftigung im Dienstleistungssektor.

Begünstigt wird die Entwicklung eines wissensbasierten integrierten Prozessführungssystems für das Energiemanagement durch eine Reihe von Voraussetzungen, die in sich in den letzten Jahren etabliert haben, etwa

- allgemeine Verfügbarkeit von Breitbandinternetverbindungen (sowohl stationär als auch mobil);
- steigende Datenspeicherung und Informationsgewinnung in verschiedensten Technologie- und Lebensbereichen (verstärkter Einsatz von

Sensorik in technischen Anlagen aller Art, durch den Einsatz von RFID-Technologie, Big Data etc.);

- Entwicklung „smarter“ Lösungen zur Nutzung der vorliegenden Daten, um bestehende Prozesse intelligenter, d.h. effizienter und nachhaltiger zu gestalten;
- Verfügbarkeit von Web- und Cloud-Technologien als Service-basierte Lösungen.

Das wissensbasierte integrierte Prozessführungssystem soll neben dem Energiemanagement die informationstechnische Basis für ein quartierorientiertes Wohn- und Betreuungskonzept bilden. Eckpunkte dieses Konzeptes sind:

- Neben der Energieautarkie ist der Ansatz der gegenseitigen Hilfe ein wichtiges Alleinstellungsmerkmal. Ein Quartiermanager wird unter Nutzung des Steuerungs- und Kommunikationssystems die Moderation und Koordination der Nachbarschaftshilfe übernehmen, die vor allem für Hochaltrige, Familien mit Kindern als auch Menschen mit Behinderungen von großer Bedeutung sind. Bei Bedarf werden telemedizinische Leistungen in Anspruch genommen.
- Es werden Heimarbeitsplätze unter Einbindung moderner Informations- und Kommunikationstechnologien direkt in die Gebäudeplanung integriert. Damit wird den gegenwärtigen Trends zu neuen Konzepten des Arbeitens und Wohnens (z.B. Remote-Arbeitsplätze) entsprochen.
- Integration von Systemlösungen der e-Mobilität in die Kommunikations- und Automatisierungsstrukturen von baulichen Anlagen.

## *2.2 Innovativer Kern der automatisierten technischen Lösung des Energiemanagement*

Ausgehend von der Notwendigkeit, auf die o.g. gesellschaftlichen Trends zu reagieren, wird unter Nutzung der beschriebenen Technologieentwicklung eine ganzheitliche Technologieplattform für eine neue Generation des regionalen Energiemanagements geschaffen. Dabei werden auch intelligente Schnittstellen erstens zu neuen bisher nicht genutzten Energiequellen (Thermoelektrische Wandler zur Erzeugung von Strom aus Abwärme, Erzeugung von Diesel aus organischen Abfällen und Reststoffe für Blockheizkraftwerke) und zweitens zu Produktionsanlagen im Gewerbegebiet geschaffen.

Es geht dabei um eine koordinierte intelligente Steuerung der Erzeugung, Speicherung und Nutzung von Wärmeenergie und elektrischer Energie. Es wird eine breite Palette von Speichertechnologien eingesetzt: Festkörperspei-

cher, elektrische Batterien, Gasspeicher (z.B. Wasserstoff), Flüssigkeitsspeicher (z.B. Diesel), Fronius-Energiezelle u.a.

Die operativ im Echtzeitbetrieb zu lösende Optimierungsaufgabe des Energiemanagement zur Sicherung der Nachhaltigkeit bzw. Energieeffizienz beim Betreiben der Infrastruktur eines Wohn- und Gewerbeparks besteht in folgendem:

Optimierungskriterium:

$$\int_0^T [G(e, v, t) + K(e, v, t)] dt \xrightarrow{e, v} \max \quad (1)$$

Nebenbedingungen:

$$\int_0^T k_r \left[ E_0(t) + \sum_{i=1}^N E_i(e_i, t) - \frac{1}{k_r} V_0(t) - \frac{1}{k_r} \sum_{j=1}^M V_j(v_j, t) \right] dt = S_r \geq 0 \quad (2)$$

$r=1,2,\dots,R$

Die verwendeten Bezeichnungen sind:

$E_j(e_j, t)$ ,  $V_j(v_j, t)$  – mathematische Modelle (Abhängigkeiten der erzeugten bzw. verbrauchten Energiemengen von den jeweiligen Steuergrößen und der Zeit) des  $i$ -ten Erzeugers bzw. des  $j$ -ten Verbrauchers

$E_0$ ,  $V_0$  – aus dem öffentlichen Netz entnommene Energiemenge bzw. in das öffentliche Netz eingespeiste Energiemenge

$G(e, v, t)$ ,  $K(e, v, t)$  – Gewinn aus der in das öffentliche Netz eingespeiste Energiemenge bzw. Kosten aus dem öffentlichen Netz entnommene Energiemenge

$e_j$  – Steuergröße des  $i$ -ten Erzeugers

$v_j$  – Steuergrößen des  $j$ -ten Verbrauchers

$e$  – Vektor der Steuergrößen der Erzeuger

$v$  – Vektor der Steuergrößen der Verbraucher

$S_r$  – im  $r$ -ten Speicher vorhandene Energiemenge

$T$  – Betrachteter Zeitraum des Energiemanagement (bis zu einem Jahr)

$k_r$  – Wirkungsgrad des Speichers ( $0 \leq k_r \leq 1$ )

$R$  – Gesamtanzahl der Speicher (Strom und Wärme)

Zur Optimierungsaufgabe (1) und (2) sind folgende Bemerkungen zu machen:

- Es handelt sich um eine Aufgabe der modellbasierten Vorwärtssteuerung. Für jeden Stromspeicher und für jeden Wärmespeicher wird eine Energiebilanz erstellt, die als Nebenbedingung der Optimierung fungiert. Die in den Nebenbedingungen enthaltenen mathematischen Modelle sind entweder einfache zeitabhängige algebraische Gleichungen (z.B. für Anlagen der Photovoltaik und Photothermie) oder die zeitabhängigen Lösungen von Systemen gewöhnlicher oder partieller Differentialgleichungen (z.B. für Anlagen der katalytischen drucklosen Verölung oder für Biogasanlagen).
- Für die Lösung der Optimierungsaufgabe werden auf dem Markt vorhandene vorgefertigte Module verwendet, die zu einem Lösungsalgorithmus konfiguriert werden.
- Das Energiemanagement wird für gekoppelte Strom- und Wärmenetze durchgeführt.
- Unter Steuergrößen eines Erzeugers verstehen wir erstens externe Steuergrößen (z.B. Rohstoffmenge/Zeiteinheit bei Biogasanlagen, Wärmemenge/Zeiteinheit bei thermoelektrischen Wandlern wie ORC, Stirling, Seebeck, Rotationskolbenmaschine) und zweitens interne Steuergrößen (z.B. Temperatur, Druck, Durchsätze).
- Unter Steuergrößen eines Verbrauchers verstehen wir solche internen Steuergrößen wie z.B. Drehzahlen, Sollwerte, Schaltzustände).
- Bei  $K(e, v, t) = 0$  haben wir es mit einer energieautonomen Lösung zu tun.

Neben den dargestellten mathematischen Methoden des Energiemanagements werden auch heuristische Methoden der Künstlichen Intelligenz in das Automatisierungs- und Steuerungssystem integriert, auf deren Darstellung aber an dieser Stelle verzichtet wird.

### **3 Automatisiertes Verfahren zur Herstellung von Dieselöl aus organischen Abfall- und Reststoffen basierend auf Technologien zur katalytischen drucklosen Verölung (KDV)**

#### *3.1 Ausgangssituation und Marktbedarf*

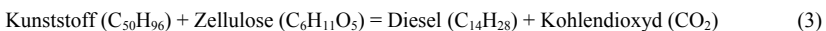
Energie aus nachwachsenden Rohstoffen sowie aus organischen Reststoffen der Abfallwirtschaft mit hohem Kohlenstoffgehalt durch neue innovative Technologien mit Modellcharakter verfügbar zu machen, stellt zunehmend eine Alternative zur Produktion von Energieträgern aus fossilen Ressourcen

dar. Das ist von besonderer Bedeutung bei der Sicherung der Energieautonomie im kommunalen Bereich.

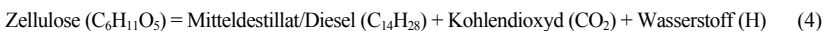
Um diese im gesamtstaatlichen Interesse liegende Forderung umzusetzen, ist ein neues dezentrales automatisiertes verfahrenstechnisches System zur Gewinnung von Dieselöl aus Haus- und Gewerbemüll sowie Kunststoff, Holz und Klärschlamm durch ein Konsortium aus Industrieunternehmen und wissenschaftlichen Einrichtungen entwickelt und in mehreren Anlagen im In- und Ausland erfolgreich getestet worden (vgl. Alphakat et al. 2015). Für dieses verfahrenstechnische System der katalytischen drucklosen Verölung (KDV) besitzt die Firma Alphakat GmbH ein Hauptpatent DE 100 49 377 und mehrere Patente der letzten Jahre. Diese KDV-Anlage wird in ein virtuelles Kraftwerk (Mikro grid) integriert, mit dem die vor Ort erzeugte Energie auch vor Ort genutzt werden kann. Teure Energietrassen entfallen. Gleichzeitig werden im Vergleich zu zentralen Energieerzeugungsanlagen die Transportkosten für die Input-Stoffe drastisch reduziert. Das Prinzip der Integration wurde im Abschnitt 2 bereits dargestellt.

Zentrale Elemente der KDV-Anlage sind ein Turbogenerator, welcher sich mit hoher Dynamik an Änderungen in der Wärmezufuhr anpassen kann, optimierte Katalysatoren, eine Kompakteinheit zur Substitution der bisherigen einzelnen Verfahreseinheiten zur katalytischen drucklosen Verölung und ein wissenschaftliches Mischungssystem für die Input-Stoffe (siehe Abb. 2). Das Inputmaterial soll aus regionalem Aufkommen an Siedlungsreststoffen generiert werden. Dies sind insbesondere Kunststoffe und Holz („gelber Sack“-Fraktionen, Holzschnitzel), Klärschlamm aus Kläranlagen, Braunkohlenstaub und gegebenenfalls weitere organische Reststoffe, die derzeit noch verklappt werden, wie z.B. Trester. Dazu sind neue Anlagenteile zur Materialkennung, Materialaufbereitung, Mischung, Dosierung und Prozesseinbringung zu entwickeln.

Im Turbogenerator laufen die tribochemischen katalytischen Reaktionen der Stoffumwandlung vor allem als Depolymerisation und Polymerisation ab. Die chemische Summgleichung der Depolymerisation ohne Beachtung der stöchiometrischen Koeffizienten lautet:



Die chemische Summgleichung der Polymerisation ebenfalls ohne Beachtung der stöchiometrischen Koeffizienten lautet:





Diese chemischen Gleichungen (3) und (4) bilden die Grundlage für die Erstellung des mathematischen Modells in Form von Material- und Energiebilanzgleichungen. Unter Nutzung des mathematischen Modells erfolgt dann die operative Prozessoptimierung, -stabilisierung und -sicherung als Beitrag zur Nachhaltigkeit.

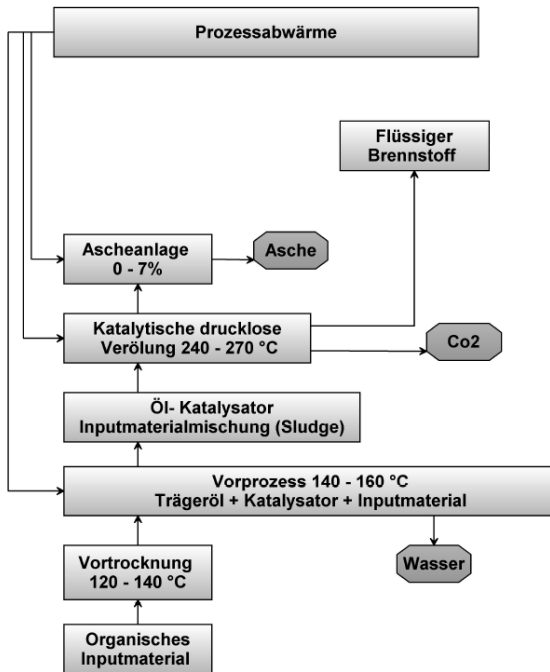


Abb. 2: Prinzipschema der Technologie zur katalytischen drucklosen Verölung

Eigene Darstellung

Es wird ein neuartiges Steuerungs- und Regelungssystem sowohl für die Leitebene als auch für die Feldebene entwickelt. Die Abwärme wird innerhalb der Anlage genutzt. Dadurch wird eine höhere Wirtschaftlichkeit und Effizienz des Prozesses erreicht. Gleichzeitig muss aber auch beachtet werden, dass das optimale Betriebsregime der Anlage in der Nähe der Stabilitätsgrenze liegt. Es ist deshalb notwendig, dass mit Hilfe der Automatisierungssysteme ein entsprechender Sicherheitsabstand zur Stabilitätsgrenze

eingehalten wird. Die Gesamtanlage wird in ihrer Größe so konzipiert, dass mit ihr ein regionaler Wertstoff- und Wirtschaftskreislauf durchgeführt werden kann. Die Inputmaterialien werden aus regionalem Aufkommen generiert und das Endprodukt Diesel kann sowohl in einem BHKW zur Erzeugung von Regelenergie als auch in der Region in Industrie und Landwirtschaft verwendet werden. Dadurch können Umweltbelastungen durch Transporte minimiert werden.

Für die Integration von KDV-Anlagen in das automatische Energiemanagement in virtuellen Kraftwerken für Gewerbe- und Wohngebiete sind insbesondere folgende Aufgaben zu lösen:

- Modellierung und optimale Auslegung der KDV-Anlagen mit dem Ziel, durch die Erhöhung der Zuverlässigkeit, Flexibilität und Steuerbarkeit der Anlagen Regelenergie bereit zustellen;
- Untersuchungen zum Einfluss des Katalysatortyps und Prozessbedingungen auf die katalytische Verölung von individuellen biogenen und polymeren organischen Reststoffen und deren Gemischen;
- Entwurf eines modellbasierten Prozessführungssystems für die KDV-Anlagen mit standardisierten Schnittstellen zum Energiemanagementsystem;
- Bestimmung der dynamischen und statischen Vorgaben bzw. Sollwerte für die Steuerung der KDV-Anlagen (Requirement-Engineering) unter Beachtung der Anforderungen an die Energieversorgung für Gewerbe- und Wohngebiete sowie der Quantität und Qualität der zur Verfügung stehenden Input-Stoffe.

Das neue verfahrenstechnische System besitzt folgende Alleinstellungsmerkmale:

- Hohe Kraftstoffausbeute bezogen auf die verwendeten Einsatzstoffe;
- keine Erzeugung von Dioxinen oder Furanen durch Betrieb bei Temperaturen unterhalb der Pyrolysetemperatur;
- Umsetzung unter Normaldruckbedingungen;
- flexibler und modularer Betrieb der Anlage sowohl mit biogenen als auch mit mineralischen und synthetischen Abfallstoffen oder Mischungen derselben;
- die geringen Totzeiten und Zeitkonstanten der Steuerkanäle gestatten die Erzeugung von Regelenergie für virtuelle Kraftwerke auch ohne zusätzliche Speicherkapazität für den Kraftstoff; die Speicherkapazität kann damit optimiert werden;

- Inputstoffe können Altöle, Fettrückstände, Plastikmaterial einschließlich PVC, Gummireifen, sortierter Müll einschließlich Krankenhausmüll, Klärschlämme etc. sein.

### 3.2 Modellbasierte Prozessführungssysteme für die KDV-Anlage

Die notwendigen Elemente bei der Lösung der Automatisierungsaufgaben führen dazu, dass die Struktur des Automatisierungs- und Steuerungssystems der KDV-Anlage eine zweistufige Hierarchie besitzt (siehe Abb. 3). Dazu wurde im Rahmen eines EU-Forschungsprojektes die Konzeption für „Virtual Automation Networks (VAN)“ entwickelt, in dem sowohl öffentliche und private als auch industrielle Kommunikationstechnologien zu einem einzigen skalierbaren System mit einer im Idealfall garantierten Dienstgüte (Quality of Service – QoS) integriert werden kann (VAN enabled; vgl. VAN 2009).

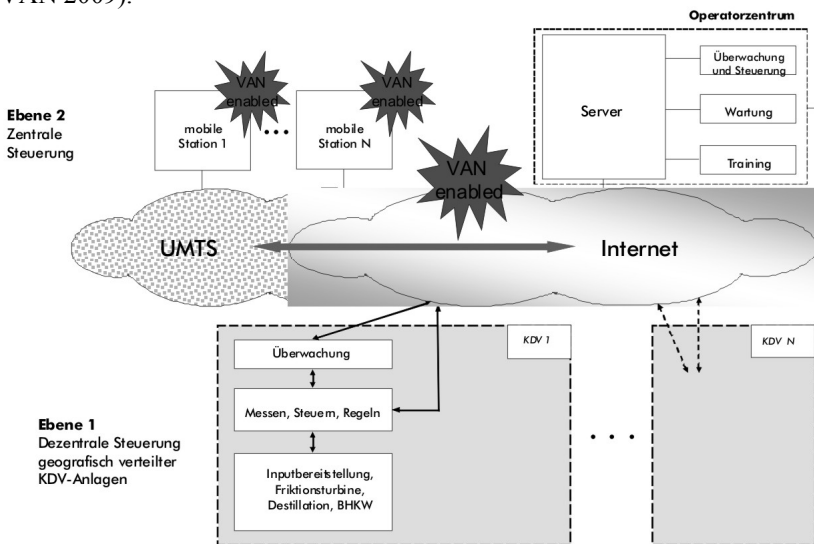


Abb. 3: VAN-basierte Automatisierungsstruktur geografisch verteilter KDV-Anlagen

Eigene Darstellung

Die praktischen Vorteile und damit die Nachhaltigkeit der zentralen Steuerung und Wartung dezentraler technologischer Anlagen mit Hilfe eines Operatorzentrums sind:

- Know-how eines Operators oder Wartungsingenieurs ist für viele Anlagen ohne Zeitverzögerung für die Lösung von Prozessführungsaufgaben einsetzbar;
- ein modellgestütztes Prozessführungssystem ist für viele Anlagen einsetzbar;
- die Kosten für die zentrale Leittechnik werden durch die Anzahl der dezentralen Anlagen geteilt;
- Integration eines Trainingssimulators in die zentrale Leittechnik (e-Learning) ist möglich;
- der geschätzte ökonomische Nutzen bei der Steuerung von KDVi-Anlagen beträgt unter Beachtung der Erfahrungen in der Verfahrenstechnik (z.B. Abfallwirtschaft, Nutzung erneuerbarer Energien) eine etwa dreißigprozentige Gewinnerhöhung.

#### **4 Wissensbasierte automatisierte Restwärmenutzung zur Stromerzeugung**

##### *4.1 Internationaler Stand bei der Restwärmenutzung zur Stromerzeugung*

Es geht in diesem Fall um einen neuen Ansatz zur Erhöhung der Energieeffizienz. Die bei vielen industriellen Prozessen anfallende „Abwärme“ bzw. „Restwärme“ in Form von thermischer Energie auf aus energietechnischer Sicht niedrigem Temperaturniveau ( $< 300^{\circ}\text{C}$ , im Weiteren „Niedertemperaturwärme“ genannt) soll für die Elektroenergiegewinnung nutzbar gemacht werden. Auch im 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung wird gefordert, dass die Abwärme von thermischen Prozessen mittels Umwandlung in elektrische Energie zu einer alternativen Energiequelle werden sollte. Um Technologien für die Nutzbarmachung immer niedriger temperierter „Abwärme“ letztlich als Produkt erfolgreich platzieren zu können, benötigt man einen innovativen Ansatz und eine kostengünstige Lösung mit verbesserten technischen Parametern.

Ausgehend von dieser Einschätzung wurde die Patentanmeldung beim DPMA mit dem Aktenzeichen 10 2013 104 868.4 „Anordnung und Verfahren zur Umwandlung von Niedertemperaturwärme in mechanische Energie“ als aussichtsreicher Ansatz für die Entwicklung einer neuen Variante zur Gewinnung von Elektroenergie aus Niedertemperaturwärme identifiziert.

Laut Patentbeschreibung besteht die Aufgabe der Erfindung in einer effizienten Umwandlung von Niedertemperaturwärme in mechanische bzw. elektrische Energie. Insbesondere sollen die Kondensationswärme in Kraft-

werken, Abwärme und solar erzeugte Wärme als Energiequelle zu Bereitstellung mechanischer Energie genutzt werden können.

Das Verfahren zur Umwandlung von Niedertemperaturwärme in mechanische Energie arbeitet mit einem gasförmigen Arbeitsmittel – vorrangig verdichteter Außenluft. Dazu wird von einer Wärmequelle Wärme mittels Wärmeübertrager auf das verdichtete Gas, insbesondere Luft, übertragen. Dabei dehnt sich das Gas aus, was zu einer Volumenvergrößerung und/oder Druckerhöhung des Gases führt. Nachfolgend wird das erwärmte Gas in einer Kraftmaschine entspannt und dabei mechanische Arbeit zur Erzeugung elektrischer Energie verrichtet.

Auf dem Markt bisher vorhandene Lösungen mit ihren Vor- und Nachteilen sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tab. 1: Vergleich vorhandener Technologien

Vorhandene Lösungen	Vorteile	Nachteile
<i>Entspannung von Wasserdampf in Turbinen (Siemens)</i>	erprobte und robuste Technologie insbesondere für große Leistungen	hohe Eingangstemperaturen erforderlich, kostenintensive Technik
<i>Thermisch angepasste Kreisprozesse (ORC)</i>	bei vergleichsweise niedrigen Systemdrücken an verschiedene Temperaturniveaus anpassbar	systembedingt vergleichsweise niedriger Wirkungsgrad bei relativ hohen Investitionskosten
<i>Stirlingmaschinen</i>	übersichtliches Aggregatekonzept durch äußere Wärmezu- und abführung	technologische Probleme beim konkreten Aufbau und Betrieb, derzeit Beschränkung auf Leistungen unter 100 kW

Eigene Darstellung

Von den bereits existierenden Verfahren der Restwärmenutzung zur Stromerzeugung (Entspannung von Wasserdampf in Turbinen der Firma Siemens, thermisch angepasste Kreisprozesse ORC, Stirlingmaschinen) ist auf Grund der geforderten hohen Eingangstemperaturen der Wärmeträger und der Beschränkungen der Leistungen nur der ORC-Prozess ein echter Wettbewerber der neuen Lösung. Gegenüber dem ORC-Prozess hat die neue Lösung folgende Vorteile:

- Niedrige relative Investitionskosten (neue Lösung 3.000 € pro KW erzeugter elektrischer Leistung, ORC 4.900 € pro KW erzeugter elektrischer Leistung);
- Nutzung der Luft als Arbeitsmedium führt zu höherem Wirkungsgrad (ORC ca. 10%, neue Lösung ca. 14%); Gründe für den hohen Wirkungsgrad der neuen Lösung sind offener Kreislauf ohne Kühlung des Arbeits-

- mediums, keine Änderung des Aggregatzustandes des Arbeitsmediums im Arbeitsbereich;
- die Anlage zur Restwärmenutzung verfügt über zwei intelligente Schnittstellen, die eine operative Anpassung an die sich ändernden Bedingungen beim Produzenten der Restwärme und beim Elektroenergiesystem durchführen.

Technische Basis der oben genannten zwei Schnittstellen ist ein neuartiges dreistufiges Prozessführungssystem. Durch dieses System erfolgt eine operative Änderung der Sollwerte in Abhängigkeit von den Störgrößen und von den geänderten Zielfunktionen. Bei einer geschätzten Zeitkonstante der Steuerkanäle von ca. 50 Minuten und der Störkanäle von ca. 60 Minuten ist durch eine operative Prozessoptimierung eine Erhöhung der Stromausbeute um ca. 30% zu erwarten. Das neue System der Restwärmenutzung wird also in einem dynamischen Regime betrieben, während die auf dem Markt vorhandenen Systeme in einem stationären Regime betrieben werden.

#### *4.2 Konzept der Umwandlung der Restwärme in elektrische Energie*

Auch in diesem Fall wurde ein Konsortium aus Industrieunternehmen und wissenschaftlichen Einrichtungen gebildet, das ein Konzept entwickelt hat zur Umwandlung der Restwärme in elektrische Energie auf der Basis des oben genannten Patentes (vgl. ILK et al. 2016). In einem Heizkraftwerk soll dieses Konzept prototypisch umgesetzt werden. Weitere Anwendungen zur Nutzung der Abwärme bzw. Restwärme in Destillationskolonnen, in BHKW, Biogasanlagen u.a. sind denkbar.

Erhebliche Mengen an Niedertemperatur-Abwärme fallen in konventionellen Heizkraftwerken an. Dort wird durch die Verbrennung von Rohbraunkohle Elektroenergie und Wärmeenergie erzeugt. Mit der Wärme kann ein großer Teil einer Stadt mit Heizwärme und Warmwasser versorgt werden.

In einem abgeschlossenen System der Energieumwandlung wird zunächst im konventionellen Dampfturbinenprozess Dampf erzeugt, um eine Turbine für die Elektroenergie-Erzeugung anzutreiben. Nachdem der Dampf die Turbine verlassen hat, ist dieser entspannt und muss kondensiert werden. Dazu wird der Dampf durch einen Wärmetauscher geleitet, der das Wasser der Heiztrasse für die Wärmeversorgung aufheizt. Dem Dampf wird die Energie entzogen, er kondensiert und kann wieder erhitzt werden, um ihn erneut als Dampf der Turbine zuzuführen. Damit gestaltet sich die Erzeugung von Elektroenergie abhängig von der Möglichkeit, den entspannten Dampf kondensieren zu lassen, mit anderen Worten: eine energieeffiziente

Produktion von Elektroenergie ist nur möglich, wenn ausreichend Heizwärme abgenommen wird.

Um diesem Zustand abzuhelpfen und die Elektroenergieerzeugung kontinuierlich und unabhängig von den Jahreszeiten gestalten zu können, soll eine Anlage entwickelt werden, die als Regelungs- bzw. Ausgleichselement in diesem Prozess fungiert und dabei idealerweise noch weitere Elektroenergie erzeugen kann. Mit der zu entwickelnden Anlage könnten sowohl die Dampferzeugung als auch die Erzeugung von Elektroenergie erheblich verstetigt werden. Wird im Wärmetauscher eine zu geringe Temperaturdifferenz zwischen abgegebenem und rückgeführtem Dampf erreicht, wird ein Teil des Dampfes umgeleitet und durch das zu schaffende Regelungselement dem Dampf Wärme entzogen. Die Abbildung 4 ist eine konkrete Untersetzung dieser Lösungsprinzips unter Nutzung von Rotationskolbenmaschinen.

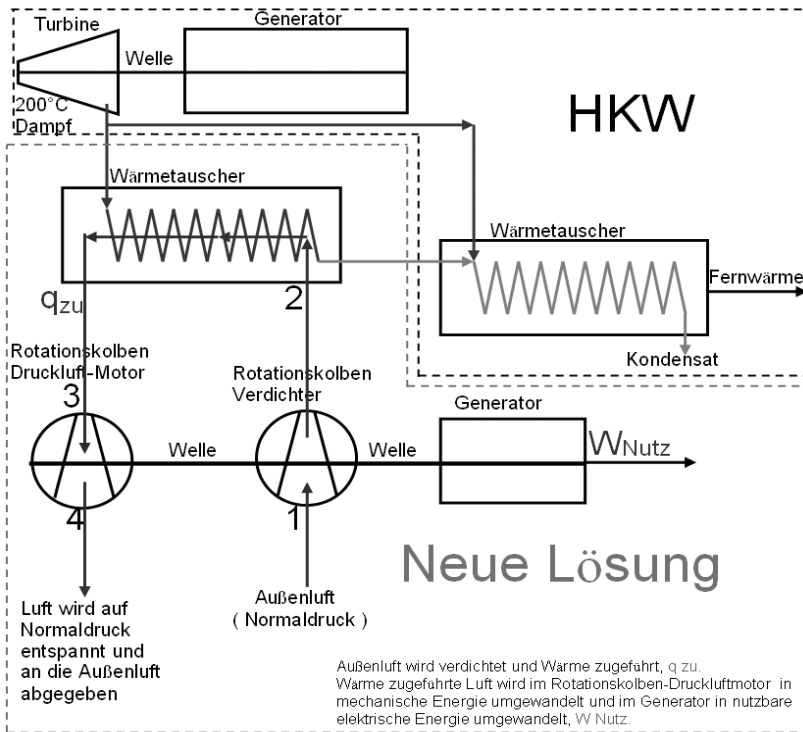


Abb. 4: Lösungsprinzip am Beispiel eines Heizkraftwerkes (HKW)

Quelle: nach ILK et al. 2016

Der Motor und der Verdichter sind mit einer starren Welle verbunden. Es ist die Frage zu beantworten, wie hoch der zu erwartende Wirkungsgrad bzw. die Machbarkeit der Anlage zur Restwärmenutzung ist. Zu diesem Zweck wurde der zugrunde liegende Kreislaufprozess thermodynamisch analysiert. Den entsprechenden Prozessverlauf (Übergänge zwischen vier thermodynamischen Zuständen) zeigt Abbildung 5.

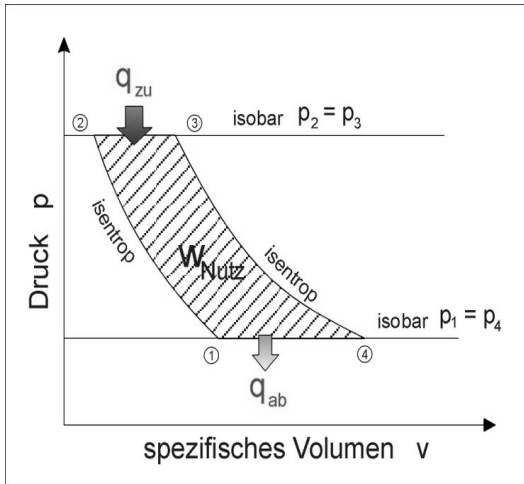


Abb. 5: Prozess der Gewinnung technischer Arbeit

Quelle: nach ILK et al. 2016

Um die im Prozess der Restwärmenutzung gewonnene Arbeit zu ermitteln, betrachten wir die Übergänge zwischen den in Abbildung 5 dargestellten Zuständen. Für die thermischen und energetischen Abschätzungen wurden folgende Prozessberechnungen durchgeführt, die im Einzelnen aus Platzgründen aber nicht dargestellt werden sollen:

*Isentrope Kompression* ① → ②

Die Verdichtungsendtemperatur  $T_2$  nach der isentropen Kompression berechnet sich aus der Eintrittstemperatur  $T_1$ .

*Isobare Erwärmung* ② → ③

Die isobare Erwärmung der komprimierten Luft erfolgt in einem Wärmetauscher, der einen Teil der Abwärme  $q_{zu}$  an die komprimierte Luft überträgt.



*Isentrope Expansion* ③ → ④

Die Endtemperatur nach der isentropen Expansion  $T_4$  berechnet sich analog wie bei der isentropen Kompression aus der Anfangstemperatur der Expansion  $T_2$ . Aus der Differenz der Anfangs- und der Endtemperatur, der isochoren spezifischen Wärmekapazität und dem Expander-Wirkungsgrad berechnet sich die spezifische Abtriebsarbeit des Expanders  $q_{ab}$ .

Eine erste Systemanalyse des zu schaffenden Gesamtsystems hat gezeigt, dass die Prozessführung bzw. Steuerung der neuen Anlage zur Restwärmeeinnahme nach verschiedenen Zielfunktionen in Abhängigkeit von den sich dynamisch ändernden energetischen und wirtschaftlichen Anforderungen an das Heizkraftwerk zu erfolgen hat:

- Erzeugte Elektroenergiemenge/Zeiteinheit;
- zugeführte Dampfmenge/Zeiteinheit;
- kombinierte Zielfunktion (gewichtete Zielfunktionen): erzeugte Elektroenergiemenge/Zeiteinheit und zugeführte Dampfmenge/Zeiteinheit.

Dabei sind folgende technologische Größen bzw. Parameter automatisiert zu erfassen, zu verarbeiten und zu optimieren:

- Steuergrößen:
  - Durchsatz der Luftmenge/Zeiteinheit am Eingang in den Wärmetauscher;
  - zugeführte Dampfmenge/Zeiteinheit (kann auch Zielfunktion sein).
- Regelgrößen:
  - Temperaturfeld des Wärmetauschers (neues Prinzip: Regelung nach dem Temperaturfeld);
  - Drehgeschwindigkeit der Welle.
- Störgrößen:
  - Variation der Sollwerte für die zu erzeugende Fernwärmemenge/Zeiteinheit;
  - Variationen der Außenlufttemperatur;
  - Variationen der Zielfunktion;
  - Variationen der Nebenbedingungen.
- Nebenbedingungen bzw. einzuhaltende Vorgaben:
  - Erzeugte Fernwärmemenge/Zeiteinheit unter Beachtung der kritischen Unterbrechungszeiten;
  - vollständige Kondensierung des Dampfes am Ausgang aus dem Wärmetauscher des HKW;

- Begrenzung der Änderungsgeschwindigkeiten der zugeführten Dampfmenge nach der Zeit und der produzierten Elektroenergiemenge nach der Zeit.

Aus der Beschreibung der Prozessführungsaufgabe geht hervor, dass zwei intelligente Schnittstellen zu entwickeln sind:

- Schnittstelle zwischen Restwärmeproduzent (Heizkraftwerk) und der neuen Lösung mit dem Ziel der Bestimmung und Einstellung der zugeführten Wärmemenge/Zeiteinheit;
- Schnittstelle zwischen dem Generator der neuen Lösung und dem Elektroenergiesystem, das die erzeugte Elektroenergie aufnimmt.

Diese Prozessführungsaufgabe wird mit einem Steuerungssystem mit drei Hierarchieebenen gelöst (siehe Tab. 2). Die Struktur dieses Steuerungssystem ist ähnlich der Struktur des VAN-basierte Systems in Abbildung 3.

Tab. 2: Beschreibung der Prozessführungsaufgaben

Ebene	Informationsverarbeitungs-Algorithmus	Bemerkungen
1. <b>Stabilisierung der Steuergrößen</b>	eindimensionale Festwertregelkreise mit linearen Reglern	Einsatz von Standardkomponenten möglich
2. <b>Bestimmung der Sollwerte für die Regelgrößen</b>	neuartige Steuerung des Wärmetauschers nach dem Temperaturfeld, mehrdimensionale nichtlineare Regelungssysteme, Beachtung der Nebenbedingungen bei der Optimierung der Sollwerte	keine Standardsysteme vorhanden, mathematische Modellierung der Dynamik des Wärmetauschers notwendig
3. <b>Auswahl der Zielfunktion und der Nebenbedingungen</b>	Nutzung von Elementen der künstlichen Intelligenz, Modellierung des Gesamtsystems Heizkraftwerk – Neues System	keine Standardlösungen vorhanden

Eigene Darstellung

Ohne dieses Steuerungssystem kann die neue Lösung nicht betrieben und nicht auf dem Markt angeboten werden, da die Stabilität des Gesamtsystems und die geforderten Parameter nicht eingehalten werden können. Das ist vor allem auf Folgendes zurückzuführen:

- Die Zielfunktionen und die Nebenbedingungen sind nicht stationär, sondern stark zeitabhängig. Eine Nachführung muss zeitoptimal und mit hoher Genauigkeit erfolgen.
- Die Prozessgrößen „Durch den Verdichter transportierte Luftmenge pro Zeiteinheit“ und „Drehzahl der Welle“ besitzen eine positive Rückkopplung, was zu Instabilitäten führen kann.

- Die beiden Wärmetauscher (Neue Lösung und HKW) sind technologisch in Reihe geschaltet. Das führt zu bedeutenden Totzeiten und Zeitkonstanten der Übertragungskanäle „Eingang in den neuen Wärmetauscher – Ausgang aus dem HKW-Wärmetauscher“. Um der Steuerung vorausschauenden Charakter zu verleihen, wird als Regelgröße nicht, wie allgemein üblich, die Temperatur am Ausgang des Wärmetauschers, sondern das Temperaturfeld über die Länge des Wärmetauschers benutzt. Nach dem gleichen Prinzip wird der Sollwert für diese Regelgröße berechnet.

#### **4 Zusammenfassende Bemerkungen**

Die dargestellten Beispiele neuer technologischer Lösungen zur Erhöhung der Energie- und Ressourceneffizienz zeigen die enge Beziehung zwischen Nachhaltigkeit und Automatisierung. Wenn eine technologische Lösung nachhaltig sein soll, muss sie optimal, stabil und sicher sein. Man könnte den Begriff „Nachhaltigkeit“ auch durch den Begriff „Kontinuierliche Optimalität“ ersetzen, wie das bereits im russischen Sprachraum erfolgt ist. Automatisierungs- und Steuerungssysteme sichern die Optimalität und Stabilität der technologischen Lösung. In der Verfahrens- und Fertigungstechnik haben wir seit langem schon die Tendenz zu verzeichnen, dass der optimale Betriebspunkt in der Nähe der Stabilitätsgrenze liegt. Das stellt verständlicherweise erhöhte Anforderungen an die Automatisierung, wie wir besonders im zweiten Beispiel gesehen haben.

Energieeffiziente Lösungen besitzen oft innere positive stoffliche und energetische Rückführungen. Das führt zur strukturellen Instabilität des Gesamtsystems, was im dritten Beispiel deutlich wurde. In diesen Fällen ist eine informationelle Rückführung durch ein Automatisierungssystem eine unbedingte Voraussetzung für ein sicheres Betreiben des Gesamtsystems.

Nachhaltige automatisierte technologische Lösungen erfordern in der Regel eine mathematische Modellierung des technologischen Systems bzw. des Steuerungsobjektes. Das mathematische Modell geht als Nebenbedingung in die Optimierungsaufgabe ein. Gleichzeitig wird das Modell für die Simulation des technologischen Systems benutzt. Das erste Beispiel macht diese Herangehensweise deutlich.

## Literatur

- Alphakat, Vesper, Aumos, TUD (2015): Automatisierte Anlage zur katalytischen drucklosen Verölung. Unveröffentlichte Projektbeschreibung
- Balzer, D. (2016): Die gegenwärtige und zukünftige Rolle der Automatisierungs- und Kommunikationstechnik in der Sicherheitswirtschaft. In: Oleksiewicz, I.; Stepień, K. (red.): Zagrozenia i wyzwania bezpieczeństwa współczesnego świata. Wymiar ekonomiczno-społeczny [Bedrohungen und Herausforderungen der Sicherheit in der modernen Welt. Die ökonomische und soziale Dimension]. Warszawa, S. 229–243
- Balzer, D.; Thierse, P. (2014): Überwachung und Steuerung technologischer Prozesse und Systeme. In: Banse, G.; Reher, E.-O. (Hg.): Beiträge zur Allgemeinen Technologie. Berlin, S. 205–262 (Abhandlungen der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 36)
- EnergieAutark, ILK, Vesper, Zesys (2016): Wissensbasiertes Energiemanagement für autonome Wohn- und Gewerbeparks. Unveröffentlichte Projektbeschreibung
- ILK, Kunz, GAD (2016): Restwärmenutzung unter Verwendung einer Rotationskolbenmaschine. Unveröffentlichte Projektbeschreibung
- VAN (2009): EU-R&D-Project “Virtual Automation Networks (VAN)”. Deliverable D09.2-1