

Lohnende Ideen erkennen

Neue Methode identifiziert ökonomisches Optimum

Technische Systeme sind im besten Fall nicht nur profitabel, sondern auch energieeffizient und umweltfreundlich. Um diese teilweise widersprüchlichen Ziele unter einen Hut zu bringen, wurde am Institut für Fluidsystemtechnik in Darmstadt die techno-ökonomische Analyse entwickelt. Die Methode hilft, erfolgversprechende Produktideen unter energetischen und ökonomischen Aspekten optimal auszulegen.

Technische Systeme unterliegen generell einem mehrdimensionalen Anforderungsprofil. Zum Beispiel müssen neben der energetischen Effizienz auch die wirtschaftliche Profitabilität sowie die ökologische Verträglichkeit gewährleistet sein. Optimiert man ein System hinsichtlich je eines der Kriterien, ergeben sich drei ganz unterschiedliche Systeme. Zusätzlich stehen diese Kriterien oftmals im Konflikt, zum Beispiel ist das maximal energieeffiziente System eben nicht hochprofitabel und auch nicht herausragend umweltfreundlich. Aufgabe der Systemvorauslegung ist es, den besten Kompro-

miss und das daraus resultierende optimale System abzuleiten. An dieser Stelle setzt das Institut für Fluidsystemtechnik mit seiner Forschungsarbeit zur ganzheitlichen Systemanalyse an.

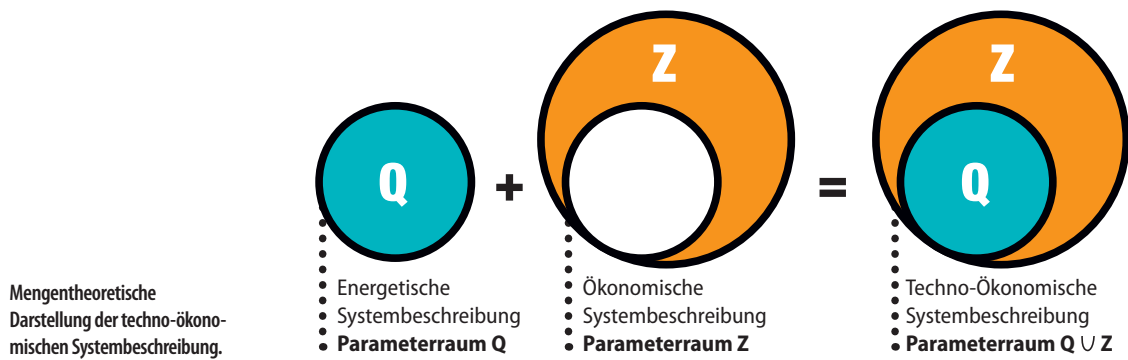
Technik und Ökonomie vereinen

Als Ergebnis bisheriger Forschung ist die „Techno-ökonomische Analyse“ entstanden, innerhalb derer Systeme ganzheitlich und gleichzeitig unter technischen sowie ökonomischen Aspekten erfasst werden. Die simultane Betrachtung stellt sicher, dass Parameterinteraktionen der technisch-ökonomischen Systembeschreibung er-



Bild: Fotolia, elarin

Lässt man der Kreativität freien Lauf, entstehen oft ganz neue Ideen. Aber taugen diese Konzepte auch als Geschäftsmodell? Die techno-ökonomische Analyse liefert fundierte Antworten.



fasst werden. Nur so ist es möglich, das System zu finden, das das „Beste aus beiden Welten“ verkörpert. Die kombinierte, erweiterte Beschreibung eines technischen Systems ist in der Sprache des Ingenieurs als Erweiterung der Systemgrenze zu verstehen.

Methode der techno-ökonomischen Systemanalyse

Die Methode basiert prinzipiell auf dem ingenieurstypischen Ansatz der Systemmodellierung, der axiomatischen oder empirischen Systembeschreibung und anschließender Systemoptimierung. Dieser Ansatz wurde um wirtschaftliche Aspekte erweitert, sodass die techno-ökonomische Systemanalyse grundsätzlich in die drei Schritte der techno-ökonomischen Modellierung, der detaillierten Systemanalyse und der abschließenden Systemoptimierung gegliedert werden kann.

Das techno-ökonomische Modell stellt den ersten Schritt dar. Es umfasst die Systemkomponenten sowie beliebige Flussgrößen durch das System, zum Beispiel Energie, Materie, und Kosten. Kopplungen der Flussgrößen können einfach dargestellt werden. So würde beispielsweise der Betrieb eines Feststoffbrenners einen Kostenstrom induzieren, da der Brennstoff Kosten verursacht.

Im zweiten Schritt der techno-ökonomischen Systemanalyse erfolgt die detaillierte ökonomische und energetische Beschreibung des Systems. Dies ist immer notwendig, da die techno-ökonomische Analyse aus der Vereinigung energetischer und ökonomischer Analysen hervorgeht. In der technischen Beschreibung stehen dem Ingenieur hierzu axiomatische Erhaltungssätze oder empirische Modelle zur Verfügung. Die ökonomische Beschreibung hingegen kann nur durch ökonomische Modelle erfolgen, da in der Wirtschaftswissenschaft keine Erhaltungsgrößen existieren.

Im abschließenden Schritt wird das techno-ökonomisch optimale System durch Anwendung von Optimierungsmethoden ermittelt. Hierzu ist generell die Definition einer Zielfunktion sowie einzuhaltender Nebenbedingungen von Nöten.

Lohnt sich der Windenergiekonverter?

Die Methode wurde zum Beispiel bei einem innovativen Windenergiekonverter angewendet, um herauszufinden, ob und unter welchen Bedingungen sich diese Idee rentiert. Dabei handelt es sich um ein windgetriebenes Schiff, an dessen Rumpf eine hydrokinetische Turbine montiert ist. Sie wandelt kinetische Energie beim Fahren anteilig in Elektrizität um. Aufgrund der Mobilität des Systems wird die elektrische Energie an Bord des Schiffes gespeichert, bei-

Technik im Detail

Die Methode in der Theorie der Mengen

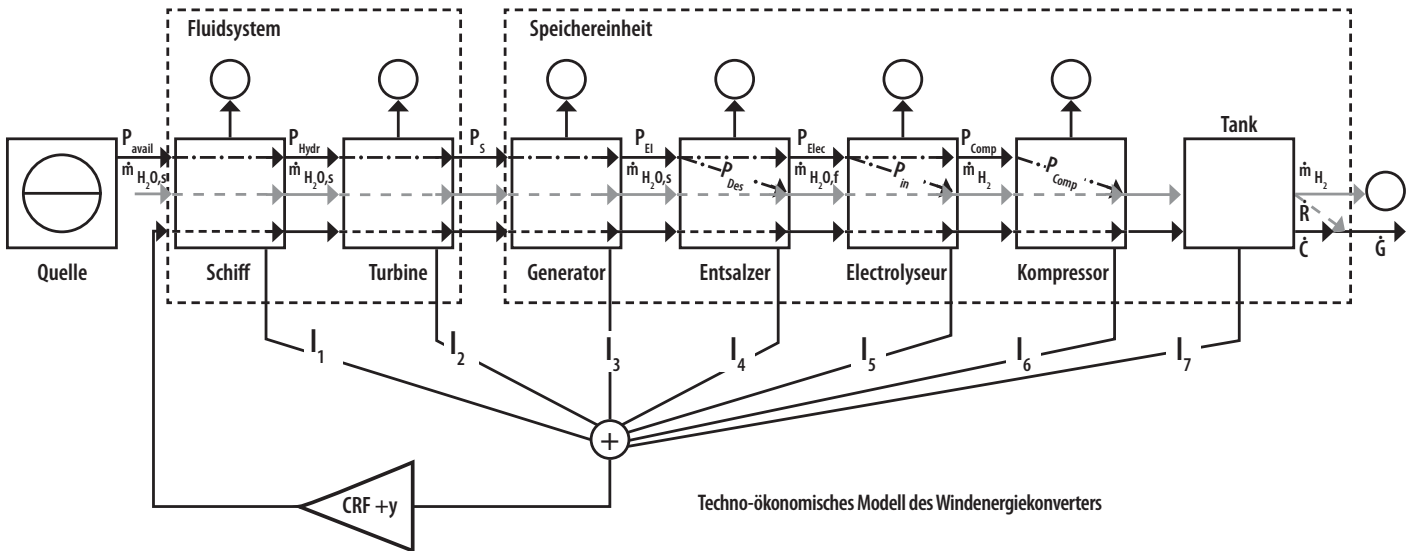
Die erweiterte Systembeschreibung durch gleichzeitige Beachtung energetischer und ökonomischer Aspekte lässt sich in der anschaulichen mathematischen Theorie der Mengen wie folgt beschreiben: Die Menge aller energetisch beschreibbaren Systeme wird über eine gewisse Anzahl an Parametern beschrieben. Diese sind auf dem Parameterraum Q definiert. Beschreibt man nun ebenfalls die Menge aller ökonomisch beschreibbaren Systeme, so wird dies zunächst zu einer Erweiterung des Parameterraums (hier Z) führen. Da wie oben aufgeführt der Erlös des Systems von der energetischen Systemeffizienz abhängt, muss dies in der ökonomischen Betrachtung berücksichtigt werden. Konsequenterweise ist der energetische Parameterraum ein Unterraum des ökonomischen Parameterraums. Einen gesamtheitlich umfassenden Einblick in das System kann also nur die techno-ökonomische Betrachtung liefern, deren Parameterraum als die Vereinigungsmenge des energetischen und ökonomischen Parameterraums zu interpretieren ist.

spielsweise chemisch durch Elektrolyse oder in Batterien. Die Mobilität des Systems ist gleichzeitig auch ein Vorteil, weil es beispielsweise widrige Wetterbedingungen einfach umfahren kann.

Um das Potenzial des Windenergiekonverters zu untersuchen, wurde eine techno-ökonomische Analyse durchgeführt. Wie vorhin beschrieben stellten Professor Pelz und Mario Holl von der Technischen Universität Darmstadt dazu das techno-ökonomische Modell des Konverters auf. Dabei sind die Systemkomponenten seriell geschaltet. Eingangsgrößen des Systems sind eine definierte, verfügbare Leistung, salzhaltiger Wassermassenstrom zu Speicherezwecken sowie ein jährlicher Kostenstrom, der an die Existenz des Systems gebunden ist. An sämtlichen energiewandelnden Komponenten treten Verluste auf.

Im techno-ökonomischen Modell sind die Kopplungen der modellierten Flussgrößen zu erkennen. So benötigt der Entsalzer eine anteilige Leistung, um das salzhaltige Wasser in Frischwasser umzuwandeln. Die restliche Leistung wird zur Spaltung von Frischwasser in Wasserstoff sowie zur Verdichtung benötigt. Konsequenterweise liegt keine Leistung als Ausgangsgröße des Systems vor. Eine weitere Kopplung existiert zwischen Kosten- und Materiestrom. Der Verkauf des Wasserstoffs bestimmt den Erlös. Die Differenz aus jährlichen Erlösen und Kosten bestimmt den Gewinn. Die Ausgangsgrößen des Systems sind also der Wasserstoffmassenstrom sowie der jährliche Gewinn.

Im nächsten Schritt der techno-ökonomischen Analyse wird das System energetisch und ökonomisch beschrieben. Durch die Anwendung axiomatischer Erhaltungssätze kann das System energetisch vollständig beschrieben werden. Das Energiesystem liegt



dann als White-Box-Modell vor, sodass energetische Ausgangsgrößen bei beliebigen Eingangsgrößen bestimmt werden können. Zur ökonomischen Beschreibung nutzen die Forscher Modelle der statischen oder dynamischen Investitionsrechnung. Die Unterscheidung der Modelle bezieht sich grundsätzlich auf die Beachtung oder Vernachlässigung des Zeitwertes der Währung. Wie anhand des techno-ökonomischen Modells zu erkennen ist, müssen jährliche Kosten für das System aufgebracht werden. Demgegenüber erzielt der Betreiber Erlöse durch den Verkauf des jährlich erzeugten Wasserstoffs.

Je energetisch effizienter das System ist, desto mehr Erlöse werden konsequenterweise erzielt. Es ist zu erkennen, dass sowohl Energie- sowie Materiestrom im ökonomischen Modell konvergieren. Um nicht lediglich eines der möglichen Energiesysteme ökonomisch zu beschreiben, werden Kostenfunktionen genutzt. Dies erfolgt durch die Referenz der Kosten auf charakteristische Parameter, die idealerweise auch Teil des Parameterraums der energetischen Beschreibung sind. Hinsichtlich dieser Parameter ist es möglich den optimalen Trade-off zwischen energetischer Effizienz und ökonomischer Profitabilität zu bestimmen.

Den abschließenden Schritt der techno-ökonomischen Analyse bildet die Systemoptimierung. Hierzu ist zunächst die Formulierung einer Zielfunktion von Nöten. Die Maximierung der energie-

tischen Systemeffizienz führt zum energetisch optimalen System. Die techno-ökonomische Zielfunktion sind für diesen speziellen Energiekonverter die auf das Ausgangsprodukt bezogenen Kosten. Diese Wasserstoffgestehungskosten (WGK) sind ein systeminhärentes Maß für die ökonomische Qualität des Systems. Sie geben an, zu welchem Preis der produzierte Wasserstoff verkauft werden muss, um gerade laufende Kosten zu decken. Je energetisch effizienter und kostengünstiger das technische System ist, desto geringer sind die WGK. Diese Zielfunktion betrachtet daher die techno-ökonomische Parameterinteraktion.

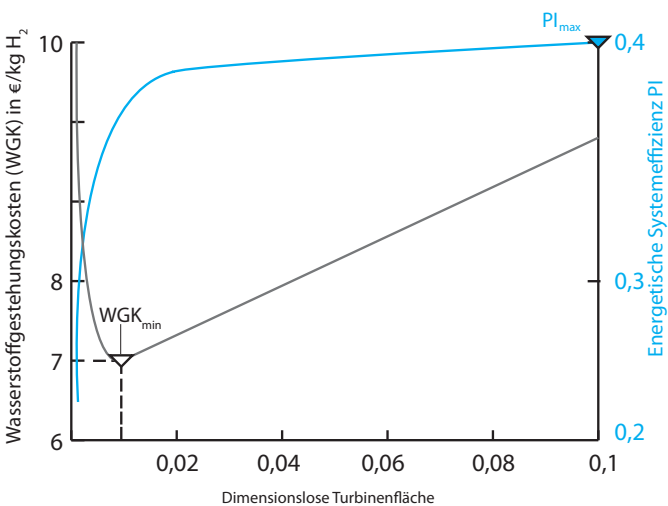
Ein exemplarisches Beispiel für den Unterschied des energetisch und techno-ökonomisch optimalen Energiesystems ist durch die optimale Turbinenfläche des dargestellten Windenergiekonverters gegeben.

Die Betrachtung der energetischen Systemeffizienz liefert die Aussage, eine größtmögliche Turbine zu verbauen, obwohl die Steigerung der Turbinenfläche ab einem kritischen Wert nur noch marginale Änderungen in der energetischen Effizienz des Systems verursacht. Dass dies ökonomisch nicht sinnvoll ist, zeigen die WGK, bei deren Betrachtung eine optimale Turbinenfläche zu erkennen ist. Nach dieser kritischen Turbinenfläche steigen die WGK wieder an, da der Nachteil der höheren Turbinenkosten den Vorteil der größeren energetischen Effizienz überwiegt.

Dieses Beispiel zeigt, dass die Systemvorauslegung sich immer nach den Kriterien richtet, unter denen das System modelliert und mathematisch beschrieben wurde. Im Kontext nachhaltiger Systemvorauslegung muss sich der Ingenieur von heute also hervorwagen und disziplinübergreifend sein System modellieren, beschreiben und verstehen können. Eine systematische Methode, die genau dies leisten kann, ist am Institut für Fluidsystemtechnik in Darmstadt entstanden. Bisher führten die Forscher darin energetische und ökonomische Systembetrachtungen zusammen. Die Methode ließe sich jedoch noch erweitern, um beispielsweise ökologische Systembetrachtungen zu integrieren.

Das Verfahren ist noch jung, doch schon im derzeitigen Stand könnten Unternehmen es nutzen, um Produkte sowie Systeme techno-ökonomisch vorauszu legen, also eine Abwägung zwischen energetischer Effizienz und ökonomischen Kriterien zu finden. Beispielsweise könnte so schon in der Entwurfsphase eine Investitions- beziehungsweise Produktionsentscheidung getroffen werden.

Turbinenfläche des Windenergiekonverters



Lediglich die techno-ökonomische Betrachtung liefert ein eindeutiges Optimum.

Autoren

Mario Holl, Prof. Peter Pelz, TU Darmstadt