

Dietrich Balzer, Friedrichsthal

## **Gemeinsamkeiten und Unterschiede von TRIZ, künstlicher Intelligenz und Kybernetik als wissensbasierte Methoden für die Lösung technischer Probleme**

### **1. Einleitung**

Eine vergleichende Analyse von TRIZ (Teoria reschenija isobretatelskich zadač – Lösung von Erfindungsaufgaben), Künstlicher Intelligenz (KI) und Kybernetik ist bis heute nur in Ansätzen durchgeführt worden. So hat zum Beispiel G.V. Sokolov vom „Institut für Systeme der Informatik“ der sibirischen Abteilung der russischen Akademie der Wissenschaften in Novosibirsk unter der Überschrift „Theorie der Entscheidungsfindung“ eine Darstellung verschiedener systemtheoretischer Methoden einschließlich TRIZ vorgenommen ohne allerdings eine vergleichende Analyse durchzuführen, vgl. [Sokolov 2015]. Zu erwähnen ist in diesem Zusammenhang auch die Darstellung von V. Petrov, der über die Technische Kybernetik zu TRIZ gelangt ist und der zu Fragen der „Innovationstechnologie“ eine zusammenfassende Darstellung vorgelegt hat, allerdings auch ohne die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Innovationstechnologien zu untersuchen, vgl. [Petrov 2014].

Während die gemeinsame wissensbasierte Herangehensweise für TRIZ, Künstliche Intelligenz und Kybernetik charakteristisch ist, bestehen andererseits wesentliche Unterschiede, wie aus Tabelle 1 zu entnehmen ist.

Es liegt auf der Hand, dass ein Informations- und Erfahrungsaustausch zwischen den Vertretern der drei Disziplinen für alle von Nutzen sein könnte. Der vorliegende Beitrag soll ein praktischer Schritt in diese Richtung sein. Im Weiteren werden folgende Probleme behandelt:

- Gegenstand der Kybernetik und der Künstlichen Intelligenz vom Standpunkt einer Kooperation mit TRIZ.
- Zwei praktische Beispiele von wissensbasierten Systemen, deren Betrieb mit Hilfe von TRIZ verbessert werden konnte.

	<b>Inhalt des Lösungsprozesses</b>	<b>Dynamik des Lösungsprozesses</b>	<b>Technische Umsetzung</b>
<b>TRIZ</b>	Widersprüche als dialektisches Prinzip, ca. 40 innovative Grundprinzipien (Zerlegung, Integration, Rückkopplung u.a.)	keine Echtzeitfähigkeit	Rechnergestützte Offline-Lösung mit dem Ziel einer Erfindung (CAI)
<b>Künstliche Intelligenz</b>	Phänomenologische (Experten- und Fuzzysysteme) und biologische (neuronalen Netze) Nachbildung des menschlichen Denkprozesses	Echtzeitfähigkeit möglich	In Automatisierungs- und Steuerungssysteme integrierbar mit dem Ziel einer Systemoptimierung, enge Beziehung zur technischen Kybernetik
<b>Kybernetik</b>	Informationsgewinnung, -verarbeitung und -nutzung, online-Kopplung mit dem Steuerungsobjekt	Echtzeitfähigkeit unbedingt notwendig	Prozessleitsysteme, Nutzung virtueller Automatisierungsnetze

**Tabelle 1:** Vergleich von TRIZ, Künstlicher Intelligenz und Kybernetik (Eigene Darstellung)

- Methodik der mathematischen Modellierung zur Gewinnung von Tiefenwissen.
- Gegenseitiger Nutzen aus der Kooperation von TRIZ, künstlicher Intelligenz und Kybernetik.

Auf eine zusätzliche Darstellung der vom sowjetischen Wissenschaftler Genrich Saulovitch Altschuller entwickelten TRIZ-Theorie wird an dieser Stelle verzichtet. Es wird in diesem Zusammenhang auf die große Anzahl von Vorträgen auf der 21. Leibnizkonferenz des LIFIS am 24. und 25. November 2016 in Lichtenwalde zu TRIZ und seiner Anwendung<sup>1</sup> hingewiesen. Diese Vorträge werden bzw. wurden bereits in LIFIS online veröffentlicht. Zusätzlich sei darauf hingewiesen, dass vor kurzem ein Artikel über den Lebensweg von Altschuller als Forscher und Hochschullehrer anlässlich seines 90. Geburtstages veröffentlicht wurde, vgl. [Gorelik 2016].

Die beiden oben genannten praktischen Beispiele beziehen sich auf erfinderische Problemstellungen in der Prozessindustrie (Katalytische drucklose Verölung mit Sauerstoffinjektion, Nutzung von Restwärme zur Stromerzeugung) durch eine Kooperation von TRIZ, Künstlicher Intelligenz und Kybernetik mit dem Ziel einer Patentanmeldung. Dabei wird

<sup>1</sup> Siehe <http://leibniz-institut.de/konferenzen>.

über die Erfahrungen berichtet, die zwei Konsortien aus dem EuReffuS-Netzwerk<sup>2</sup> bei der Planung und teilweise bereits bei der Realisierung automatisierter nachhaltiger Lösungen gesammelt hat.

## 2. Gegenstand der Kybernetik und der Künstlichen Intelligenz vom Standpunkt einer Kooperation mit TRIZ

Die Aufgaben der Kybernetik sind in Tabelle 2 zusammenfassend beschrieben. Auf eine Darstellung der Prozessüberwachung als selbstständige Prozesssteuerungsaufgabe wird an dieser Stelle verzichtet, da das eigentliche Ziel der Kybernetik in der zielgerichteten Beeinflussung des Steuerungsobjektes im Sinne der Prozesssicherung, -stabilisierung und -optimierung besteht.

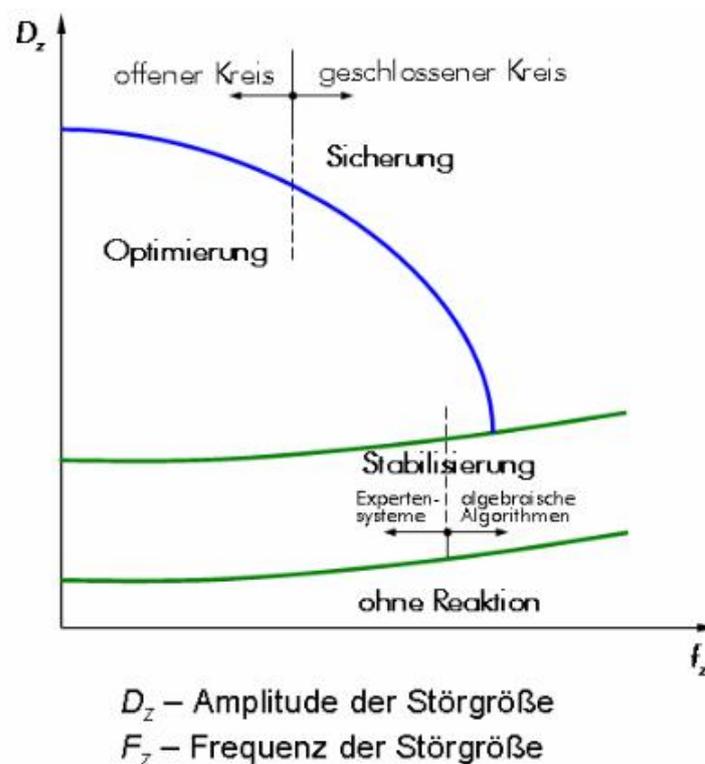
Steuerungsfunktion	Verbale Erläuterung des Inhaltes	Typische technische Lösungen
<b>Prozesssicherung</b>	Alarmierung, Notabschaltung bei Gefahrenzuständen, Verwirklichung von Abwehrstrategien, Verhinderung von Fehlbedienungen	Sicherheits- und Schutzverriegelungssysteme, Abfahrsteuerungen auf Basis schaltungsprogrammierter Steuerungstechnik, intelligente vorbeugende Prozesssicherung
<b>Prozessstabilisierung</b>	Automatische Kompensation von Störungsauswirkungen, dynamische Entkopplung von Teilsystemen	Regelsysteme, intelligente Prozesskoordinierung
<b>Prozessoptimierung</b>	Bestimmung und Einstellung optimaler Betriebsregime (Arbeitspunkte) Bestimmung und Realisierung optimaler Übergangsvorgänge (Umstellen, Anfahren usw.)	Einsatz von Optimierungsalgorithmen

**Tabelle 2:** Steuerungsfunktionen als Aufgaben der Kybernetik (Eigene Darstellung)

Die Methoden der Kybernetik basieren auf der Einheit von Steuerungssystem und Steuerungsobjekt. Aus diesem Grund werden auch die Aufgaben des Steuerungssystems durch eine vergleichende Analyse der Amplitude und der Frequenz der auf das Steuerungsobjekt einwirkenden Störgrößen bestimmt (siehe Abbildung 1). Darüber hinaus zeigt die

<sup>2</sup> Siehe <http://www.eureffus.com>.

Abbildung 1, dass mit sinkender Frequenz der Störgrößen ein Einsatz von Systemen der künstlichen Intelligenz (Expertensysteme) sinnvoll ist. Die gleiche Aussage trifft auch auf den Einsatz von TRIZ-Methoden und auf den Einsatz des Menschen als Regler (Offener Kreis) zu.



**Abbildung 1:** Ableitung von Steuerungsaufgaben (Eigene Darstellung)

Bei der Darstellung der Methoden der Künstlichen Intelligenz gehen wir davon aus, dass in erster Linie echtzeitfähige Expertensysteme für die Prozesssteuerung zum Einsatz kommen, deren Grundstruktur seit 1992 Bestand hat und auf Abbildung 2 gezeigt wird, vgl. [Balzer et al. 1992]. Der Entwickler und der Benutzer des Expertensystems ist oft ein und dieselbe Person.

In Tabelle 3 werden die Funktionen der Komponenten des auf Abbildung 2 dargestellten Expertensystems erläutert.

Die online erfassten Prozessdaten der zu steuernden und zu beobachtenden technologischen Anlage werden als fallspezifisches Faktenwissen in die Wissensbasis übertragen. Das anwendungsspezifische Expertenwissen besitzt folgende Wissensformen:

- *Assoziatives Oberflächenwissen* als logische Beziehungen zwischen Prozessmerkmalen und Schlussfolgerungen in Form von Regeln: Symptome – Situationen, Situationen – Steuerungen, Steuerungen – Wirkungen);

**Grundarchitektur von Expertensystemen**

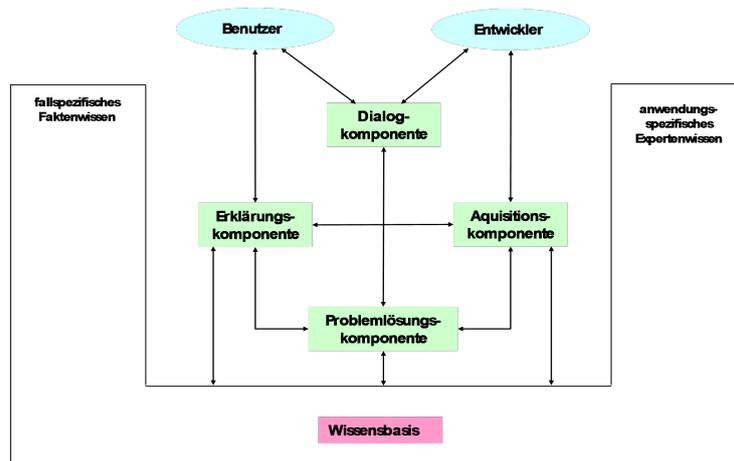


Abbildung 2: Echtzeitfähige Expertensysteme zur Lösung von Steuerungsaufgaben, vgl. [Balzer et al. 1992].

Grundkomponente	Grundfunktion	Erläuterung
Wissensbasis	Wissensrepräsentation	enthält das anwendungsspezifische Wissen
Problemlösungs-komponente	Wissensmanipulation	beruht auf Theorien und Strategien zur Lösung von Aufgaben in bestimmten Problemklassen
Akquisitions-komponente	Wissensakquisition	unterstützt den Experten bei der Entwicklung von Wissensbasen
Erklärungs-komponente	Erklärung	erklärt dem Entwickler bzw. Nutzer einen Lösungsweg
Dialogkomponente	Dialog	kommuniziert mit dem Entwickler bzw. Nutzer

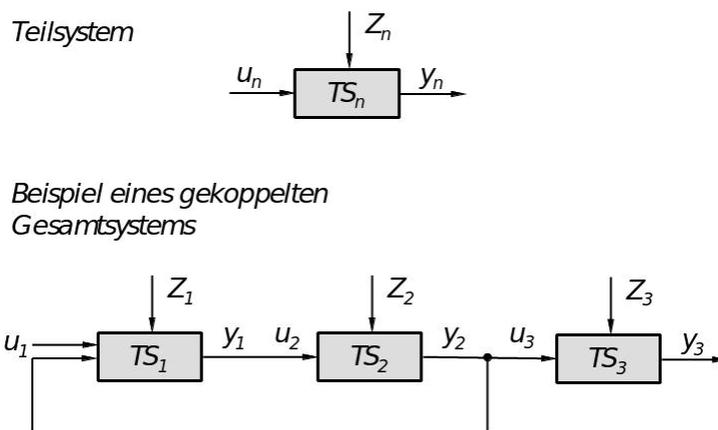
Tabelle 3: Erläuterung der Funktionen des Expertensystems (Eigene Darstellung)

- *Qualitatives Tiefenwissen* als relationale Modelle der Struktur (Abstraktion, Aggregation, Kopplung, Sicht) und Funktion (Kausalketten, Normalverhalten, Fehlverhalten) von Steuerungsobjekt und Steuerungssystem;
- *Quantitatives Tiefenwissen* als analytische Modelle des Systems (Mathematische Modelle für die Beschreibung von Übertragungsverhalten und Zustandsverhalten).

Dieses Wissen spielt bei einer Kooperation mit TRIZ-Methoden eine wichtige Rolle. Während das Oberflächenwissen in der Regel aus Erfahrungen des Betreibers der Anlage abgeleitet wird, stellt das Tiefenwissen das Ergebnis einer mathematisch-naturwissenschaftlichen Analyse des Steuerungsobjektes dar.

Ein Beispiel für assoziatives Oberflächenwissen bezogen auf die Steuerung der im Punkt 3 beschriebenen KDV-Anlage ist:

*Wenn* Temperatur in der Friktionsturbine höher als 250 Grad Celsius,  
*dann* Drehzahl herabsetzen *und* Sauerstoffzufuhr reduzieren.



**Abbildung 3:** Beispiel für qualitatives Tiefenwissen (Eigene Darstellung).  
 $z_n$  – Vektor der Störgrößen,  $u_n$  – Vektor der Steuergrößen,  $y_n$  – Vektor der Ausgangsgrößen

Abbildung 3 zeigt als allgemeines Beispiel für qualitatives Tiefenwissen die Struktur eines aus 3 Teilsystemen bestehenden Gesamtsystems. Der Punkt 4 enthält Beispiele für quantitatives Tiefenwissen ebenfalls bezogen auf die im Punkt 3 dargestellte KDV-Anlage. Tabelle 4 beschreibt die Vor- und Nachteile der verschiedenen Wissensformen.

Wichtig ist ein Vergleich der Strukturierung und Verarbeitung von Wissen bei TRIZ, der Künstlichen Intelligenz und der Kybernetik für die Gestaltung der Schnittstellen zwischen den Software-Paketen dieser drei Disziplinen (siehe Tabelle 5).

Wissensform	Vorteile	Nachteile
Assoziatives Oberflächenwissen	Integration von Erfahrungen (Einfache Modellierbarkeit), mittlerer Rechenaufwand (gute Echtzeitfähigkeit), explizites Wissen (Regeln, gute Erklärbarkeit)	höhere Spezialisierung (eingeschränkte Wiederverwendbarkeit), Erfassung aller Fälle notwendig (Vollständigkeit nicht garantiert)
Qualitatives Tiefenwissen	höhere Universalität (gute Wiederverwendbarkeit), Erfassung auch unvorgesehener Fälle (Vollständigkeit), explizites Wissen (gute Erklärbarkeit)	hoher Rechenaufwand (eingeschränkte Echtzeitfähigkeit), Darstellung einfacher Zusammenhänge (eingeschränkte Modellierbarkeit von Zusammenhängen)
Quantitatives Tiefenwissen	Darstellung komplizierter Zusammenhänge (gute Nachbildung durch mathematische Modelle, Ableitung von Regeln), verwendbar für Simulation, Projektierung und Steuerung (hohe Adäquatheit der Modelle)	hoher Rechenaufwand (eingeschränkte Echtzeitfähigkeit), implizites Wissen (schwierige Erklärbarkeit).

**Tabelle 4:** Vor- und Nachteile der verschiedenen Wissensformen (Eigene Darstellung)

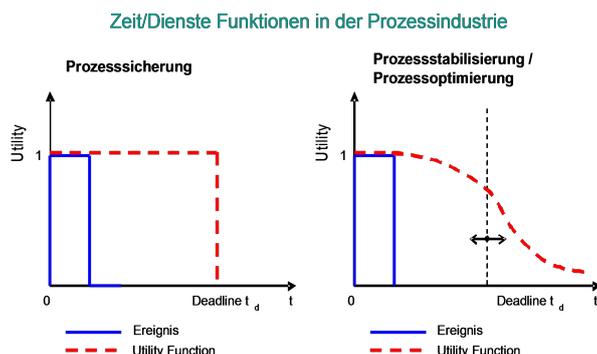
	Struktur des Wissens	Wissensmanipulation
TRIZ	Widerspruchstabelle, innovative Vorgehensprinzipien (ca. 40)	Logik, CAI
Künstliche Intelligenz und Kybernetik	Oberflächenwissen (Regeln), Tiefenwissen (prozedural, mathematische Modelle)	Logik, Expertensystemschalen

**Tabelle 5:** Darstellung und Verarbeitung von Wissen bei TRIZ, Künstlicher Intelligenz und Kybernetik (Eigene Darstellung)

An dieser Stelle soll der Begriff „Echtzeitfähigkeit“ erläutert werden. Im Unterschied zu vielen Veröffentlichungen, in denen die Echtzeitfähigkeit als Schnelligkeit interpretiert wird, verstehen wir unter Echtzeitfähigkeit die Rechtzeitigkeit der Reaktion der Steuerungssysteme auf ein Ereignis (Störungen). Die Zeit-Dienste-Funktionen in der Abbildung 4 stellen die Anforderungen an die Echtzeitfähigkeit in der Prozessindustrie symbolisch dar. Die Antwortzeit auf ein Ereignis als zusätzliche Totzeit, hervorgerufen durch die Informationsverarbeitung der Algorithmen der Kybernetik, der künstlichen Intelligenz oder der TRIZ, darf bei der Prozesssicherung einen bestimmten Wert (Deadline  $t_d$ ) nicht überschreiten, um eine Havarie zu verhindern. Bei der Prozessstabilisierung und bei der Prozessoptimierung hingegen wird der Gewinn, der als rote Linie dargestellt ist, immer kleiner in Abhängigkeit von der wachsenden Antwortzeit.

### Anforderungen an die Echtzeitfähigkeit

Antwortzeit (zusätzliche Totzeit)  $\Rightarrow$  Echtzeitfähigkeit



**Abbildung 4:** Zu Fragen der Echtzeitfähigkeit bei der Anwendung von Methoden der Kybernetik, der künstlichen Intelligenz und der TRIZ (Eigene Darstellung)

## 3. Katalytische drucklose Verölung mit Sauerstoffinjektion

### 3.1 Bisherige Technologie

Das bisherige technologische Schema der katalytischen drucklosen Verölung ist auf Abbildung 5 dargestellt.

Für dieses verfahrenstechnische System der katalytischen drucklosen Verölung (KDV) besitzt die Firma Alphakat GmbH ein Hauptpatent DE 100 49 377 und mehrere weitere Patente der letzten Jahre. Diese KDV-Anlage zur Erzeugung von Diesel aus organischen Abfällen soll in ein virtuelles Kraftwerk (Mikrogrid) integriert werden. Die vor Ort in einem BHKW aus Diesel erzeugte Energie (Strom und Wärme) wird auch vor Ort genutzt.

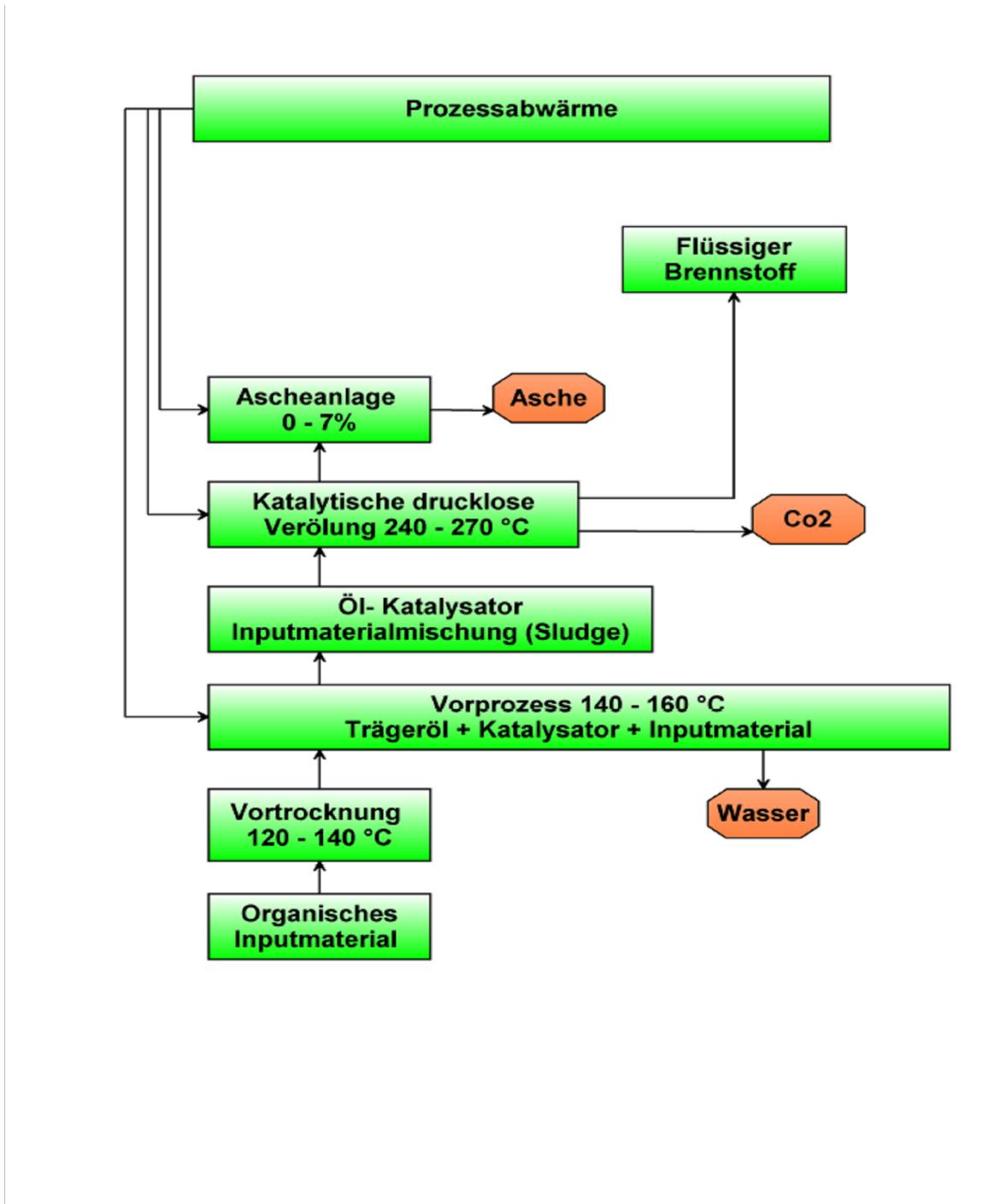


Abbildung 5: Bisheriges Prinzipschema der Technologie zur katalytischen drucklosen Verölung (vgl. [Alphakat, Vesper, Aumos, TUD 2015])

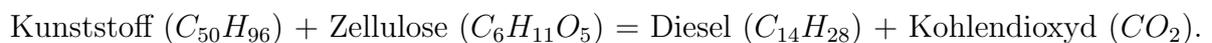
Teuere Energietrassen entfallen. Gleichzeitig werden im Vergleich zu zentralen Energieerzeugungsanlagen die Transportkosten für die Input-Stoffe drastisch reduziert.

Zentrale Elemente der KDV-Anlage sind eine Turbine (Turbogenerator) für die Erzeugung von Diesel, ein Separator und eine Destillationskolonne zur Trennung des Diesels von den übrigen Kohlenwasserstoffen (siehe Abbildung 6).

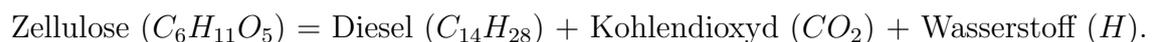


**Abbildung 6:** Außenansicht der KDV-Anlage  
(vgl. [Alphakat, Vesper, Aumos, TUD 2015])

In der Turbine laufen tribochemische katalytische 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:



Hauptmerkmale der bisherigen verfahrenstechnischen Anlage auf der Basis des oben genannten Patentens sind:

- Katalytische Prozesse laufen bei niedrigen Temperaturen ab;
- Keine Bildung von Dioxinen (Umweltschutz);

- Inputstoffe sind sowohl biogene (Stroh, Holz u.a.) als auch hochkalorische (Kunststoffe u.a.) Abfall- und Reststoffe.

Beim Betreiben dieser Anlage traten folgende Probleme auf:

- Die Produktivität der Anlage ist zu gering.
- Für die Erzeugung von Regelenergie in einem virtuellen Kraftwerk sind die möglichen Änderungsbereiche der Leistungsparameter zu gering.
- Die Änderungsgeschwindigkeit der produzierten Dieselmenge pro Zeiteinheit ist auf Grund der großen Totzeiten und Zeitkonstanten für die Erzeugung von Regelenergie nicht ausreichend gering.

### 3.2 Dialektische Widersprüche und innovative Grundprinzipien bei der Entwicklung von Zusatzpatenten

Zur Lösung der im Punkt 3.1 beschriebenen Probleme beim Betreiben der Anlage wurden für die Rekonstruktion und für das Betreiben der Anlage TRIZ-Methoden in Kombination mit Methoden der Künstlichen Intelligenz und der Kybernetik eingesetzt. Im Laufe des Lösungsprozesses wurden folgende *dialektische Widersprüche* behandelt.

Der *Widerspruch zwischen Sollwert und Istwert* beim Betreiben einer technologischen Anlage ist ein charakteristischer dialektischer Widerspruch in der Prozessindustrie. Das trifft natürlich auch auf die katalytische drucklose Verölung zu. Der Sollwert ist eine zeitabhängige Funktion, die als Vorgabe für einen zu messenden Istwert dient. In unserem Fall ist das z.B. der Durchsatz an Diesel am Ausgang der Destillationskolonne in Abhängigkeit von der Zeit.

Der *Widerspruch zwischen Zuverlässigkeit und Wartungsaufwand* besteht darin, dass aus ökonomischen Gründen die Zuverlässigkeit der technologischen Anlage, bestehend aus Steuerungsobjekt und Steuerungssystem, zu erhöhen und der Wartungsaufwand für Hardware und Software zu reduzieren ist.

Der *Widerspruch zwischen Funktionalität und Bedienkomfort* ist darauf zurückzuführen, dass mit steigender Anzahl und Kompliziertheit der durch den Operator zu verwaltenden Funktionen des Steuerungssystems, die ihrerseits gleichzeitig miteinander verknüpft sind, die Übersichtlichkeit und Sicherheit bei der Einschätzung von Situationen zunehmend verloren geht. Das führt dazu, dass die Gefühlswelt des Operators durch Stress und Angst bestimmt wird, was zwangsläufig zu einer Reduzierung der Zuverlässigkeit der Operator-Prozess-Kommunikation führt.

Zur Lösung dieser Widersprüche wurden folgende innovative Grundprinzipien eingesetzt:

- Dynamisierung des Gesamtsystems und seiner Teile
- Einführung von Rückkopplungen

- Zerlegung des Gesamtsystems in Teilsysteme
- Universalität durch Nutzung von quantitativem Tiefenwissen (Mathematische Modelle)
- Veränderung der physikalischen und chemischen Eigenschaften
- Anwendung starker Oxydationsmittel
- Prinzip des „Vermittlers“

Aus den oben beschriebenen dialektischen Widersprüchen wurde als erstes der Widerspruch bzw. die fehlende Übereinstimmung zwischen Sollwert und Istwert behandelt. Dabei spielten die innovativen Grundprinzipie *Veränderung der physikalischen und chemischen Eigenschaften* und *Anwendung starker Oxydationsmittel* eine entscheidende Rolle. Unter Nutzung der Kenntnisse und Erfahrungen aus anderen katalytischen Prozessen mit Gleichgewichtsreaktionen wurden die Eigenschaften der Inputstoffe und damit der Zwischen- und Endprodukte dahingehend geändert, dass durch die Zuführung von Sauerstoff erstens eine Beschleunigung der katalytischen Reaktionen erreicht wurde und dass zweitens durch den Sauerstoff als starkes Oxydationsmittel hervorgerufene Oxydationsprozesse eine zusätzliche Wärmezuführung erfolgte. Das hatte den Vorteil, dass die Produktivität der Anlage um ca. 30% erhöht wurde. Um den Ort und die Menge der Zufuhr von Sauerstoff genau zu bestimmen wurde das innovative Grundprinzip *Universalität durch Nutzung von quantitativem Tiefenwissen (Mathematische Modelle)* in Form von mathematischen Modellen angewendet. Dadurch war es möglich, die wesentlichen Eigenschaften einer Friktionsturbine mit Sauerstoffinjektion vorherzusagen und gleichzeitig die konstruktiven Parameter der Friktionsturbine zu bestimmen (s. Abbildung 7).

Das war die Grundlage für ein Zusatzpatent. Als weitere innovative Grundprinzipien wurden die *Einführung von Rückkopplungen* und die *Dynamisierung des Gesamtsystems und seiner Teile* verwendet. Dabei wurde nach den Regeln der Kybernetik die Differenz von Soll- und Istwert als Eingangssignal für einen Informationsverarbeitungsalgorithmus verwendet. Das Ausgangssignal dieses Algorithmus dient als Steuergröße. Diese beiden Prinzipien führten zur Schaffung eines Systems der zentralen Steuerung dezentraler Anlagen zur katalytischen drucklosen Verölung mit Sauerstoffinjektion (s. Abbildung 8), was ein weiteres Zusatzpatent darstellt.

Die notwendigen Elemente bei der Lösung der Automatisierungsaufgaben führen dazu, dass die Struktur des Automatisierungs- und Steuerungssystems der KDV-Anlage eine zweistufige Hierarchie besitzen (siehe Abbildung 8). 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 können (rot gekennzeichnet: VAN enabled; vgl. [VAN 2009]).

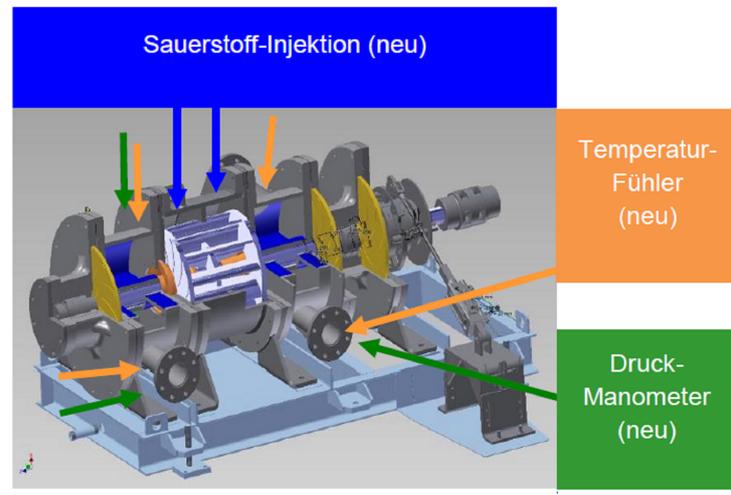


Abbildung 7: Neue Turbine mit Sauerstoffinjektion (vgl. [Alphakat, Vesper, Aumos, TUD 2015])

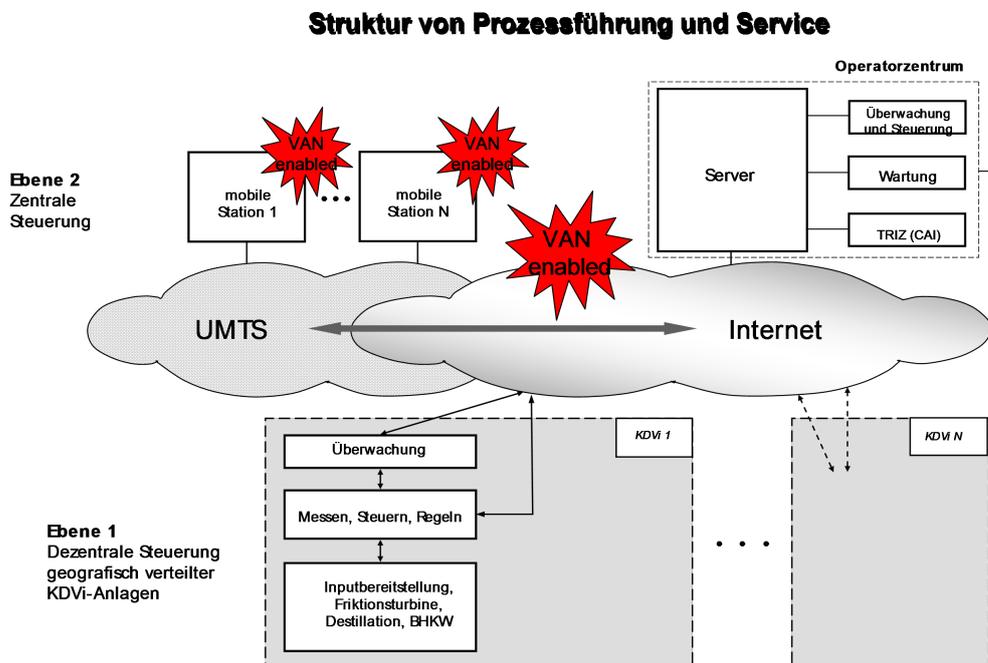


Abbildung 8: Zentrale Steuerung dezentraler Anlagen zur katalytischen drucklosen Verölung mit Sauerstoffinjektion (Eigene Darstellung)

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

- Das 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 und eines CAI-Systems in die zentrale Leittechnik (e-Learning) ist möglich, wobei ein mathematisches Modell die Basis für die Anlagensimulation bildet.
- 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.

Die Aufgaben der TRIZ-Software (CAI, computer aided innovation) als Bestandteil des Operatorzentrums bestehen einmal in der Unterstützung des Operators bei der Neubestimmung der Prozessführungsaufgaben:

- Vergleichende Analyse der Eigenschaften der Störgrößen (Frequenz und Amplitude) und der Eigenschaften des Steuerungsobjektes (Dynamische Charakteristika der Stör- und Steuerkanäle) mit dem Ziel der Bestimmung der Prozessführungsaufgaben (Prozessoptimierung, -stabilisierung und -sicherung).
- Echtzeitfähige Lösung der Prozessführungsaufgaben (Prozessoptimierung, -stabilisierung und -sicherung) durch die Lösung von Widersprüchen zwischen Sollwerten und Istwerten bei Temperaturen, Durchsätzen und Drücken.

Zum anderen geht es um die Unterstützung des Projektanten bei der Neuentwicklung des Turbogenerators mit Sauerstoffinjektion:

- Konstruktion des neuen Turbogenerators und Formulierung eines Patentes
- Erstellung der Fertigungsunterlagen

Bei der Lösung des Widerspruchs zwischen Zuverlässigkeit und Wartungsaufwand wurde das innovative Grundprinzip *Zerlegung des Gesamtsystems in Teilsysteme* angewendet. Nur durch diese Zerlegung in Teilsysteme kann eine Berechnung und Optimierung der Zuverlässigkeit des Gesamtsystems durchgeführt werden. Darüber hinaus macht eine solche Zerlegung eine sinnvolle Wartung und eine Ermittlung des Wartungsaufwandes erst möglich. Durch die jetzt mögliche quantitative Bewertung der Zuverlässigkeit und des Wartungsaufwandes kann eine Systemoptimierung erfolgen.

Die Behandlung des Widerspruches zwischen Funktionalität und Bedienkomfort erfordert, wie bei der Bearbeitung des Widerspruches zwischen Soll- und Istwert, den Einsatz des innovativen Grundprinzips *Universalität durch Nutzung von quantitativem Tiefenwissen (Mathematische Modelle)*, denn nur adäquate mathematische Modelle können die Funktionalität nachbilden. In diesem Sinne könnte man auch die mathematische Modellierung als Anwendung des innovativen Grundprinzips *Prinzip des Vermittlers* bezeichnen, denn das mathematische Modell „vermittelt“ zwischen Steuerungsobjekt und Operator. In der Kybernetik spricht man dabei von modellbasierter Steuerung.

Diese Nachbildung ist auch notwendig um den Bedienkomfort abschätzen und optimieren zu können. Außerdem wird das Grundprinzip *Zerlegung des Gesamtsystems in Teilsysteme* zur Verbesserung der Übersichtlichkeit und damit zur Verbesserung des Bedienkomforts angewendet. Hier soll auf die Arbeit von A.M. Dvorjakin und R.R. Romanenko bezüglich der Generierung von Ideen bei der Lösung von Erfindungsaufgaben in der Programmierung zur Lösung des Widerspruchs zwischen Funktionalität und Bedienkomfort hingewiesen werden (vgl. [Dworjankin, Romanenko 2012]).

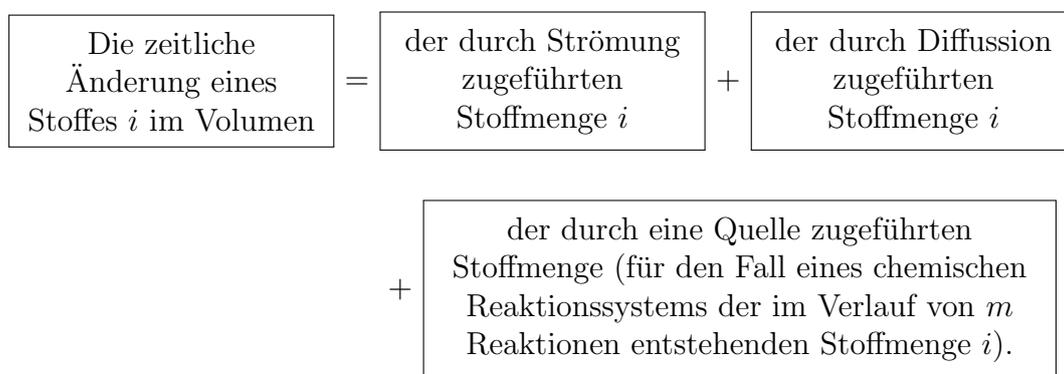
Das eigentliche Ziel bei der Lösung des Widerspruchs zwischen Funktionalität und Bedienkomfort ist die Optimierung der Mensch-Prozess-Schnittstelle im Sinne der Maximierung der Zuverlässigkeit dieser Schnittstelle. Dabei spielen beim Einsatz der TRIZ-Software folgende Gesichtspunkte eine Rolle:

- Verwendung kognitiver Bilder (optische und akustische Darstellungen) für die Beschreibung von Situationen in der Anlage (z.B. Weltkugel, Darstellung der Natur, Gesichtsausdrücke für Freude, Wut, Ekel, Furcht, Verachtung, Traurigkeit, Überraschung u.a.);
- Unterstützung des menschlichen Problemlösungsprozesses (Wissensakquisition, -präsentation, -manipulation, -konsultation);
- Anpassung des Operator Interface an die kognitiven und sensormotorischen Fähigkeiten des Menschen durch Lösung von Widersprüchen (CAI);
- Schaffung einer Multimedia-Schnittstelle ohne praktische technische Beschränkungen (Hier: bimediale Schnittstelle: Sprache und Visualisierung);
- Realisierung einer Doppelstrategie: den Menschen auf Maschinen trainieren und die Maschine auf den Menschen einstellen.

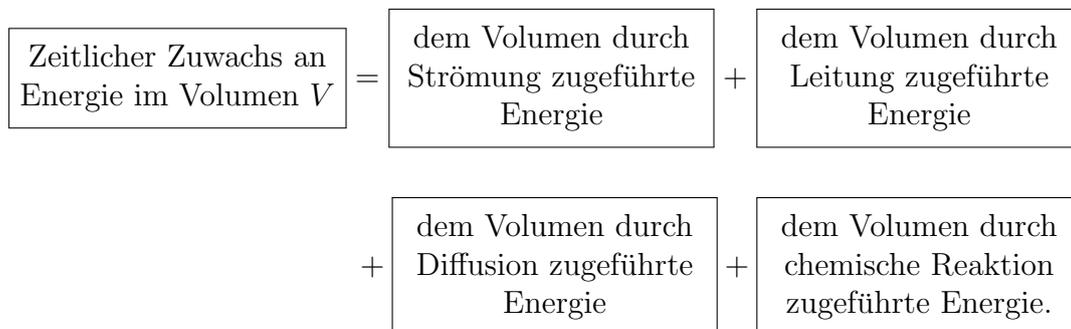
Diese Gesichtspunkte beschreiben auch das Zusammenwirken von kognitiver Psychologie und TRIZ bei der Lösung von Aufgaben der Kybernetik.

## 4. Methodik der mathematischen Modellierung der Friktionsturbine

Das theoretische mathematische Modell, das die in der Friktionsturbine mit Sauerstoffinjektion ablaufenden chemisch-katalytischen und physikalischen Prozesse beschreibt und universell nachbildet, basiert auf Bilanzgleichungen. Die mathematische Modellierung ist damit eine Methode, mit der ein innovatives Grundprinzip von TRIZ, nämlich die *Universalität*, in praktische Lösungen umgesetzt werden kann. Die Abbildungen 9 und 10 zeigen die bei der mathematischen Modellierung verwendeten Beziehungen.



**Abbildung 9:** Materialbilanz (Eigene Darstellung)



**Abbildung 10:** Energiebilanz (Eigene Darstellung)

In Abhängigkeit von der Verweilzeitverteilung als universelle Charakteristik der Hydrodynamik existieren in der Friktionsturbine drei Teilsysteme. Im Bereich der Turbinenschaufeln haben wir ein System mit idealer Durchmischung. In den Bereichen der Zuführung und der Abführung des Reaktionsgemisches haben wir ein System mit eindimensionaler Diffusion in Bewegungsrichtung. Das bedeutet, dass wir zwei Typenmodelle verwenden, die wir im Weiteren erläutert werden:

- Eindimensionales Diffusionsmodell für die Bereiche der Zuführung und Abführung des Reaktionsgemisches.
- Ideales Mischungsmodell für den Bereich der Turbinenschaufeln.

Aus den Modellen der Zuführung des Reaktionsgemisches, des Raumes der Turbinenschaufeln und der Abführung des Reaktionsgemisches wird ein Gesamtmodell erstellt, indem diese drei Modelle in Reihe geschaltet werden.

### Eindimensionales Diffusionsmodell

Materialbilanzen:

$$\frac{\partial x_i}{\partial t} + w \frac{\partial x_i}{\partial l} + D_L \frac{\partial^2 x_i}{\partial l^2} = f_i(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n, T), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

mit

$x_i(t, l)$  – Konzentration der Komponente  $i$ ,

$T(t, l)$  – Temperatur,

$f_i(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n, T)$  – Reaktionsgeschwindigkeit auf der Basis der Formalkinetik bei Bildung bzw. Verbrauch der Komponente  $X_i$ ,

$w$  – lineare Geschwindigkeit der Komponente in der Friktionsturbine,

$D_L$  – Längsvermischungskoeffizient in der Friktionsturbine,

$t$  – Zeit,

$l$  – laufende Länge des Reaktionsraumes der Friktionsturbine.

Der Koeffizient  $D_L$  wird aus der geschätzten oder experimentell ermittelten Verweilzeitverteilung  $\phi(\tau)$  unter Verwendung folgender aus der Hydrodynamik bekannten Gleichung bestimmt:

$$\phi(\tau) = \frac{w}{\sqrt{4 \pi D_L \tau}} \exp\left(-\frac{w^2 \left(\tau - \frac{L}{w}\right)^2}{4 D_L \tau}\right)$$

mit

$L$  – die Länge des Raums der Zuführung bzw. der Abführung des Reaktionsgemisches

$\tau$  – Verweilzeit

Energiebilanz:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + w \frac{\partial T}{\partial l} + D_L \frac{\partial^2 T}{\partial l^2} = h_i f_i(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n, T), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

mit

$T(t)$  – Temperatur,  
 $h_i$  – von der Wärmetönung der chemischen Reaktion und von der spezifischen Wärmekapazität des aufzuheizenden Mediums abhängiger Koeffizient.

### Ideales Mischungsmodell

Materialbilanzen:

$$\frac{dx_i}{dt} = \frac{V_i}{V_0}(x_i - x_{ie}) + f_i(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n, T), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

mit

$x_i(t)$  – Konzentration der Komponente  $i$ ,  
 $T(t)$  – Temperatur,  
 $x_{ie}$  – Konzentration der Komponente  $i$  am Eingang in die Friktionsturbine,  
 $V_i$  – Menge der zugeführten Komponente  $i$  pro Zeiteinheit,  
 $V_0$  – Inneres Volumen der Friktionsturbine.

Wärmebilanz:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\sum_i V_i}{V_0} c(T - T_e) + \sum_i g_i f_i(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n, T) \quad (4)$$

mit

$T_e$  – durch eine Mischungsgleichung zu bestimmende mittlere Eingangstemperatur aller Komponenten,  
 $c$  – Spezifische Wärme des Mediums im Reaktionsraum,  
 $g_i$  – von der Wärmetönung der chemischen Reaktion und von der spezifischen Wärmekapazität des aufzuheizenden Mediums abhängiger Koeffizient.

Sowohl für das eindimensionale Diffusionsmodell als auch für das ideale Mischungsmodell wurden für folgende Komponenten Bilanzgleichungen unter Verwendung der Beziehungen (1) bis (4) aufgestellt:

Kunststoff ( $C_{50}H_{96}$ ), Zellulose ( $C_6H_{11}O_5$ ), Diesel ( $C_{14}H_{28}$ ), Kohlendioxid ( $CO_2$ ), Wasserstoff ( $H_2$ ), Sauerstoff ( $O_2$ ).

Für beide Modelle müssen noch die Anfangs- und Randbedingungen formuliert werden, was aber grundsätzlich keine Schwierigkeiten bereitet. Außerdem sind noch die Wärmeverluste

in der Zu- und Abführung in Gleichung (2) zu bestimmen. Darüber hinaus muss noch die durch Reibung der Turbinenschaufeln mit dem Reaktionsgemisch zugeführte Wärme in Gleichung (4) berechnet werden. Die Menge an zugeführtem Sauerstoff als Funktion der Zeit geht in die Randbedingungen ein.

Eine Simulation bzw. Nachbildung des dynamischen und statischen Verhaltens der Friktionsturbine mit dem Ziel der Prozessoptimierung, -stabilisierung und -sicherung sowie der Prognose erfolgt durch gleichzeitige Lösung der oben dargestellten Differentialgleichungssysteme (1) bis (4).

## **5. Restwärmenutzung zur Stromerzeugung**

### **5.1 Konzept der Umwandlung von Restwärme in elektrische Energie**

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 (weniger als 300 °C, „Niedertemperaturwärme“) soll für die Elektroenergiegewinnung nutzbar gemacht werden. Um Technologien für die Nutzarmachung 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 der Fa. PA Future 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.

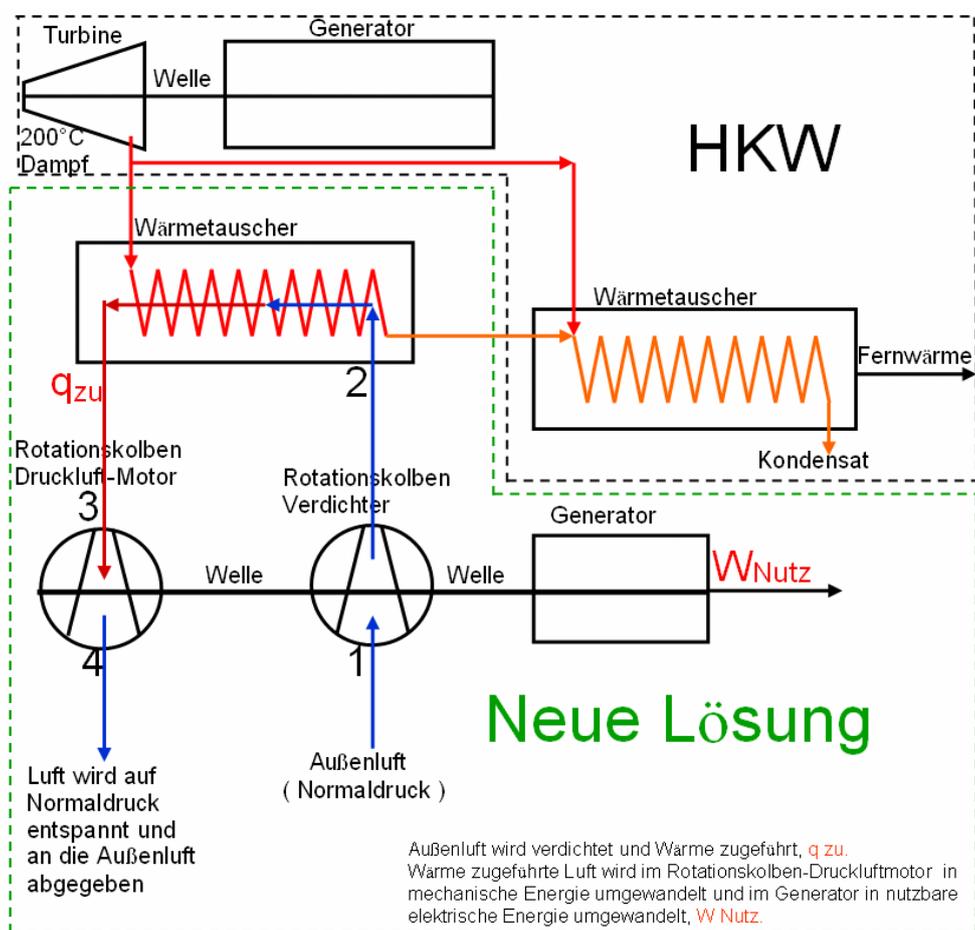
Laut Patentbeschreibung besteht die Aufgabe der Erfindung in einer effizienten Umwandlung von Niedertemperaturwärme in mechanische bzw. elektrische Energie. Insbesondere sollen die Kondensationswärme in Kraftwerken, Abwärme und solar erzeugte Wärme als Energiequelle zu Bereitstellung mechanischer Energie 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.

Die Vorteile dieses Konzeptes gegenüber den bekannten Lösungen (ORC-Prozess, Stirling-Maschinen u.a.) sind:

- Keine Beschränkungen bezüglich des Temperaturniveaus des Heizmediums bzw. der Restwärmequelle.
- Arbeitsmedium Luft ist überall kostenlos verfügbar.
- Offener thermodynamischer Kreislauf ohne Kühlung des Arbeitsmediums, dadurch hoher Wirkungsgrad.

In einem Heizkraftwerk soll dieses Konzept prototypisch umgesetzt werden (s. Abbildung 11).



**Abbildung 11:** Nutzung von Niedertemperaturwärme in einem Heizkraftwerk (HKW) zur Stromerzeugung (vgl. [ILK, Kunz, GAD 2016])

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 11 ist eine konkrete Untersetzung dieser Lösungsprinzips unter Nutzung von Rotationskolbenmaschinen (vgl. [ILK, Kunz, GAD 2016]).

## 5.2 Machbarkeitsanalyse

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 die Abbildung 12.

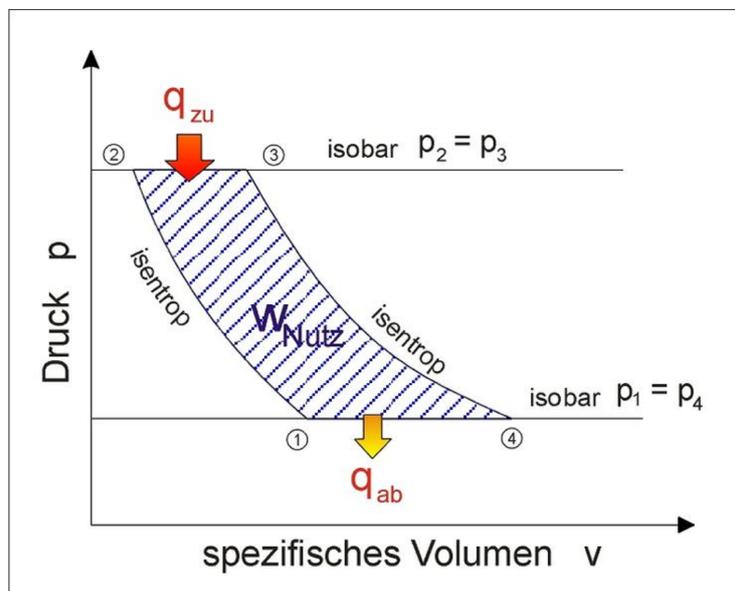
Um die im Prozess der Restwärmenutzung gewonnene Arbeit zu ermitteln, betrachten wir die Übergänge zwischen den in Fehler: Referenz nicht gefunden dargestellten Zuständen. Für die thermischen und energetischen Abschätzungen wurden folgende Prozessberechnungen durchgeführt, die im Einzelnen aus Platzgründen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

*Isentrope Kompression* Zustand (1)  $\rightarrow$  Zustand (2)

Die Verdichtungsendtemperatur  $T_2$  nach der isentropen Kompression berechnet sich unter Nutzung der bekannten thermodynamischen Beziehungen aus der Eintrittstemperatur  $T_1$ .

*Isobare Erwärmung* (2)  $\rightarrow$  (3)

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



**Abbildung 12:** Thermodynamische Analyse des Prozessverlaufs (vgl. [ILK, Kunz, GAD 2016])

gleichungen verwendet, die nach den auf der Abbildung 10 dargestellten Prinzipien erstellt wurden.

*Isentrope Expansion* (3)  $\rightarrow$  (4)

Die Endtemperatur  $T_4$  nach der isentropen Expansion 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  $q_{ab}$ .

Es treten folgende Probleme beim Betreiben der Lösung auf.

Bei

$$q_{zu} \geq q_{ab}(W_{Nutz}) + \text{Reibungsverluste} \quad (5)$$

erhöht sich die Drehgeschwindigkeit der Welle kontinuierlich (Fehlende Stabilität), was zu einer Zerstörung des Systems führen kann. Bei

$$q_{zu} \leq q_{ab}(W_{Nutz}) + \text{Reibungsverluste} \quad (6)$$

ist die Betriebsfähigkeit des Systems nicht gegeben.

Auf Grund dieser Probleme konnte das System der Restwärmenutzung zur Stromerzeugung noch nicht realisiert werden. Es muss ein Steuerungssystem entwickelt werden, mit dessen

Hilfe die Bedingung

$$q_{zu} = q_{ab}(W_{Nutz}) + \text{Reibungsverluste} \quad (7)$$

erfüllt wird.

### 5.3 Dialektische Widersprüche und Anwendung innovativer Grundprinzipien bei der Entwicklung eines Zusatzpatentes

Ohne das oben erwähnte 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.

Zur Lösung der oben beschriebenen Probleme beim Betreiben der Anlage wurden wie auch bei der Rekonstruktion der KDV-Anlage für die Entwicklung des Steuerungssystems als ein Zusatzpatent TRIZ-Methoden in Kombination mit Methoden der Künstlichen Intelligenz und der Kybernetik eingesetzt.

Der Lösungsprozess wird durch folgende *dialektische Widersprüche* charakterisiert.

Die Behandlung des *Widerspruches zwischen Sollwert und Istwert* entspricht im Prinzip der Vorgehensweise bei der KDV-Anlage. Der Sollwert ist in diesem Fall die Drehzahl der Welle als eine zeitabhängige Funktion, die als Vorgabe für einen zu messenden Istwert dient. Die Lösung dieses Widerspruchs erfolgte mit Hilfe der innovativen Grundprinzipien *Dynamisierung* und *Rückkopplung*. Damit wurde die erste Komponente des Steuerungssystems geschaffen, die eine Kompensation der positiven inneren Rückkopplung des Systems „Verdichter- Wärmetauscher-Motor-Generator“ durch ein wissensbasiertes Prozessstabilisierungssystem unter Einhaltung der Bedingung (7) zum Ziel hatte. Diese Kompensation erfolgte durch eine äußere negative informationelle Rückkopplung.

Der *Widerspruch zwischen Optimalität und Stabilität* wird in der Prozessindustrie oft dadurch charakterisiert, dass das Optimum in der Nähe der Stabilitätsgrenze liegt. Es kommt deshalb darauf an, beim Betrieben der Anlage erstens die Steuergrößen mit hoher Genauigkeit zu bestimmen und zweitens das Prozessoptimierungssystem mit einem Prozessstabilisierungssystem zu koppeln.

Die Entwicklung des Prozessoptimierungssysteme und seiner Kopplung mit dem Prozessstabilisierungssystem erfolgte durch Anwendung der innovativen Grundprinzipien *Universalität durch Anwendung von quantitativem Tiefenwissen (Mathematische Modelle)* und *Zerlegung*. Die *Zerlegung* war die Voraussetzung für die Modellierung der einzelnen Elemente des Gesamtsystems. Das Grundprinzip *Anwendung der Wärmeausdehnung* ist die generelle Grundlage für das Konzept der Nutzung der Restwärme zur Stromerzeugung. Die Ergebnisse bei der Lösung der Widersprüche unter Anwendung der genannten innovativen Grundprinzipien kann wie folgt zusammengefasst werden. Das System der Prozessführung bzw. Steuerung der Anlage zur Restwärmenutzung wird nach verschiedenen Zielfunktionen in Abhängigkeit von den sich dynamisch ändernden energetischen und wirtschaftlichen Anforderungen an das Heizkraftwerk betrieben:

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

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

- Steuergrößen:
  - Durchsatz der Luftmenge pro Zeiteinheit am Eingang in den Wärmetauscher;
  - zugeführte Dampfmenge pro 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 pro Zeiteinheit;
  - Variationen der Außenlufttemperatur;
  - Variationen der Zielfunktion;
  - Variationen der Nebenbedingungen.
- Nebenbedingungen bzw. einzuhaltende Vorgaben:

- Erzeugte Fernwärmemenge pro 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 pro 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 Tabelle 6). Die Struktur dieses Steuerungssystem ist ähnlich der Struktur des VAN-basierte Systems auf Abbildung 8.

<b>Ebene</b>	<b>Informationsverarbeitungs- algorithmus</b>	<b>Bemerkungen</b>
<b>1. Stabilisierung der Steuergrößen</b>	Eindimensionale Festwertregelkreise mit linearen Reglern	Einsatz von Standardkomponenten möglich
<b>2. 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
<b>3. Auswahl der Zielfunktion und der Neben- bedingungen</b>	Nutzung von Elementen der künstlichen Intelligenz, Modellierung des Gesamtsystems Heizkraftwerks als neues System	Keine Standardlösungen vorhanden

**Tabelle 6:** Aufgaben des Steuerungssystems bei der Nutzung der Restwärme zur Stromerzeugung (Eigene Darstellung)

## 6. Gegenseitiger Nutzen aus der Kooperation von TRIZ, künstlicher Intelligenz und Kybernetik

An dieser Stelle soll ausgehend von Erfahrungen der in den Punkten 3, 4 und 5 beschriebenen Beispielen der Nutzen der Kooperation der drei Wissenschaftsdisziplinen zusammengefasst werden.

Die *künstliche Intelligenz* und die *Kybernetik* können für *TRIZ* folgendes leisten:

- Unterstützung der innovativen Grundprinzipien durch regelbasierte Systeme.
- Akquisition von Oberflächenwissen und Tiefenwissen zur Beschreibung bzw. Auflösung von Widersprüchen.
- Einsatz von Expertensystemschalen für die Entwicklung und den Betrieb von TRIZ-Systemen (CAI).

Dabei spielt die Erstellung der Wissensbasis die entscheidende Rolle. Dazu werden Methoden des Wissensingenieurwesens verwendet. Das Wissensingenieurwesen basiert auf einem Vier-Phasenkonzept:

- Definitionsphase
- Akquisitionsphase
- Operationalisierungsphase
- Wartungsphase

Innerhalb der Definitionsphase wird eine Anforderungsspezifikation erarbeitet. Mit anderen Worten: Es ist die Steuerungsaufgabe zu bestimmen: Prozessstabilisierung, Prozessoptimierung oder Prozesssicherung.

In der Akquisitionsphase erfolgen eine Analyse der Störgrößen, der kausalen Zusammenhänge innerhalb des Steuerungsobjektes und die Erstellung formaler Modelle. In dieser Phase werden vor allem Methoden der Kybernetik eingesetzt. Dabei geht es um eine „technologenahe Strukturierung“ des Wissens.

Während der Operationalisierungsphase wird das Wissen systemnah strukturiert. Außerdem wird die Betriebsfähigkeit des Steuerungssystems als wissensbasiertes System hergestellt.

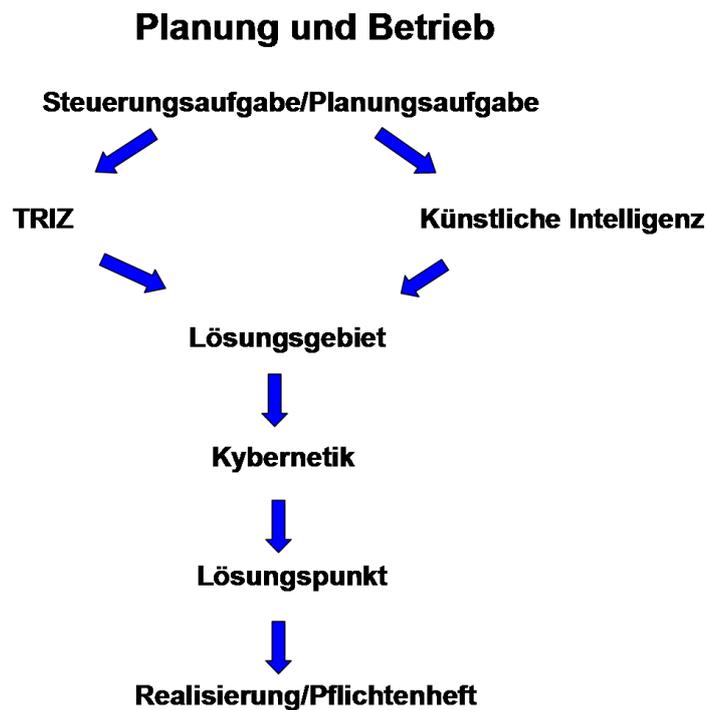
In der Wartungsphase wird neu gewonnenes Wissen (z.B. in Form von neuen Regeln) in die Wissensbasis eingefügt.

*TRIZ* kann für die *Kybernetik* folgendes leisten:

- Lösung von dialektischen Widersprüchen (z.B. zwischen Optimalität und Stabilität, zwischen Sollwert und Istwert);

- Anwendung innovativer Grundprinzipien (z. B. Integration, Rückkopplung, Zerlegung, Dynamisierung)

Diese Leistungen führen zu einer wesentlichen Vereinfachung der Projektierung und des Betriebens von technischen Systemen. Abbildung 13 zeigt das diesbezügliche Zusammenwirken von TRIZ, Künstlicher Intelligenz und Kybernetik.



**Abbildung 13:** Zusammenwirken von TRIZ, Künstlicher Intelligenz und Kybernetik bei der Planung und beim Betrieb von technischen Systeme (Eigene Darstellung).

TRIZ und Künstliche Intelligenz bestimmen das Lösungsgebiet und schränken damit den Lösungsraum ein, während die Kybernetik den Lösungspunkt definiert.

## 7. Literatur

- Alphakat, Vesper, Aumos, TUD (2015): Automatisierte Anlage zur katalytischen drucklosen Verölung (Unveröffentlichte Projektbeschreibung).
- Balzer, D. et al. (1992): Wissensbasierte Systeme in der Automatisierungstechnik. Carl Hanser Verlag München Wien.
- Dvorjankin, A.M., Romanenko, R.R. (2012): Generatsia idej pri reschenii isobretatelskich sadač v programirovanii (Generierung von Ideen bei der Lösung von Erfindungsaufgaben in der Programmierung). Ivestia Volgogradskovo gosudarstvennovo tehničeskovo universiteta, 13.4.
- Gorelik, V. (2016): On dal čelovečestvy nitj Ariadny (Er gab der Menschheit den Faden der Ariadne). Jevrejskaja panorama Nov. 2016.
- ILK, Kunz, GAD (2016): „Restwärmenutzung unter Verwendung einer Rotationskolbenmaschine“ (Unveröffentlichte Projektbeschreibung).
- Petrov, V. (2014); Technologija inovatsij (Innovationstechnologie).  
<http://temm.ru/file.php/id/f4508/name/Innovation\%20Technology-max.pdf>
- Sokolov, G.V. (2015): Sistemy poiska reschenij (Systeme der Entscheidungsfindung).  
<http://triz.iis.nsk.su/sokolov/dss-preface>.
- VAN (2009): EU-R&D-Project „Virtual Automation Networks (VAN)“, Deliverable D09.2-1.



Dieser Text kann unter den Bedingungen der Creative Commons CC-BY Lizenz <https://creativecommons.org/licenses/by/3.0> weiterverwendet werden.