



# Berichte über Landwirtschaft

Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft

**BAND 94 | Ausgabe 1**

Mai 2016

AGRARWISSENSCHAFT  
FORSCHUNG  
—  
PRAXIS



# Messung der betrieblichen Energieeffizienz als Indikator ökologischer und ökonomischer Nachhaltigkeit von Gartenbauunternehmen

## 1 Einleitung

Wissenschaftler mit technischem Hintergrund sind davon überzeugt, dass nachhaltiges Energiemanagement einen der wichtigsten Bereiche der Forschung darstellt, welcher einen globalen Nutzen aufweist (44). Beispiele für die Bemühungen des Gartenbaus sind die Zukunftsinitiative Niedrigenergiegewächshaus (ZINEG) (13; 33) und das Konzept des geschlossenen Gewächshauses (44). Als Zielsetzung für eine gesteigerte Energieeffizienz wird neben einer Kostenreduktion auch immer ein Beitrag für die ökologische Dimension der Nachhaltigkeit aufgeführt. Auch wenn Energieeffizienzverbesserungen wie das geschlossene Gewächshaus höhere Investitionskosten als herkömmliche Gewächshäuser aufweisen, besteht eine Chance das Konzept kosteneffizient zu implementieren (44). Eine wichtige Maßnahme, um Konzepte wie das geschlossene Gewächshaus zur Energieeffizienzsteigerung voranzubringen, ist die korrekte Modellierung, um das technische Potential einer Vielzahl von Designkonzepten sowie deren Kosteneffizienz zu beurteilen (44). Über 90 Prozent des Energieverbrauchs von offenen Gewächshäusern werden durch das Heizen verursacht (20).

Energieeffizienz hat heute einen wichtigen Platz auf der politischen Agenda der meisten Industrienationen und wird im deutschen Gartenbau, als energieintensive Branche, seit Jahrzehnten thematisiert (beispielsweise 40; 41). Die Bedeutung von Energieeffizienz als Zieldimension begründet sich in ihrem Einfluss auf die Wettbewerbsfähigkeit der Produktion, die Sicherheit der Energieversorgung sowie zunehmend auf ökologische Themen wie die Reduzierung von Treibhausgasemissionen. Trotz des anhaltenden Interesses und der vielen Artikel und Bücher, welche zum Thema Energieeffizienz geschrieben wurden, hat die genaue Definition des Begriffs wenig Aufmerksamkeit erhalten. Die Zielsetzung dieses Artikels ist daher eine kritische Überprüfung der Bandbreite möglicher Energieeffizienzdefinitionen und wie sie durch den Einsatz von Indikatoren operationalisiert werden können. Die methodischen Probleme, welche bei der Operationalisierung der unterschiedlichen Definitionen auftreten, werden ebenfalls diskutiert. Energieeffizienz ist ein generischer Begriff, somit existiert kein eindeutiger quantitativer Messwert. Stattdessen muss auf eine Reihe von Indikatoren zurückgegriffen werden, um eine Änderung der Energieeffizienz darzustellen. Im Allgemeinen bezieht sich Energieeffizienz darauf, die gleiche Menge von Produkten, Dienstleistungen oder besser "nützlichem Output" mit weniger Energie zu erzeugen. So könnte Energieeffizienz beispielsweise beinhalten, wie viel Energie notwendig ist, um eine Tonne Tomaten zu produzieren. Daher wird Energieeffizienz häufig durch eine Verhältniskennzahl definiert:

***nützlicher Output eines Prozesses / Energieeinsatz in einem Prozess***

Es stellt sich nun die Frage, wie der "nützliche Output" und der Energieeinsatz zu definieren sind. Diese Frage beinhaltet eine Reihe von wesentlichen methodischen Überlegungen, welche in der Diskussion im Gartenbau häufig ignoriert werden.

Eine Reihe von Indikatoren kann verwendet werden, um Änderungen im Bereich der Energieeffizienz zu quantifizieren. Diese lassen sich vier Hauptgruppen zuordnen (25):

1. Thermodynamisch: Diese Energieeffizienzindikatoren beruhen auf Maßen aus der Wissenschaft der Thermodynamik. Einige dieser Indikatoren sind einfache Verhältniskennzahlen, wohingegen andere komplexe Messungen beinhalten, welche sich auf den tatsächlichen Energieverbrauch in einem "idealen" Prozess beziehen.
2. Physikalisch-Thermodynamisch: Diese Indikatoren sind Hybridindikatoren, bei denen die Energiezufuhr noch in thermodynamischen Einheiten, der Output aber in physikalischen Einheiten gemessen wird. Die physikalischen Einheiten versuchen die Leistung des Prozesses zu quantifizieren, beispielsweise in Form von Tonnen eines Produktes oder in Tonnenkilometern bei Transporten.
3. Ökonomisch-Thermodynamisch: Diese Indikatoren sind Hybridindikatoren, bei denen der Output des Leistungserstellungsprozesses im Hinblick auf seine Marktpreise quantifiziert wird. Der Energieeinsatz wird wie bei den thermodynamischen und physikalisch-thermodynamischen Indikatoren mit konventionellen thermodynamischen Einheiten gemessen.
4. Ökonomisch: Diese Indikatoren messen Veränderungen der Energieeffizienz ausschließlich in Bezug auf die Marktpreise der In- und Outputs des Leistungserstellungsprozesses. Das heißt, sowohl die Energiezufuhr als auch der Output des Prozesses werden monetär bewertet.

In der Bundesrepublik weist die Freilandproduktion im Gemüse- und Zierpflanzenbau einen größeren Stellenwert als die Unterglasproduktion auf. Nur 1,8 Prozent der gartenbaulichen Nutzfläche werden für die Produktion in Gewächshäusern verwendet, häufig kombinieren Gartenbauunternehmen Freiland- und Gewächshausproduktion (16). Die Gewächshäuser werden überwiegend mit Heizöl und Erdgas beheizt (15; 29). Im Unterglasanbau betragen die Heizkosten 90 Prozent der Energiekosten insgesamt (31). Der Einsatz biogener Festbrennstoffe spielt hierbei nur eine vernachlässigbare Rolle (31; 43). Über 90 Prozent der Gartenbauunternehmen heizen mit

den Energieträgern Heizöl, Erdgas und Kohle (16; 15). Der Anteil der Unternehmen, welche nachwachsende Rohstoffe als Energieträger verwenden, liegt lediglich bei fünf Prozent (31; 43), wobei ein Prozent der Unternehmen ausschließlich mit Holz heizen, die anderen vier Prozent kombinieren Holz mit fossilen Energieträgern (29; 31). Die Gewächshäuser in Deutschland sind vergleichsweise alt, im Jahr 2005 stammten 43 Prozent der Unterglasanlagen aus den Jahren vor 1982 (16). Von den eingesetzten Heizanlagen waren im Jahr 2009 45 Prozent fünf bis 15 Jahre, 42 Prozent älter als 15 Jahre und nur 12 Prozent weniger als fünf Jahre in Betrieb (15; 29). Durch die Öffnung der Märkte stehen deutsche Gartenbauunternehmen im internationalen Wettbewerb mit klimatisch vorteilhafteren Regionen (31). Weiterhin können die kontinuierlich steigenden Energiepreise die Rentabilität beeinträchtigen (10). Dadurch wird vermutet, dass die Existenz besonders kleinerer und mittlerer Gartenbauunternehmen mit Unterglasproduktion in Deutschland bedroht ist (31; 14; 29).

## 1.1 Thermodynamische Indikatoren

In einer Hinsicht erscheinen thermodynamische Indikatoren der natürlichste Weg zu sein, um Energieeffizienz zu messen, da die Thermodynamik als die Wissenschaft der Energie und energetischer Prozesse gilt. Ein Vorteil von thermodynamischen Einheiten bei der Energieeffizienzmessung ist, dass sie im Hinblick auf "Zustandsfunktionen" des Prozesses berechnet werden. Dies bedeutet, dass sie eindeutige und objektive Kennzahlen für einen bestimmten Prozess in einer bestimmten Umweltsituation (vorgegebene/r Temperatur, Druck, Konzentration, chemische Formel, Magnetisierung und anderes) bereitstellen. So führt jede Veränderung der physikalischen Bedingungen, welche sich aus einem dynamischen Prozess ergibt, zu einer damit verbundenen Änderung der Werte der Zustandsfunktionen und kann somit eindeutig gemessen oder zugeschrieben werden. Gleichzeitig kann für eine bestimmte Veränderung der physikalischen Bedingungen der minimale Energiebedarf eindeutig berechnet werden.

### 1.1.1 Energieeffizienz erster Ordnung

Die Energieeffizienz erster Ordnung (erstes Gesetz der Thermodynamik) wird auch als thermische oder enthalpische Effizienz bezeichnet, da die Effizienz hinsichtlich der Wärmeinhalte der Ein- und Ausgänge des Prozesses und die "Wärmeinhalte" in Bezug auf ihre enthalpischen Werte gemessen werden ( $\Delta H$ ). Die enthalpische Effizienz jedes Prozesses ist daher der  $\Delta H$ -Wert des nützlichen Outputs eines Prozesses dividiert durch den  $\Delta H$ -Wert der Inputs eines Prozesses:

$$E_{\Delta H} = \Delta H_{out} / \Delta H_{in}$$

wobei

$E_{\Delta H}$  = enthalpische Effizienz

$\Delta H_{out}$  = Summe der nützlichen Energieoutputs eines Prozesses ( $\Delta H$ )

$\Delta H_{in}$  = Summe aller Energieinputs eines Prozesses ( $\Delta H$ )

Es soll darauf hingewiesen werden, dass der enthalpische Effizienzindikator nur den "nützlichen" Output miteinbezieht. Beispielsweise besitzt eine herkömmliche Glühbirne eine enthalpische Effizienz von etwa fünf Prozent (36). In diesem Prozess werden nur fünf Prozent des Inputs an elektrischer Energie ( $\Delta H$ ) in Lichtenergie umgewandelt, die restlichen 95 Prozent gehen als "Abfallwärme" an die Umgebungsluft verloren. Im Wesentlichen besagt das erste Gesetz der Thermodynamik, dass in jedem Umwandlungsprozess Energie weder erzeugt noch vernichtet werden kann. Aus diesem Grund wird die enthalpische Effizienz häufig als Erste-Gesetz-Effizienz oder Energieeffizienz erster Ordnung bezeichnet. Die Verwendung von enthalpischen ( $\Delta H$ )-Messungen von Energie verhindert eine Berücksichtigung der Qualität der Energie. Es wird keine Unterscheidung zwischen Energieformen hoher Qualität, welche nützlicher und produktiver sind, und Energieformen niedriger Qualität, welche weniger nützlich und produktiv sind, vorgenommen. Zum Beispiel wird einer Einheit Elektrizität (Energie hoher Qualität) implizit der gleiche Nutzen zugeordnet wie Solarenergie (Energie niedriger Qualität). Trotz dieses bekannten Nachteils von enthalpischen ( $\Delta H$ )-Werten in Bezug auf die Energiequalität werden diese Indikatoren noch immer in Studien zur Energieeffizienz, selbst auf makroökonomischer Ebene (beispielsweise 37; 34), verwendet.

Als Kriterium der Energieeffizienz hat sich in der Landwirtschaft der Quotient der eingesetzten Energie zur erzeugten Energie am weitesten verbreitet, teilweise wird dieser ergänzt durch den Quotienten der eingesetzten Energie zum Eiweißgehalt (40). Diese Indikatoren sind für den Gartenbau offensichtlich ungeeignet. Der Nutzen gartenbaulicher Produkte bemisst sich nicht nach ihrem Energiegehalt.

### 1.1.2 Energieeffizienz zweiter Ordnung – Verwendung des Arbeitspotenzials zur Berücksichtigung der Energiequalität

Ein wesentliches Problem der Energieeffizienz erster Ordnung ist, dass sie die Qualität der Energie der Inputs und nützlichen Outputs nicht berücksichtigt. Daher können die relativen Energieeffizienzen der Inputs und nützlichen Outputs zweier Prozesse nicht sinnvoll miteinander verglichen werden, sofern diese unterschiedliche Qualitäten aufweisen.

Eine Reihe von thermodynamischen Qualitätsmaßen kann verwendet werden, um den Input im Nenner umzuwandeln ( $\Delta H_{in}$ ). Die daraus resultierende thermische Effizienz bildet einheitliche Qualitätswerte, mit denen versucht wird, das Problem der energetischen Qualitäten zu überwinden. Diese Qualitätsmaße basieren auf dem zweiten Gesetz der Thermodynamik. Die International Federation of Institutes for Advanced Study (35) schlug als erste vor, den "Gibbs free energy change" ( $\Delta G$ ) zu verwenden, um die relative Energiequalität der Inputs zu quantifizieren. Wenn ein Prozess bei konstanter Temperatur und konstantem Druck durchgeführt wird, stellt die Abnahme der "Gibbs free energy" die maximale Arbeit dar, welche durch einen Prozess erbracht werden kann. Diese Abnahme der "Gibbs free energy" ( $\Delta G$ ) ist definiert als:

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S$$

wobei

$\Delta G$  = Veränderung der "Gibbs free energy"

$\Delta H$  = Änderung der Enthalpie

$T$  = Temperatur

$\Delta S$  = Änderung der Entropie

Andere Arbeitspotentiale, welche verwendet werden können, um die Energiequalität der Inputs angemessen darzustellen, können die Exergie und die verfügbare Arbeit beinhalten. Der Unterschied zwischen der verfügbaren Arbeit und der "Gibbs free energy" besteht darin, dass sich erstere auf den Druck und die Temperatur der realen Umgebung bezieht, während bei der letzteren ideale Referenzwerte herangezogen werden. Daher wird von den Befürwortern der verfügbaren Arbeit argumentiert, dass diese eine realistischere Messgröße der Arbeit darstellt, da sie real existierende physikalische Bedingungen berücksichtigt. Exergie ist eine ganz ähnliche Messgröße des Arbeitspotenzials und ist durch AHERN (1) wie folgt definiert: "die Arbeit, welche in einem Gas, einer Flüssigkeit oder einem Feststoff als Resultat eines Ungleichgewichtszustandes relativ zu einem Referenzzustand zur Verfügung steht." Der Referenzzustand, welcher am häufigsten verwendet wird, bezieht sich auf atmosphärische Bedingungen auf Höhe des Meeresspiegels, welcher als Senke für terrestrische Energiesysteme gilt. Auch wenn beide Messgrößen, die verfügbare Arbeit und die Exergie besser geeignet zu sein scheinen als die "Gibbs free energy", da sie explizit die Umweltbedingungen berücksichtigen wie sie im realen Produktionsprozess auftreten, so zeigen sich noch eine Reihe grundlegender Probleme. Erstens ist "Arbeit" nicht die einzige gewünschte Form eines nützlichen Outputs eines Prozesses, insbesondere im Unterglasanbau bei dem die Wärmeenergie eine erhebliche Bedeutung aufweist. Zweitens ist unklar, welche Art von Arbeit als Bezugsquelle für die Qualität verwendet werden sollte. Dies ist wesentlich, da nicht alle Formen der Arbeit (zum Beispiel chemische, elektrische, mechanische) gleichwertig sind oder notwendigerweise miteinander vergleichbar wären. Wird mechanische Arbeit als Bezugsgröße für die Qualität gewählt, so kann argumentiert werden, dass diese Auswahl keine fundierte theoretische Begründung aufweise, da mechanische Arbeit nur eine der vielen Energieformen gartenbaulicher Produktionsprozesse darstellt. Letztlich muss daher festgehalten werden, dass das Arbeitspotential als Bezugsgröße für die Vergleichbarkeit der Energieinputs, streng genommen, immer noch keine Lösung für das Energiequalitätsproblem darstellt wie es schon bei den Energieeffizienzindikatoren erster Ordnung anzutreffen war.

### 1.1.3 Energieeffizienz zweiter Ordnung – Ideale Grenzen

Ein weiterer Ansatz ist Energieeffizienz relativ zur "idealen" minimalen Energiemenge zu definieren, welche benötigt wird, um eine bestimmte Aufgabe auszuführen. Mathematisch ausgedrückt kann diese "ideale" Effizienz durch das folgende Verhältnis definiert werden:

$$\rho = E_{\Delta H(\text{actual})} / E_{\Delta H(\text{ideal})}$$

wobei

$\rho$  = Energieeffizienz zweiter Ordnung eines Prozesses bei der Durchführung einer bestimmten Aufgabe

$E_{\Delta H(\text{actual})}$  = tatsächliche enthalpische Effizienz eines Prozesses bei der Durchführung einer Aufgabe

$E_{\Delta H(\text{ideal})}$  = ideale enthalpische Effizienz um eine Aufgabe reversibel mit einem perfekten Instrument (Maschine, Prozess) durchzuführen

Dieses Verhältnis kann verwendet werden, um zu messen, wie nahe eine Energieumwandlung in der realen Welt einer idealen Effizienz kommt. Der effizienteste mögliche Prozess weist eine Effizienz von  $\bar{\eta} = 1$  auf. Häufig wird die Kelvin-Formel für die Umwandlung von Wärme in Arbeit verwendet:

$$M = \Delta H [(t_1 - t_2) / t_1]$$

wobei

$M$  = mechanische Arbeit erbracht durch den Umwandlungsprozess (J)

$\Delta H$  = Wärmeeintrag in den Umwandlungsprozess (J)

$t_1$  = Temperatur des Wärmeeintrags in den Umwandlungsprozess (K)

$t_2$  = Temperatur der Wärmeabgabe des Umwandlungsprozesses (K)

Die Temperaturunterschiede zwischen der Wärmequelle ( $t_1$ ) und der Wärmesenke ( $t_2$ ) begrenzen somit die Effizienz mit der Wärme in mechanische Arbeit umgesetzt werden kann. Ähnliche durch die Temperatur definierte Potenziale können die Höhe der Umwandlungseffizienz von verschiedenen Energiequellen und Endanwendungen abseits der Standardumwandlung von Wärmeenergie in mechanische Arbeit aufzeigen (25). Beispielsweise kann mit der Kelvin-Formel die maximale enthalpische Effizienz der Umwandlung von Wärme in Elektrizität berechnet werden ( $E_{\Delta H(\text{ideal})} = 71,2\%$  ( $t_1 = 1.000\text{ K}$ ,  $t_2 = 288\text{ K}$ )) und diese kann mit der tatsächlichen enthalpischen Effizienz deutscher Kraftwerke von etwa 30 Prozent verglichen werden. Somit beträgt die Energieeffizienz zweiter Ordnung ( $\bar{\eta}$ ) in diesem Fall 42 Prozent (30 % / 71,2 %). Energieeffizienzindikatoren ( $\bar{\eta}$ ) können bei einer Vielzahl von Prozessen verwendet werden, einschließlich chemischer Prozesse (beispielsweise 17), Transport (7), Wärmeübertragung (5; 2), Kühlung, Klimaanlage und Elektroantrieben. Ein praktisches, aber nicht theoretisches Problem liegt in der Bestimmung der idealen minimalen Energiebedarfe von Prozessen, da es nicht klar ist, ob solche Berechnungen zu einem eindeutigen Ergebnis führen (25).

Die Energieeffizienz zweiter Ordnung ist nützlich, um die Grenzen von idealen Prozessen zu bestimmen und so die theoretischen Energieeinsparungen aufzuzeigen, welche durch technische Verbesserungen erreicht werden können. Ihre Anwendbarkeit auf reale Systeme ist jedoch beschränkt. Die erste Einschränkung der Methode besteht darin, dass Sie grundsätzlich von einer perfekten Umkehrbarkeit ausgeht, welche äquivalent zu der Annahme unendlich langsamer Prozesse ist. Natürlich ist es bei Prozessen in der realen Welt erforderlich, dass diese auf eine bestimmte Zeit begrenzt sind. Eine chemische Reaktion muss beispielsweise innerhalb einer bestimmten Zeit stattfinden, um einen wirtschaftlichen Nutzen aufzuweisen, und alle Motoren müssen bei tatsächlichen Betriebsbedingungen der menschlichen Ungeduld genügen, was wiederum eine ganze Reihe von unvermeidlichen Verlusten (wie

Reibungsverlusten) nach sich zieht.

ANDERSEN et al. (3) und WU (48) haben Optimierungsmethoden entwickelt, um die Annahme vollkommener Umkehrbarkeit (unendlich langsamer Prozesse), welche der Berechnung der "idealen" Energieeffizienz zugrunde liegt, zu überwinden. Diese Methode, die "Thermodynamik endlicher Zeit", beinhaltet Minimalanforderungen an Maschinen. Es kann argumentiert werden, dass ANDERSEN et al. durch die Abkehr von der Annahme unendlicher Zeit ausdrücklich anerkennen, dass sogenannte subjektive Faktoren wie die "menschliche Ungeduld" bei der Berechnung der Energieeffizienz von Bedeutung sind. Der Nutzen ihrer Methoden besteht darin, dass sie explizit den Trade-Off zwischen Zeitbeschränkungen und Energieverbrauch berücksichtigen.

Die zweite Einschränkung der Methode der "idealen Grenzen" als Definition der Energieeffizienz ist, dass sie nicht geeignet ist, den indirekten Energieeinsatz zu berücksichtigen. VAN GOOL (45) macht diesen Punkt anhand einer Reihe von Beispielen deutlich, einschließlich der Erhöhung der Dauer eines Wärmetauschprozesses, um den Anteil an verfügbarer Wärme zu erhöhen. In der Regel, jedoch nicht immer, existiert ein Optimum zwischen zusätzlichen Kapitalinvestitionen, um Prozessenergie zu "sparen", und der Energie, welche indirekt durch die Herstellung des Investitionsgutes "verloren" gegangen ist. Die Methode der "idealen Grenzen" ist nicht in der Lage diesen Faktor zu berücksichtigen. Durch die Einbeziehung des indirekten Energieeinsatzes zeigt sich abermals das Problem der Berücksichtigung der Energiequalitäten, da im indirekten Energieeinsatz wiederum eine Vielzahl von unterschiedlichen Energieinputs, welche in den Herstellungsprozess des Investitionsgutes eingeflossen sind, berücksichtigt werden müssten.

## 1.2 Physikalisch-thermodynamische Indikatoren

Eine Kritik an den traditionellen thermodynamischen Indikatoren der Energieeffizienz ist, dass sie bei der Messung des Outputs eines Prozesses nicht berücksichtigen, inwieweit er dem durch den Verbraucher definierten Verwendungszweck entspricht. Das heißt der Zähler von thermodynamischen Effizienz Kennzahlen ist entweder die Wärmeenergie (Effizienz erster Ordnung) oder eine Art Arbeitspotential (Effizienz zweiter Ordnung). Natürlich bewerten die Verbraucher den Output eines Prozesses nicht auf Grundlage seines Wärmegehaltes oder seines Arbeitspotentials. Aus diesem Grund wurden Verhältnisskennzahlen für die Energieeffizienz entwickelt, welche den Output in physikalischen und nicht in thermodynamischen Einheiten quantifizieren. Diese physikalischen Einheiten richten sich speziell nach dem Verwendungszweck des Outputs eines Prozesses, wie er vom Verbraucher benötigt wird. Beispielsweise ist der gewünschte Output eines Gütertransportprozesses die Beförderung einer bestimmten Masse von Fracht über eine gegebene Strecke. Dieser Output kann daher durch Tonnenkilometer gemessen werden. Somit könnte ein entsprechendes Energieeffizienzmaß für den Gütertransport wie folgt beschrieben werden:

**Output (Tonnenkilometer) / Energieeinsatz ( $\Delta H$ )**

Ein Vorteil dieser physikalischen Einheiten ist, dass sie wie die thermodynamischen Einheiten objektiv gemessen werden können. Zudem besitzen sie gegenüber thermodynamischen Einheiten den Vorteil, dass sie direkt widerspiegeln, welchem Verwendungszweck ein Prozess dient und welcher Output vom Verbraucher tatsächlich benötigt wird. Da es sich um physikalische Einheiten handelt, können die errechneten Effizienzen ohne Weiteres in Zeitreihenanalysen verglichen werden. Das heißt es treten keine Schwierigkeiten bei Zeitreihenanalysen auf wie sie bei der Verwendung von ökonomischen Indikatoren aufgrund von Marktpreisschwankungen vorkommen.

Wenn hybride physikalisch-thermodynamische Indikatoren verwendet werden sollen, ist es angebracht, diese für jede Sparte des Gartenbaus gesondert zu entwickeln, da jede Sparte spezifische Standards für die Outputs der Leistungserstellungsprozesse aufweist. Es ist fraglich, ob beispielsweise ein Vergleich physikalisch-thermodynamischer Effizienzen zwischen Gemüse- (Indikatoren sind beispielsweise  $\text{MJ kg}^{-1}$  oder  $\text{GJ ha}^{-1}$ , 38) und Zierpflanzenbau (Indikator beispielsweise MJ per Stängel, 46) überhaupt sinnvoll möglich ist. Im Wohn- und Objektbereich, wie auch bei Gewächshäusern, ist eines der häufig verwendeten Effizienzmaße der Energieinput pro Flächeninhalt ( $\text{ha}$  oder  $\text{m}^2$ ), obwohl dieses Maß mehrere Unzulänglichkeiten aufweist, um die gesamte Energieeffizienz eines Gebäudes zu messen. In einigen Fällen wird dieser Indikator bereinigt um die Außentemperatur (da ein wesentlicher Teil des Energieverbrauchs von Gebäuden durch deren Heizung und Kühlung verursacht wird).

Verschiedene Arten von physikalisch-thermodynamischen Indikatoren können für den Transport verwendet werden. Die Outputmessung muss das Ziel des jeweiligen Transportprozesses berücksichtigen. Für den Gütertransport wäre daher das Verhältnis zwischen Energieinput und Tonnenkilometern ein geeigneter Indikator, da es die Funktion des Gütertransports ist, eine Fracht (gemessen in Tonnen) eine bestimmte Strecke (gemessen in Kilometern) zu bewegen, auch wenn die Zielsetzung einer optimalen Logistik noch weitere Punkte beinhaltet wie zur richtigen Zeit, die richtige Menge, in der richtigen Qualität an den richtigen Ort, möglichst kosteneffizient zu liefern. Für den Personentransport kann der Energieinput pro Personenkilometer ein geeigneter Indikator für die Energieeffizienz des Prozesses darstellen. Der Energieinput pro Fahrzeugkilometer kann als ungeeignet erachtet werden, da das Ziel des Personentransports die Bewegung von Menschen über große Entfernungen ist und nicht fast leere Fahrzeuge über bestimmte Distanzen zu bewegen. Für viele Transportvorgänge kann argumentiert werden, dass das Ziel des Prozesses nicht die Tonnenkilometer oder Personenkilometer, sondern die Tonnenkilometer oder Personenkilometer pro Zeiteinheit darstellen. Dies liegt daran, dass Geschwindigkeit und die Notwendigkeit die Transportzeit zu minimieren wesentliche Zielsetzungen vieler Güter- und Personentransportprozesse sind. Diese Zielsetzung gilt für die gartenbauliche Produktion mit ihrer geringen Lagerfähigkeit besonders. Daher könnte argumentiert werden, dass Transporteffizienzindikatoren so angepasst werden müssen, dass der zeitliche Aspekt, welcher für die meisten Transportvorgänge wesentlich ist, Berücksichtigung findet.

Aufgrund der relativen Heterogenität des Gartenbaus im Hinblick auf seine unterschiedlichen Produkte und Dienstleistungen, welche von den verschiedenen Sparten bereitgestellt werden, ist jeder Versuch ein physikalisches Outputmaß für die aggregative Quantifizierung zu entwickeln vergeblich. In anderen Branchen kann das Produkt in Bezug auf seine Masse gemessen werden. In diesen Fällen können die folgenden Indikatoren geeignet sein. Die Produkte des Gartenbaus sind hierfür zu vielfältig.

Die Messung der Energieeffizienz mit physikalisch-thermodynamischen Indikatoren ist nicht so unkompliziert wie sie auf den ersten Blick erscheinen mag, in erster Linie aufgrund der sogenannten Kuppelproduktion oder dem Problem der eindeutigen Zuordnung von Energieinput zu Prozessoutput. Dies bezieht sich auf die Schwierigkeiten bei der Zuordnung des Energieinputs auf mehrere Outputs

desselben Prozesses, Betriebes oder der gesamten Branche.

### 1.3 Ökonomisch-thermodynamische Indikatoren

Diese Indikatoren sind Hybridindikatoren, bei denen der Energieinput in thermodynamischen Einheiten, der Output aber in Bezug auf seinen Marktwert (in Euro) gemessen wird. Diese Indikatoren können auf verschiedenen Ebenen der Aggregation wirtschaftlicher Aktivität angewendet werden, beispielsweise auf Produkt-, sektoraler oder nationaler Ebene.

#### 1.3.1 Energie zur Wertschöpfung einer wirtschaftlichen Aktivität

Das Verhältnis zwischen Energieinput ( $\Delta H$ ) und Output (in Euro) kann sowohl auf nationaler als auch auf sektoraler Ebene angewendet werden. Das Hauptproblem des Verhältnisses von Energieinput zu wertmäßigem Output ist, dass es wenig Aufschluss über die zugrunde liegende technische Energieeffizienz gibt (47). Andere Faktoren wie Veränderungen im Branchenmix der Wirtschaft (19), die Substitutionsbeziehung zwischen Energie und Arbeit (28), sowie Änderungen des Energieinputmixes (22) können das Verhältnis zwischen Energieinput und Wertschöpfung auf Unternehmensebene beeinflussen. Diese Faktoren sind allerdings größtenteils von der technischen Energieeffizienz unabhängig. Von PATTERSON (23) und anderen wurden Methoden entwickelt, um speziell diese externen Faktoren beim Verhältnis von Energie und Wertschöpfung auszuschließen und die zugrunde liegende technische Energieeffizienz zu isolieren.

Auf sektoraler Ebene können solche Verhältnisse durch die Verwendung von amtlichen Statistiken oder aus der Durchführung von algebraischen Manipulationen der Input-Output-Tabellen ermittelt werden (9). Diese sektoralen Verhältnisse können entweder die Primärenergie oder die Gesamtenergie beinhalten. Der direkte Energieverbrauch berücksichtigt nur die Energie, welche direkt von einem Sektor verbraucht wird. Die Gesamtenergie berücksichtigt auch die Energie, welche indirekt durch einen Sektor verbraucht wird, das heißt auch die Energie, welche verwendet wurde, um die Rohstoffe, Dienstleistungen und andere Vorleistungen für den jeweiligen Sektor bereitzustellen. Beispielsweise verwendet ein Gartenbauunternehmen eine bestimmte Menge an direkter Energie, um sein Gewächshaus zu heizen oder seine Maschinen zu betreiben (zum Beispiel Diesel für den Traktor), aber es benötigt auch weitere Materialien für den Produktionsprozess (zum Beispiel Dünge- und Pflanzenschutzmittel), für deren Herstellung wiederum Energie benötigt wird (die Energie, welche erforderlich ist, um diese Vorleistungen zu produzieren, wird als indirekte Energie bezeichnet).

#### 1.3.2 Energieproduktivitätsverhältnis

Die Energieproduktivität ist der Kehrwert des Verhältnisses von Energieinput zu Wertschöpfung dividiert durch den Energieverbrauch (E). Eine detaillierte Begründung für das Monitoring der Energieproduktivitätsveränderungen in der US-Wirtschaft ist in der Veröffentlichung des Joint Economic Committee of the Congress of the United States (27) beschrieben. Die Energieproduktivität wird als Möglichkeit betrachtet, die Aufmerksamkeit auf die produktive Nutzung von Energie zu lenken und dient als ergänzende Kennzahl zu der etablierten Kapital- und Arbeitsproduktivität, welche in der ökonomischen Analyse verwendet wird. Die Betrachtung der Energieproduktivität kann darüber Aufschluss geben, inwieweit Energie als Komplement oder Substitut dieser anderen Faktoren dient (39).

Die unkritische Verwendung der Energieproduktivität, wie das Verhältnis von Energieinput zu Wertschöpfung, kann zu irreführenden Schlussfolgerungen führen. Beispielsweise kann die Energieproduktivität sinken, wenn Energie menschliche Arbeit substituiert, ohne dass es zu einer Verschlechterung der zugrunde liegenden technischen Energieeffizienz gekommen ist. Um dieses analytische Problem zu überwinden, können Techniken der etablierten ökonomischen Modellierung verwendet werden, um die Grenzproduktivität der Energie zu berechnen. Diese Kennzahl misst den marginalen Effekt auf den Output (in Euro) durch die Erhöhung des Energieinputs ( $\Delta H$ ) um eine Einheit.

### 1.4 Ökonomische Indikatoren

Der Output wird bei den ökonomisch-thermodynamischen Indikatoren der Energieeffizienz hinsichtlich seines Marktwertes (in Euro) quantifiziert. Der Energieinput dieser Hybridindikatoren wird jedoch immer noch in thermodynamischen Einheiten gemessen. Es kann argumentiert werden, wie es einige Ökonomen tun, dass sowohl der Input als auch der Output eines Prozesses im Hinblick auf ihren wirtschaftlichen Wert (in Euro) bewertet werden sollten. Es wird beispielsweise durch das Joint Economic Committee of the Congress of the United States (27) angeführt, dass das Verhältnis von Energie-Dollar zu BIP ein "... more accurate reflection of the economic productivity of energy, provided that energy prices reflect energy supply and demand forces ..." (das heißt präziser im Vergleich zum Verhältnis Energieinput ( $\Delta H$ ) zu BIP). Von TURVEY, NORBAY (42) und BERNDT (6) wird zusätzlich angeführt, dass die Verwendung von Energiepreisen anstatt thermodynamischen Einheiten für die Messung des Energieinputs eine Lösung für das Problem der Berücksichtigung unterschiedlicher Energiequalitäten bietet – das heißt das Problem einer gültigen Addition von Energieinputs unterschiedlicher Qualitäten. TURVEY, NORBAY (42) und BERNDT (6) schlagen die Verwendung von "idealen Preisen" für die Messung des Energieinputs vor. Diese idealen Preise spiegeln entweder die Grenzrate der Transformation in der Produktion oder die Grenzrate der Substitution beim Verbrauch unterschiedlicher Energieformen wieder. Die Verwendung von idealen Preisen zur Messung des Energieinputs könnte auf operativer Ebene aufgrund von Schwierigkeiten bei der Berechnung dieser idealen Preise in einer messbaren, konsistenten, von Annahmen freien Weise problematisch sein. Es existieren auch Hinweise darauf, dass solche idealen Preise im Zeitverlauf Schwankungen unterliegen, wohingegen thermodynamische Einheiten konstant bleiben. Neben den theoretischen und operativen Problemen bei der Verwendung von Preisen zur Messung des Energieinputs bei Energieeffizienzindikatoren, könnte auf grundlegender Ebene argumentiert werden, dass ein rein ökonomischer Indikator für die Energieeffizienz nicht wirklich ein Indikator für die Energieeffizienz darstellt, da er wenig Rückschlüsse auf die technische Energieeffizienz zulässt.

Andere rein ökonomische Indikatoren der Energieeffizienz können auf nationaler, sektoraler und Unternehmensebene entwickelt werden, indem die Energieinputs, auf Grundlage der entsprechenden Energiepreise, in monetäre Einheiten umgerechnet werden. Diese anderen Indikatoren wären Analogien zu ihren physikalisch-thermodynamischen Pendanten. Obwohl die Entwicklung solcher rein ökonomischen Indikatoren möglich ist, so werden sie laut PATTERSON (25) nicht für das Monitoring der Energieeffizienz eingesetzt. Eine weitere Möglichkeit, welche vom Joint Committee (27) vorgeschlagen wird, ist die Verwendung der Energiekosteneinsparung. Diese hat den Vorteil, die Öffentlichkeit oder die Unternehmensführung direkt darüber zu informieren, wie viel Kosten durch eine Verbesserung der Energieeffizienz eingespart werden können. Es wird argumentiert, dass ein solcher Indikator die Energieeffizienz in einer Form darstellt,

welche von jedem verstanden werden kann. Diese ökonomischen Indikatoren können auf nationaler, sektoraler oder Unternehmensebene entwickelt werden, stellen aber keinen Ökoeffizienzindikator im klassischen Sinne dar.

## 2 Methodische Aspekte bei der Operationalisierung von Energieeffizienzindikatoren

Es existieren eine Reihe von methodischen Problemen und Fragen, welche mit der Operationalisierung von Energieeffizienzindikatoren verbunden sind. Der überwiegende Teil dieser methodischen Probleme bezieht sich auf alle Energieeffizienzindikatoren, wohingegen einige Probleme nur bei bestimmten Indikatoren auftreten. Politische Akteure und Praktiker tendieren beim Einsatz von Energieeffizienzindikatoren dazu, die Auswirkungen dieser methodischen Probleme zu unterschätzen oder sie schlicht zu ignorieren.

### 2.1 Bewertungen und Werturteile

Die Schlussfolgerung in einem Teil der Literatur ist, dass die thermodynamischen Indikatoren der Energieeffizienz objektiv und frei von Werturteilen seien. Dies ist in gewissem Sinne wahr, da bei Verwendung einer bestimmten thermodynamischen Formel zwei unabhängige Beobachter das gleiche Ergebnis bei der Berechnung der Energieeffizienz erhalten (4). Dies setzt natürlich voraus, dass beide die entsprechenden Fähigkeiten für die Durchführung der Berechnung besitzen und das Problem eindeutig definiert ist. Darüber hinaus bleibt die thermodynamische Effizienz im Zeitverlauf konstant und unterliegt keinen exogenen Schwankungen. Dies steht im Gegensatz zu Indikatoren der Energieeffizienz, welche auf ökonomischen Einheiten (in Euro) basieren, da diese die Präferenzen und Verhaltensweisen von Menschen beinhalten, deren Veränderung sich auch in den Marktpreisen (in Euro) widerspiegeln.

Dennoch ist es nicht richtig zu unterstellen, thermodynamische Indikatoren der Energieeffizienz seien frei von menschlichen Werturteilen und Wahrnehmungen. Die gängigste Methode thermodynamische Energieeffizienz allgemein zu definieren ist:

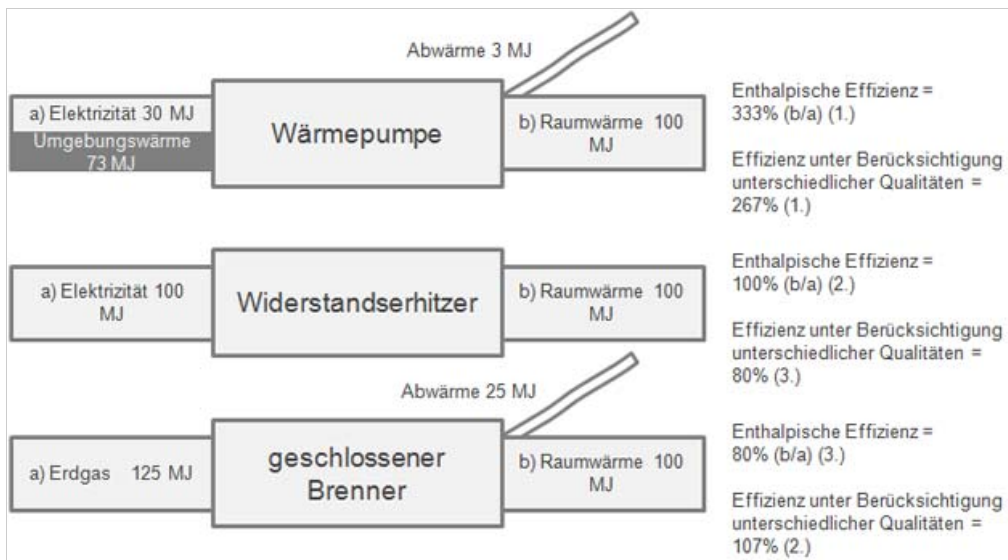
*nützlicher Energieoutput / Energieinput*

Von zentraler Bedeutung bei der Betrachtung dieses Verhältnisses ist, was unter nützlichem Energieoutput zu verstehen ist. Die Definition von "nützlich" erfordert implizit eine gewisse Zuordnung von menschlichen Wertungen, um festzulegen, was als nützlicher Output gelten kann. Die sogenannte unnützliche oder Abfallenergie (zum Beispiel Abwärme) geht in die Berechnung der thermodynamischen Energieeffizienz nicht mit ein. Daher liegen allen Definitionen thermodynamischer Energieeffizienz Werturteile zugrunde. BOULDING fasst dieses Problem in seiner Kritik an thermodynamischen Indikatoren der Energieeffizienz im sozialen Kontext wie folgt zusammen: "In applying physical concepts like energy to social and economic systems, certain pitfalls have to be avoided, some of which are very easy to fall into. In the first place, it is very important to recognize that all significant efficiency concepts which are based on purely physical inputs and outputs may not be significant in human terms, or at least the significance has to be evaluated. The more output per unit of input the more efficient we suppose it to be. The significance of the efficiency concept, however, depends on the significance of the outputs and inputs in terms of human valuations" (8 zitiert nach 25).

Wenn davon ausgegangen wird, dass Bewertungen und Werturteile integrale Bestandteile einer jeden Definition von Energieeffizienz sind, stellt sich die Frage, welche Methode geeignet ist, den Energieinputs und Energieoutputs eines bestimmten Prozesses einen Wert zuzuweisen. Es wird zunehmend erkannt, dass der Wert eines Energieinputs daran gemessen werden kann, welchen Beitrag er für den Endverwendungszweck leisten kann (beispielsweise 12). Keiner der thermodynamischen Indikatoren der Energieeffizienz misst den Output im Hinblick auf eine angemessene Leistungserbringung bezüglich des Verwendungszweckes. Stattdessen messen sie den Wert oder die Qualität eines Energieinputs in Form einer willkürlich gewählten Bezugsgröße – Wärmehalt ( $\Delta H$ ), Arbeitspotential ( $\Delta G$ ) oder einer idealen Grenze, welche durch die restriktive Annahme unendlich langsamer Prozesse definiert ist. Offensichtlich ist weder der Wärmehalt noch die Arbeit der einzige erforderliche Verwendungszweck von Energie in einer Wirtschaft; daher müsste eine Methodik entwickelt werden, welche alle Verwendungszwecke von Energie in einer Wirtschaft, wie Licht, Tonerzeugung, mechanischen Antrieb, Heizung, chemische Umwandlung, Kühlung, Pumpen und so weiter berücksichtigt.

### 2.2 Problem unterschiedlicher Energiequalitäten

Das Energiequalitätsproblem tritt auf, wenn versucht wird, die Energieeffizienz in komplexen Wirtschaftskreisläufen oder -systemen zu messen, das heißt in Systemen und Prozessen, in denen viele Quellen und Verwendungszwecke von Energien unterschiedlicher Qualitäten existieren. Bevor eine Energieeffizienzberechnung vorgenommen werden kann, müssen die Energiewerte in Bezug auf ihre jeweilige Energiequalität angemessen angepasst oder umgerechnet werden. Dieses Problem entsteht immer dann, wenn enthalpische Werte ( $\Delta H$ ) verwendet werden (welche die am häufigsten verwendete Art der Energiemessung darstellen). Enthalpische Werte ( $\Delta H$ ) der Energieformen messen lediglich deren Wärmehalt und unterscheiden nicht zwischen Energieträgern geringer Qualität (wie Kohle) und hoher Qualität (wie zum Beispiel Strom). Auf dieser Grundlage kann argumentiert werden, dass Energien, sofern sie enthalpisch gemessen werden, nicht aufaddiert und verrechnet werden können, da sie unterschiedliche Qualitäten aufweisen können (21; 30). Das Energiequalitätsproblem ist daher ein grundlegendes Problem bei der Konstruktion konzeptionell solider Energieeffizienzindikatoren. Auf Makro-Ebene stellt sich das Energiequalitätsproblem beispielsweise bei der Berechnung des Energie/BIP-Verhältnisses, wenn die Summe der Energieinputs berechnet werden soll. In diesem Fall existieren unterschiedliche Qualitäten der primären Energieinputs in den Leistungserstellungsprozessen einer Volkswirtschaft. Es muss bei der Berechnung des gesamten Energieinputs auf eine Berücksichtigung der unterschiedlichen Energiequalitäten geachtet werden. Das Energiequalitätsproblem ist vielleicht noch akuter und problematischer auf der Mikroebene, wo der Analytiker versucht, Energieinputs in verschiedenen Qualitäten und möglicherweise auch Energieoutputs in verschiedenen Qualitäten zu vergleichen, beispielsweise beim Vergleich der Energieeffizienzen dreier Heizungstechnologien (siehe Abbildung 1).



**Abbildung 1:** Ranking dreier Prozesse nach enthalpischer Effizienz und eines um die Qualitäten angepassten Indikators.

Beim Vergleich der enthalpischen Effizienz der Prozesse eins und zwei kann abgelesen werden, dass Prozess eins effizienter ist als Prozess zwei. Das heißt wenn Elektrizität in Raumwärme umgewandelt werden soll, ist die Wärmepumpentechnologie mit einer enthalpischen Effizienz von 333 Prozent effizienter als die Widerstandserhizertechnologie mit 100 Prozent. Dieser Vergleich kann gezogen werden, da Gleiches mit Gleichem verglichen wird – beide Prozesse besitzen den gleichen Input (Elektrizität) und den gleichen Output (Raumwärme). In der Tat ist es nicht entscheidend, ob die Werte von Elektrizität oder Raumwärme in enthalpischen Einheiten ( $\Delta H$ ) oder in anderen Messgrößen quantifiziert werden, solange die gleichen Einheiten konsequent bei der Messung der beiden Prozesse eingesetzt werden. Beispielsweise könnten die Elektrizitätswerte in Form von Kilowattstunden gemessen werden und genau die gleichen relativen Effizienzen würden beim Vergleich von Prozess eins und zwei erreicht werden.

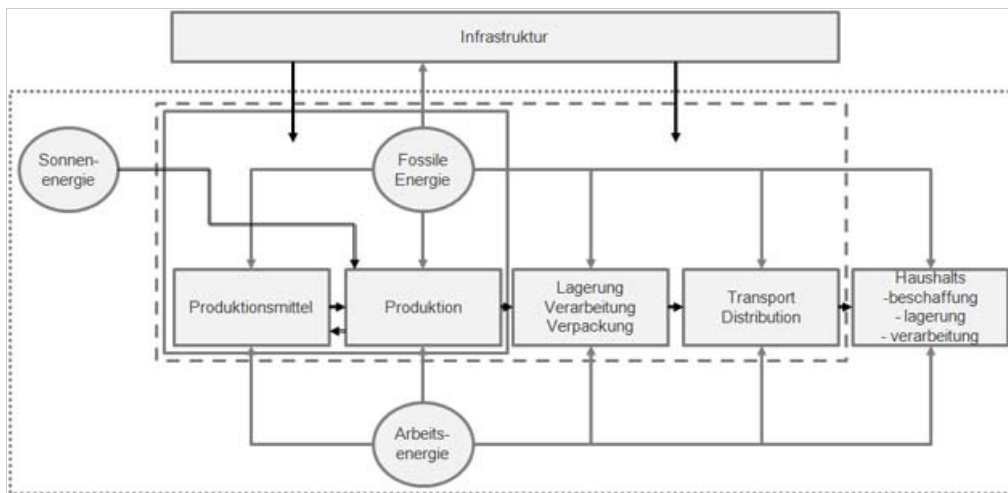
Das Energieeffizienzproblem kommt zum Tragen, sofern versucht wird die relative Effizienz des Prozesses drei mit denen von Prozess eins und zwei zu vergleichen. Dies liegt daran, dass Prozess drei als Input keine Elektrizität wie Prozess eins und zwei, sondern Erdgas beinhaltet. Der Analytiker ist somit mit dem Problem des Vergleichs zweier Energieinputs in unterschiedlichen Qualitäten (Elektrizität gegenüber Erdgas) konfrontiert, denn die herkömmlichen enthalpischen Maße berücksichtigen diese Qualitätsunterschiede nicht. Folglich stellt ein enthalpischer Energieeffizienzindikator keine hinreichende Möglichkeit eines Vergleiches dieser Prozesse dar. Nachdem die Energieeffizienzfaktoren berücksichtigt werden, ändert sich die Rangfolge der Energieeffizienz dieser Prozesse (Technologien). Anstelle des ineffizientesten Prozesses (gemessen durch enthalpische Energieeffizienzindikatoren) ist die Umwandlung von Erdgas in Raumwärme der zweiteffizienteste Prozess, sofern die Energiequalitäten miteinbezogen werden. Der Artikel von PATERSON (24) gibt einen Überblick über die verschiedenen Ansätze für den Umgang mit dem Energiequalitätsproblem, einschließlich thermodynamischer Maße und ihrer abgeleiteten Maße, zum Beispiel OECD-Wärmeäquivalente und fossile Treibstoffäquivalente. Jeder dieser Ansätze wurde kritisch geprüft und als ungeeignet für die Messung der Energiequalität in komplexen ökonomischen Systemen, in denen eine ganze Reihe von Prozessen, Energiequellen und Verwendungszwecken gleichzeitig vorkommen, bewertet.

### 2.3 Problem der klaren Abgrenzung

Jede Energieeffizienzmessung impliziert die Festlegung von Systemgrenzen. Auf der Ausgangsseite werden, wie schon beschrieben, nur Outputs berücksichtigt, welche nützlich sind. Auf der Eingangsseite ist die Situation teils noch problematischer, da häufig recht willkürliche und kaum begründete Grenzen gezogen werden. Bei der Energieeffizienzberechnung werden nur bestimmte Energieinputs berücksichtigt und andere von den Berechnungen ausgeschlossen, da sie sich außerhalb der definierten Systemgrenzen befinden. Nichtkommerzielle "freie" Energieinputs sind häufig ausgenommen, das heißt Energieinputs, welche nicht am Markt mit einem entsprechendem Preis erworben werden müssen.

Solarenergie in Form von Sonnenstrahlung ist ein weiterer Energieinput, welcher bei der Berechnung von Energieeffizienzindikatoren nicht berücksichtigt wird, da er kostenlos als freies Gut zur Verfügung steht. Diese Vorstellung ist allerdings in den meisten Fällen ein Irrtum, da oft ein erheblicher Investitions- und somit finanzieller Aufwand nötig ist, um die Sonnenstrahlung nutzen zu können, so beispielsweise zur solaren Warmwasserbereitung. Neben dieser untergeordneten Anwendung ist die Solarenergie in Form von Sonnenstrahlung der bedeutendste Energieinput im Gartenbausektor. Sie wird über die Photosynthese in chemische Energie umgewandelt. Diese Energie wird in amtlichen Statistiken und somit bei nationalen Energieeffizienzindikatoren nicht berücksichtigt, da sie als freie Energiequelle gilt. In Abbildung 2 wird ersichtlich, dass die Systemabgrenzung auf wesentliche Herausforderungen stößt, da alle Subsysteme einer Volkswirtschaft miteinander verzahnt sind. In der Darstellung wird dieser Umstand durch den Begriff der Infrastruktur angedeutet. Der Gartenbau nimmt diese Infrastruktur in vieler Hinsicht in Anspruch. Zu nennen sind hier beispielsweise das Verkehrsnetz, die Informations- und Kommunikationsnetze sowie das Verwaltungs- und Wissenschaftssystem. Der Energieeinsatz in diesen Bereichen wird beispielsweise in der Analyse von STORCK der Systemumwelt zugerechnet (Abbildung 2) (41).





**Abbildung 2:** Energiefluss-Modell des gartenbaulichen Produktions- und Absatzsystems.

**Quelle:** Eigene Darstellung (41).

Der Faktor beschränkt sich zwar auf den Energieeinsatz in der Produktion, es soll jedoch dargestellt werden, dass Schlussfolgerungen bezüglich der Vorteilhaftigkeit einer Alternative die nachgelagerten Bereiche der Vermarktung und des Konsumenten in die Überlegung einzubeziehen haben (41). Aus diesen Gründen wird auf Produktebene häufig gefordert, den gesamten Produktlebenszyklus in die Bewertung der Energieeffizienz miteinzubeziehen. In der Produktlebenszyklusbetrachtung wird oftmals ersichtlich, dass ein Großteil des Energieeinsparpotenzials beim Konsumenten liegt (beispielsweise 46). Die Forderung einer ganzheitlichen Betrachtung des Produktlebenszyklus erscheint aus technisch-theoretischer Perspektive sinnvoll. Eine Berechnung und Bewertung in dieser Weise ist jedoch so komplex, dass der Einsatz in der Unternehmenspraxis mit einem zu hohen Erhebungsaufwand verbunden sein wird. Die Ökonomie als anthropozentrische Wissenschaft betrachtet den Nutzen für den Menschen und bewertet seine Entscheidungen und Verhaltensweisen nicht. Ein Prozess ist effizient, sofern er einen möglichst hohen Nutzen bei gegebenem Faktoreinsatz schafft. Daher ist eine Betrachtung des Energieeinsatzes beim Konsumenten am Ende des Produktlebenszyklus nicht zwingend erforderlich. Geht es jedoch um eine nachhaltige Entwicklung insgesamt, so sind die Konsummuster (Suffizienzstrategie) miteinzubeziehen.

Eine weitere Dimension des Abgrenzungsproblems, welche durch die IFIAS (International Federation of Institutes for Advanced Studies) (35) hervorgehoben wurde, ist, wieweit der Primärenergieeinsatz zurückverfolgt werden sollte. Sollte beispielsweise bei Energieinputs in Form von raffiniertem Erdöl der Verlust an Energie bei der Raffination des Rohöls berücksichtigt werden? Werden die Verluste mitaufgenommen, so erhöht sich der Wert des Energieinputs ( $\Delta H$ ) des Energieeffizienzindikators. Dies wiederum führt zu einer Abnahme der gemessenen Energieeffizienz eines jeden Prozesses, welcher raffiniertes Öl verwendet. Wenn solche Unterschiede bei der Energieeffizienzberechnungsmethodik dem Analysten nicht präsent sind, so kann dieser zu falschen Interpretationen der Ergebnisse kommen, sofern eine Verschiebung hin zu oder weg von der Verwendung solcher raffinierten Ölprodukte stattfindet. Ein weiteres eher philosophisches Beispiel wäre, ob nicht auch die solare Energie berücksichtigt werden müsste, welche bei der Entstehung des Rohöls eingeflossen ist. Einige Autoren, wie der führende Umweltökonom CONSTANZA (11), schlagen vor, Solarenergieinputs in dieser Weise zu berücksichtigen.

## 2.4 Problem der Kuppelproduktion

Das Kuppelproduktionsproblem bezieht sich auf die Schwierigkeit der Zuordnung eines Energieinputs auf mehrere Outputs eines Prozesses oder Systems. Dieses Problem entsteht besonders bei der Berechnung von physikalisch-thermodynamischen Energieeffizienzindikatoren – beispielsweise bei der Berechnung des Indikators Energieinput ( $\Delta H$ ) zu Output (kg), wenn mehrere Outputs produziert werden; so beim Anbau zweier oder mehrerer Kulturen in einem Gewächshaus. Das Problem entsteht, wenn die Eingangsenergie (MJ) den unterschiedlichen Outputs (kg) zugeordnet werden soll. Die IFIAS (35) empfiehlt vier mögliche Konventionen, um das Kuppelproduktionsproblem zu lösen:

- Alle Energieverbräuche dem Output von Interesse zuordnen,
- den Energieinput proportional zum finanziellen Wert oder Zahlungsstrom des Outputs zuweisen,
- den Energieinput proportional zu einem bestimmten physikalischen Parameter, welcher für das System charakteristisch ist, zuordnen (zum Beispiel Gewicht, Volumen oder Energiegehalt),
- den Energiebedarf proportional zu den Grenzenergieeinsparungen zuweisen, welche realisiert werden würden, sofern ein Produkt oder eine Dienstleistung nicht erstellt werden würde.

Alle diese Konventionen sind willkürlich und keine von ihnen hat eine breite Akzeptanz gewonnen.

## 2.5 Technische- oder Bruttoenergieeffizienz

Die meisten Energieeffizienzindikatoren in diesem Artikel beschreiben Bruttoenergieeffizienzindikatoren eines Prozesses, Systems oder Wirtschaftssektors. WILSON et al. (47) weisen darauf hin, dass dies zu Schwierigkeiten und Missverständnissen bei der Interpretation dieser Indikatoren führen kann. Im Falle eines Bruttoenergieeffizienzindikators, wie zum Beispiel dem Energie- zu Wertschöpfungsverhältnis, beinhaltet dieser eine Zahl von anderen strukturellen Einflussfaktoren, welche die numerische Größe des Indikators wesentlich beeinflussen können, aber nichts mit der zugrunde liegenden technischen Energieeffizienz gemein haben. Politikbeobachter sind häufig fokussiert auf technische Verbesserungen der Energieeffizienz und beachten Veränderungen des Branchenmixes, des Energieinputmixes und der Substitution von Arbeit durch Energie (Maschinen) nicht, obwohl diese einen Einfluss auf die aggregierte Größe Energieeffizienz aufweisen. LIU et al. (22) und PATTERSON (23) haben Methoden entwickelt, die zugrunde liegende technische Energieeffizienz zu isolieren. Beispielsweise hat eine Studie von PATTERSON und WADSWORTH (26) festgestellt, dass die Steigerung des Verhältnisses von Energie zu BIP von 38 Prozent in den Jahren von 1978 bis 1990 größtenteils auf andere Effekte als auf eine Änderung der technischen Energieeffizienz zurückzuführen ist. Den mit Abstand größten Effekt hatte die Umstrukturierung der Wirtschaft hin zu energieintensiveren Sektoren (Steigerung um 27 Prozent). Daher führt die Verwendung des Verhältnisses von Bruttoenergie zu BIP, im Falle von Neuseeland, als Indikator für eine Verbesserung der technischen Energienutzung zu irreführenden Schlussfolgerungen, wird aber trotzdem von Beobachtern und Politikern für diesen Zweck verwendet. Studien in anderen Ländern (beispielsweise 4; 32) haben die technische Energieeffizienz vom Verhältnis Energie zu BIP isoliert und eine kontinuierliche Verbesserung der zugrunde liegenden technischen Effizienz im Zeitraum der Jahre 1970 bis 1990 beobachtet. Nichtsdestotrotz haben auch in diesen Ländern strukturelle Effekte einen deutlichen Einfluss auf die Energieeffizienz in Form von Energie zu BIP, so zum Beispiel in den USA (32) und Australien (47).

Das gleiche Phänomen tritt bei Energieeffizienzindikatoren sowohl auf Branchen-, Unternehmens- als auch auf Produktebene auf. Beispielsweise kann die Energieintensität (MJ/kg) eines Produktionsprozesses aufgrund einer höheren Mechanisierung (und somit des Energieverbrauches) ansteigen (beispielsweise bei unterschiedlichen Tomatenproduktionssystemen abhängig von der Region; 38), anstatt auf eine Verschlechterung der technischen Effizienz der Maschinen bei der Verwendung der Energie hinzuweisen. Ebenso kann sich das Verhältnis zwischen Energieinput und Wertschöpfung (MJ/€) innerhalb einer Branche verschlechtern, sofern eine Bewegung hin zu mehr energieintensiveren Produkten zu verzeichnen ist. Sowohl die technischen als auch die Bruttoenergieeffizienzindikatoren sind gleichermaßen gültig. Sie sind lediglich entworfen worden, um verschiedene Arten von Problemstellungen zu analysieren. Wenn beispielsweise Politikempfehlungen gegeben, umfassende Fragen der Energienutzung auf gesellschaftlicher Ebene im Zusammenhang mit Themen wie der Verwendung nicht erneuerbarer Ressourcen und einer nachhaltigen Entwicklung untersucht werden sollen, so wird ein Bruttoenergieeffizienzindikator (zum Beispiel Energie zu Wertschöpfung) besser für die Analyse geeignet sein und sollte nicht aus technischen Überlegungen verworfen werden. Steht allerdings die Wirksamkeit von gezielten Energiesparprogrammen, welche auf eine Verbesserung der technischen Energienutzung abzielen oder deren Analyse im Vordergrund, so wird ein technischer Energieeffizienzindikator besser geeignet sein.

## 2.6 Zusammenfassung Energieeffizienzindikatoren und Beschreibung eines Indikators für die Nachhaltigkeitsbewertung von Gartenbauunternehmen

Die Beschreibung der unterschiedlichen Indikatoren für Energieeffizienz und der methodischen Aspekte bei der Operationalisierung dieser Indikatoren hat deutlich werden lassen, wie herausfordernd sich die Quantifizierung und Bewertung von Energieeffizienz im Gartenbau darstellt. Tabelle 1 fasst die unterschiedlichen Indikatoren und Aspekte oder Herausforderungen zusammen. Grün symbolisiert, dass der Indikator das Problemfeld berücksichtigt, Grau, dass er dieses mit Einschränkungen vermag und Rot, dass er nicht in der Lage ist, das Problem zu adressieren. Insgesamt zeigt sich die Vorteilhaftigkeit ökonomischer und ökonomisch-thermodynamischer Indikatoren. Ihr wesentlichstes Manko ist die problematische Zeitreihenanalyse durch sich verändernde Marktpreise. Im Kontext einer nachhaltigen Entwicklung auf makroökonomischer Ebene ist ihre Verwendung unabdingbar. Für die Analyse von einzelnen Prozessen, Anlagen und Maschinen können jedoch auch andere Energieeffizienzindikatoren wie thermodynamische und physikalisch-thermodynamische Indikatoren sinnvoll sein. Dies gilt insbesondere dann, wenn eine Bewertung der technischen Effizienz im Vordergrund steht.

**Tabelle 1: Übersicht Energieeffizienzindikatoren und methodische Aspekte ihrer Operationalisierung**

Art des Indikators	Formel	Problemfelder							Analyseebene	
		„objektiv“ (liefert Werte für Zeitreihenvergleiche)	Berücksichtigt die Qualität des In- und Outputs	Quantifiziert den Nutzen des Outputs	„gute“ Operationalisierbarkeit	Berücksichtigt den Faktor Zeit	Berücksichtigt indirekten Energieverbrauch	aggregierbar		Gibt Rückschlüsse auf technische Effizienz
thermodynamische Indikatoren erster Ordnung	$E_{\Delta H} = \Delta H_{out} / \Delta H_{in}$ H = Wärmeinheit oder Energieeinheit								1)	Prozess, Objekt (Anlage, Maschine etc.)
thermodynamische Indikatoren zweiter Ordnung	$E_{\Delta H} = \Delta H_{out} / \Delta H_{in}$ H = Arbeitseinheit								2)	Prozess, Objekt (Anlage, Maschine etc.)
thermodynamische Indikatoren zweiter Ordnung - ideale Grenzen	$p = E_{\Delta H(actual)} / E_{\Delta H(ideal)}$ p = Energieeffizienzpotential									Prozess, Objekt (Anlage, Maschine etc.)
physikalisch-thermodynamische Indikatoren	z. B. Output (Tonnen) / Energieeinsatz ( $\Delta H$ )									Prozess, Objekt (Anlage, Maschine etc.), Betrieb
ökonomisch thermodynamische Indikatoren (Energieproduktivität)	z. B. Wertschöpfung (€) / Energieeinsatz ( $\Delta H$ )									Betrieb, Unternehmen, Sektor, Nation, Welt
ökonomische Indikatoren (Energieintensität)	z. B. Energieaufwand <sup>3)</sup> (€) / Wertschöpfung <sup>4)</sup> (€)									(u. U. Objekt) Betrieb, Unternehmen, Sektor, Nation, Welt

Anmerkungen: 1) Nein (rot), wenn Energiequalitäten berücksichtigt werden sollen.

2) Nein (rot), wenn Energiequalitäten berücksichtigt werden sollen.

3) Energieaufwand inklusive Abschreibungen.

4) Wertschöpfung inflationsbereinigt (real).

Eine Herausforderung im Zusammenhang mit Energieeffizienzindikatoren ist die Definition des "nützlichen" Outputs. Bei Indikatoren, bei denen der Output zu seinen Marktpreisen bewertet wird, gelingt diese Definition über den Markt, welcher den Nutzen bemisst. Hier gehen sowohl die Konsummuster der Konsumenten als auch die Knappheit des jeweiligen Gutes ein. So wird beispielsweise bei einer Überproduktion die Energie weniger effizient eingesetzt als es bei einem Mangel der Fall wäre. Nicht marktgerechte oder -fähige Produktion ist somit richtigerweise nicht effizient. Über den Marktpreis als Maß für die Bewertung des Outputs können zudem Rückschlüsse hinsichtlich seiner Qualität gezogen werden, sofern unterstellt wird, dass eine höhere Qualität des Outputs zu einem höheren Preis am Markt abgesetzt werden kann. Ein weiteres Problem ist jenes unterschiedlicher Qualitäten der Energieinputs. Wird auch dieser zu Marktpreisen bewertet, so geben diese wiederum einen Hinweis auf die Qualität der Energie. So ist Elektrizität beispielsweise teurer als Kohle. In einigen Fällen sorgen allerdings Marktverzerrungen durch Subventionen und unterschiedliche Energiesteuern dafür, dass die Preise der jeweiligen Energieträger nicht ihre Qualität widerspiegeln. Eine Bewertung der In- und Outputs zu Marktpreisen lässt diese vergleichbar werden und dient als Referenzgröße dafür, wie effizient die Ressource Energie eingesetzt wurde, um einen bestimmten Nutzen zu generieren. Ein weiteres Problem entsteht bei nicht-ökonomischen Indikatoren durch die implizite Annahme unendlich

langsamer Prozesse, das heißt der Trade-Off zwischen Zeitbeschränkungen und Energieverbrauch bleibt unberücksichtigt. Durch die Verwendung von Marktpreisen wird dieses Problem behoben, da der Nutzen der Zeitersparnis oder die Lieferung zu einem festgelegten Zeitpunkt einen Einfluss auf den Preis aufweist. Beispielsweise ist der Preis eines schnellen Transports meist höher als der eines langsamen. Wird ein gartenbauliches Produkt durch erhöhten Energieeinsatz außerhalb der Saison produziert und am Markt veräußert, so kann auch hier ein höherer Preis erwartet werden, da das Gut zu diesem Zeitpunkt durch seine erhöhte Knappheit einen höheren Nutzen stiftet als während der Saison. Hiernach besteht die Möglichkeit trotz höherem Energieeinsatz energieeffizienter zu produzieren, sofern der Nutzen im Verhältnis stärker ansteigt als der Energieeinsatz (-kosten). Der Ertrag oder besser die Wertschöpfung des Leistungserstellungsprozesses ermöglicht es auch, unterschiedliche Produkte, Prozesse, Unternehmen und Branchen miteinander zu vergleichen. Wie beschrieben werden zeitliche Aspekte von Transporten (und die geringe Lagerfähigkeit gartenbaulicher Produkte) berücksichtigt. Die Wertschöpfung als Outputmaß lässt ganz unterschiedliche Leistungserstellungsprozesse miteinander vergleichbar werden. Wenn beispielsweise ein Gartenbauunternehmen seine Jungpflanzen selbst produziert, dann verbraucht es dafür Energie, welche ein Unternehmen, das die Jungpflanzen zukaufte, spart. Somit könnte das zukaufende Unternehmen energieeffizienter sein, wenn physikalisch-thermodynamische Indikatoren (zum Beispiel Tonnen Tomaten / Energieinput ( $\Delta H$ )) Verwendung finden. Durch die Verwendung der Wertschöpfung als Outputmaß wird das Problem der Berücksichtigung von Vorleistungen (Energie für Rohstoffe, Materialien und anderes) behoben. Der indirekte Energieeinsatz der Investitionsgüter des Unternehmens kann berücksichtigt werden, wenn die Abschreibungen in die Energieinputs einfließen. Hier wird allerdings aus praktischen Gründen unterstellt, dass die Investitionskosten proportional zu der verwendeten Energie bei der Herstellung des Investitionsgutes sind. Ökonomische Indikatoren haben den Vorteil, dass sie die Knappheit und den Nutzen der (Energie-) In- und Outputs indirekt berücksichtigen. Es ergibt sich jedoch der Nachteil, dass monetäre Größen aufgrund von Änderungen der Struktur des Unternehmens und/oder der Branche und der Produktionsfunktion (beispielsweise durch die Substitution von Arbeit durch Energie) wenig Rückschlüsse auf die technische Effizienz zulassen. Die Wertschöpfung als Outputmaß löst allerdings das Problem der eindeutigen Definition von Systemgrenzen. Es bleibt jedoch das Problem der eindeutigen Zuordnung von Energieverbräuchen (Inputs) zu den einzelnen Produkten (Kostenträgern, Outputs) beispielsweise bei einer Kuppelproduktion. Struktureffekte und ihr Einfluss auf die Energieeffizienz sind auch bei ökonomischen Indikatoren nicht zu erkennen. Hierzu ist immer auch ein Vergleich mit physikalisch-thermodynamischen Indikatoren und der Produktionsfunktionen notwendig.

Bei der Nachhaltigkeitsbewertung von Gartenbauunternehmen werden zwei Indikatoren der Energieeffizienz auf Unternehmens- und Branchenebene empfohlen. Dies sind die

**ökonomische Energieeffizienz (Energieintensität)**

$$= \frac{\text{Energieaufwand (€) + Abschreibungen auf Produktionsanlagen und Maschinen (€)}}{\text{Nettowertschöpfung (€)}}$$

und die

**ökonomisch thermodynamische Energieeffizienz (Energieproduktivität)**

$$= \frac{\text{Nettowertschöpfung (€)}}{\text{Energieinput (\Delta H in kWh)}}$$

wobei sich der Energieaufwand aus den Aufwendungen für Heizung (Produktion), Strom, Treib- und Schmierstoffe und der Heizung von Verkaufs- und Arbeitsräumen zusammensetzt. Die Abschreibungen auf Produktionsanlagen und Maschinen beinhalten die Abschreibungen auf Gewächshäuser, Betriebsvorrichtungen, Heizanlagen und den Fuhrpark. Die Nettowertschöpfung ergibt sich aus dem Betriebsertrag abzüglich des Betriebsaufwands (einschließlich Abschreibungen) zuzüglich des Lohnaufwandes. Der Betriebsertrag sowie der Betriebsaufwand schließen die gärtnerischen Vorleistungen ein. In Tabelle 2 und 3 finden sich Referenzwerte der beiden Indikatoren für die vergangenen 15 Jahre und die unterschiedlichen Sparten des Gartenbaus. Beim Energieinput werden freie Güter, wie die Sonnenenergie, nicht berücksichtigt. Auf niedrigeren Aggregationsebenen können auch thermodynamische und physikalisch-thermodynamische Indikatoren einen Beitrag leisten.

**Tabelle 2a: Übersicht der Energieintensität der unterschiedlichen Sparten des Gartenbaus von 1998 bis 2012**

	<b>1997/1998</b>	<b>1998/1999</b>	<b>1999/2000</b>	<b>2000/2001</b>	<b>2001/2002</b>	<b>2002/2003</b>
Zierpflanzen indirektabsetzend (im Mittel)	0,42403	0,43263	0,41856	0,49852	0,45315	0,42914
Zierpflanzen indirektabsetzend (1. Drittel)	0,38046	0,36728	0,35264	0,39006	0,35951	0,37273
Zierpflanzen indirektabsetzend (3. Drittel)	0,65683	0,67745	0,66909	0,82123	0,63483	0,55996
Zierpflanzen direktabsetzend (im Mittel)	0,27405	0,28291	0,27277	0,30254	0,29234	0,27766
Zierpflanzen direktabsetzend (1. Drittel)	0,22812	0,21579	0,20612	0,25790	0,23309	0,21423
Zierpflanzen direktabsetzend (3. Drittel)	0,42717	0,45474	0,43314	0,45354	0,45230	0,49088
Topfpflanzen (im Mittel)	0,44082	0,44179	0,41741	0,50184	0,45740	0,42930
Topfpflanzen (1. Drittel)	0,37491	0,36217	0,35010	0,39954	0,36197	0,35467
Topfpflanzen (3. Drittel)	0,67911	0,64555	0,58088	0,77929	0,68784	0,60448
Schnittblumen (im Mittel)	0,61489	0,60184	0,60647	0,81207	0,72683	0,68877
Schnittblumen (1. Drittel)	0,54518	0,59392	0,50158	0,50371	0,59891	0,64319
Schnittblumen (3. Drittel)	1,03662	0,95420	1,10770	1,36884	0,91918	1,31256
Unterglasgemüsebau (im Mittel)	0,65157	0,92179	0,81854	0,77568	0,91986	0,74055
Unterglasgemüsebau (1. Drittel)	0,46110	0,80500	0,71031	0,56405	0,81424	0,58510
Unterglasgemüsebau (3. Drittel)	1,13168	1,01685	1,24837	1,43740	1,28089	1,46661
Dienstleistungen (im Mittel)	0,15441	0,10691	0,09235	0,12080	0,11227	0,11655
Dienstleistungen (1. Drittel)	0,13353	0,13036	0,06354	0,09975	0,09762	0,10089
Dienstleistungen (3. Drittel)	0,19180	0,14226	0,14669	0,11816	0,13473	0,16931
Handel (im Mittel)	0,16094	0,17963	0,18521	0,18675	0,19035	0,20210
Handel (1. Drittel)	0,13059	0,11124	0,17133	0,17686	0,16666	0,15811
Handel (3. Drittel)	0,24234	0,36040	0,24645	0,28931	0,28096	0,32885

**Quelle:** Eigene Darstellung und Berechnung auf Grundlage der Daten des Zentrums für Betriebswirtschaft im Gartenbau e. V., Stand 14. Mai 2014. Die Einordnung der Betriebe (1. Drittel oder 3. Drittel) richtet sich nach dem Betriebseinkommen pro Arbeitskraft.

**Tabelle 2b: Übersicht der Energieintensität der unterschiedlichen Sparten des Gartenbaus von 1998 bis 2012**

	<b>2003/2004</b>	<b>2004/2005</b>	<b>2005/2006</b>	<b>2006/2007</b>	<b>2007/2008</b>	<b>2008/2009</b>
Zierpflanzen indirektabsetzend (im Mittel)	0,41225	0,44997	0,51324	0,48098	0,43957	0,45644
Zierpflanzen indirektabsetzend (1. Drittel)	0,33764	0,36587	0,45078	0,36476	0,35883	0,39610
Zierpflanzen indirektabsetzend (3. Drittel)	0,73391	0,73365	0,84438	0,81178	0,72034	0,72972
Zierpflanzen direktabsetzend (im Mittel)	0,29403	0,26782	0,30292	0,32287	0,30266	0,32277
Zierpflanzen direktabsetzend (1. Drittel)	0,23007	0,21638	0,23591	0,25319	0,24063	0,26723
Zierpflanzen direktabsetzend (3. Drittel)	0,56154	0,42915	0,57751	0,51123	0,49203	0,52866
Topfpflanzen (im Mittel)	0,42818	0,44612	0,51722	0,48056	0,42744	0,47672
Topfpflanzen (1. Drittel)	0,31853	0,35160	0,42963	0,35192	0,34217	0,36694
Topfpflanzen (3. Drittel)	0,71647	0,62126	0,75618	0,77385	0,64578	0,66282
Schnittblumen (im Mittel)	0,74821	0,87570	0,87689	0,73642	0,74032	0,71192
Schnittblumen (1. Drittel)	0,53725	0,65180	0,56333	0,50910	0,61817	0,57926
Schnittblumen (3. Drittel)	1,05023	1,50481	1,86239	1,38760	1,10938	1,13984
Unterglasgemüsebau (im Mittel)	0,65748	0,73530	0,79558	0,73323	0,58947	0,64667
Unterglasgemüsebau (1. Drittel)	0,52425	0,53542	0,57554	0,56920	0,54271	0,52923
Unterglasgemüsebau (3. Drittel)	0,95927	1,17378	1,52477	1,04187	0,80063	0,92175
Dienstleistungen (im Mittel)	0,10209	0,11499	0,12598	0,09272	0,11654	0,11250
Dienstleistungen (1. Drittel)	0,08111	0,08736	0,08877	0,08088	0,10615	0,10198
Dienstleistungen (3. Drittel)	0,17181	0,19786	0,22264	0,13294	0,14962	0,15101
Handel (im Mittel)	0,20483	0,18276	0,15962	0,17412	0,18066	0,18503
Handel (1. Drittel)	0,13568	0,14671	0,13934	0,15897	0,16619	0,17663
Handel (3. Drittel)	0,34573	0,29539	0,21990	0,25992	0,25238	0,23148

**Quelle:** Eigene Darstellung und Berechnung auf Grundlage der Daten des Zentrums für Betriebswirtschaft im Gartenbau e. V., Stand 14. Mai 2014. Die Einordnung der Betriebe (1. Drittel oder 3. Drittel) richtet sich nach dem Betriebseinkommen pro Arbeitskraft.

**Tabelle 2c: Übersicht der Energieintensität der unterschiedlichen Sparten des Gartenbaus von 1998 bis 2012**

	<b>2009/2010</b>	<b>2010/2011</b>	<b>2011/2012</b>	<b>Durchschnitt 1998 bis 2012</b>
Zierpflanzen indirektabsetzend (im Mittel)	0,43915	0,45101	0,41700	0,44771
Zierpflanzen indirektabsetzend (1. Drittel)	0,35900	0,42395	0,37674	0,37709
Zierpflanzen indirektabsetzend (3. Drittel)	0,76469	0,74755	0,55225	0,71051
Zierpflanzen direktabsetzend (im Mittel)	0,27885	0,28977	0,29589	0,29199
Zierpflanzen direktabsetzend (1. Drittel)	0,22351	0,25413	0,24139	0,23451
Zierpflanzen direktabsetzend (3. Drittel)	0,46905	0,56771	0,44501	0,48624
Topfpflanzen (im Mittel)	0,43826	0,45977	0,42748	0,45269
Topfpflanzen (1. Drittel)	0,33689	0,42007	0,33929	0,36403
Topfpflanzen (3. Drittel)	0,71623	0,64137	0,54546	0,67044
Schnittblumen (im Mittel)	0,76004	0,76248	0,62314	0,72573
Schnittblumen (1. Drittel)	0,63557	0,61719	0,56658	0,57765
Schnittblumen (3. Drittel)	1,08173	1,35008	1,10722	1,21949
Unterglasgemüsebau (im Mittel)	0,61548	0,62532	0,73063	0,73048
Unterglasgemüsebau (1. Drittel)	0,50723	0,59804	0,61993	0,59609
Unterglasgemüsebau (3. Drittel)	1,08393	0,71956	1,37941	1,14578
Dienstleistungen (im Mittel)	0,09135	0,11320	0,13237	0,11367
Dienstleistungen (1. Drittel)	0,10732	0,10178	0,15238	0,10223
Dienstleistungen (3. Drittel)	0,12027	0,10541	0,13809	0,15284
Handel (im Mittel)	0,16531	0,18283	0,19609	0,18241
Handel (1. Drittel)	0,17021	0,18515	0,16995	0,15757
Handel (3. Drittel)	0,17275	0,22379	0,25154	0,26675

**Quelle:** Eigene Darstellung und Berechnung auf Grundlage der Daten des Zentrums für Betriebswirtschaft im Gartenbau e. V., Stand 14. Mai 2014. Die Einordnung der Betriebe (1. Drittel oder 3. Drittel) richtet sich nach dem Betriebseinkommen pro Arbeitskraft.

**Tabelle 3a: Übersicht der Energieproduktivität der unterschiedlichen Sparten des Gartenbaus von 1998 bis 2012**

	1997/1998	1998/1999	1999/2000	2000/2001	2001/2002	2002/2003
Zierpflanzen indirektabsetzend (im Mittel)	4,32786	4,63583	4,68696	3,66391	4,10509	4,40488
Zierpflanzen indirektabsetzend (1. Drittel)	5,44473	5,85472	6,19987	5,04492	5,64231	5,35787
Zierpflanzen indirektabsetzend (3. Drittel)	2,55704	2,75454	2,63263	2,10976	2,99286	3,06346
Zierpflanzen direktabsetzend (im Mittel)	7,35924	8,09902	8,19723	6,71720	6,87593	7,29666
Zierpflanzen direktabsetzend (1. Drittel)	8,89923	9,86548	10,16721	7,96319	8,57317	9,19425
Zierpflanzen direktabsetzend (3. Drittel)	4,76819	5,72887	5,80034	4,64110	4,56389	4,13284
Topfpflanzen (im Mittel)	4,30525	4,76035	4,92810	3,85008	4,28010	4,64041
Topfpflanzen (1. Drittel)	6,00738	6,41617	6,76284	5,14664	5,92278	6,05956
Topfpflanzen (3. Drittel)	2,52347	3,01049	3,04972	2,38996	2,74638	2,93311
Schnittblumen (im Mittel)	2,55706	2,64921	2,40793	1,77900	1,97448	2,14991
Schnittblumen (1. Drittel)	2,99566	2,73733	2,95258	2,67146	2,56546	2,21045
Schnittblumen (3. Drittel)	1,53052	1,65842	1,30491	1,12454	1,81962	1,16324
Unterglasgemüsebau (im Mittel)	2,40609	1,83248	2,12507	2,09297	1,61559	2,25197
Unterglasgemüsebau (1. Drittel)	3,34190	2,42975	2,31014	2,85969	1,84771	2,86937
Unterglasgemüsebau (3. Drittel)	1,42765	1,44977	1,55788	1,02700	1,24472	1,14639
Dienstleistungen (im Mittel)	15,16209	33,41443	25,59990	21,02658	23,66032	18,82941
Dienstleistungen (1. Drittel)	15,00574	31,58001	25,84829	23,53707	33,26176	20,65551
Dienstleistungen (3. Drittel)	14,01125	31,02090	29,72236	20,92711	17,81508	14,20789
Handel (im Mittel)	14,37390	13,46672	14,10017	11,64755	10,31986	9,89728
Handel (1. Drittel)	19,29842	21,34726	15,82310	13,19220	11,07154	12,97692
Handel (3. Drittel)	9,42249	6,62008	9,90504	6,70561	7,46436	6,25225

**Quelle:** Eigene Darstellung und Berechnung auf Grundlage der Daten des Zentrums für Betriebswirtschaft im Gartenbau e. V., Stand 14. Mai 2014. Die Einordnung der Betriebe (1. Drittel oder 3. Drittel) richtet sich nach dem Betriebseinkommen pro Arbeitskraft.



**Tabelle 3b: Übersicht der Energieproduktivität der unterschiedlichen Sparten des Gartenbaus von 1998 bis 2012**

	2003/2004	2004/2005	2005/2006	2006/2007	2007/2008	2008/2009
Zierpflanzen indirektabsetzend (im Mittel)	4,53337	3,96940	3,24701	3,55064	4,10831	3,82295
Zierpflanzen indirektabsetzend (1. Drittel)	6,08459	5,14427	3,94890	5,26197	6,00868	4,79271
Zierpflanzen indirektabsetzend (3. Drittel)	2,37220	2,21533	1,78076	1,94555	2,09796	2,15120
Zierpflanzen direktabsetzend (im Mittel)	6,38522	6,85210	5,69826	5,38073	6,51816	5,15846
Zierpflanzen direktabsetzend (1. Drittel)	8,10717	8,47554	7,34680	6,82225	8,77688	6,58164
Zierpflanzen direktabsetzend (3. Drittel)	3,40343	4,39587	3,11290	3,20516	3,74547	3,12595
Topfpflanzen (im Mittel)	4,54232	4,19554	3,31008	3,66847	4,45577	3,74198
Topfpflanzen (1. Drittel)	6,64574	5,64881	4,27196	5,67770	6,87298	5,59217
Topfpflanzen (3. Drittel)	2,51092	2,87532	2,08930	2,05811	2,43827	2,35990
Schnittblumen (im Mittel)	1,98703	1,67143	1,61647	2,01709	2,02656	2,06753
Schnittblumen (1. Drittel)	2,81695	2,24173	2,43595	2,80130	2,48321	2,37208
Schnittblumen (3. Drittel)	1,56907	0,95250	0,79007	1,17474	1,39258	1,26198
Unterglasgemüsebau (im Mittel)	2,40670	2,10405	1,87374	2,09989	2,58048	2,27762
Unterglasgemüsebau (1. Drittel)	3,31268	3,02713	2,77837	2,89294	2,84970	2,84564
Unterglasgemüsebau (3. Drittel)	1,86547	1,30182	0,90678	1,38912	1,90000	1,51672
Dienstleistungen (im Mittel)	20,13505	19,29805	16,89056	23,95626	19,86100	18,41383
Dienstleistungen (1. Drittel)	22,26147	25,16435	23,05293	26,40570	23,41880	21,72380
Dienstleistungen (3. Drittel)	13,54192	11,76061	9,39113	16,95818	15,54024	12,47740
Handel (im Mittel)	8,58237	8,95733	12,16534	11,09015	11,09143	9,54300
Handel (1. Drittel)	14,98164	11,54577	14,13638	12,80867	15,62315	10,21770
Handel (3. Drittel)	4,48363	4,55000	8,11515	6,28439	6,87038	7,44810

**Quelle:** Eigene Darstellung und Berechnung auf Grundlage der Daten des Zentrums für Betriebswirtschaft im Gartenbau e. V., Stand 14. Mai 2014. Die Einordnung der Betriebe (1. Drittel oder 3. Drittel) richtet sich nach dem Betriebseinkommen pro Arbeitskraft.

**Tabelle 3c: Übersicht der Energieproduktivität der unterschiedlichen Sparten des Gartenbaus von 1998 bis 2012**

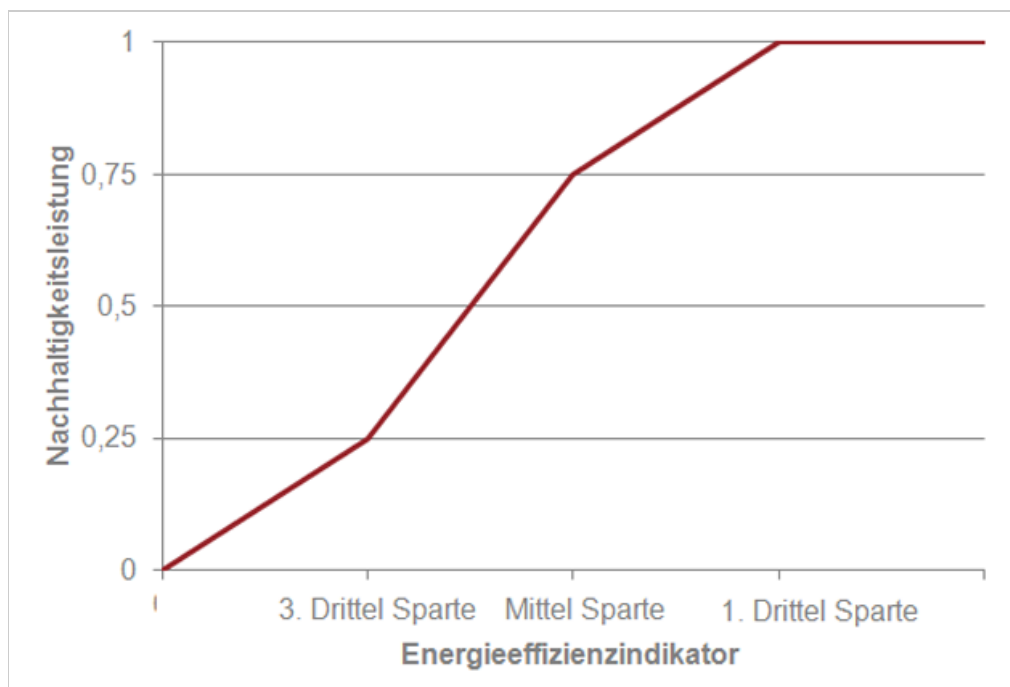
	<b>2009/2010</b>	<b>2010/2011</b>	<b>2011/2012</b>	<b>Durchschnitt 1998 bis 2012</b>
Zierpflanzen indirektabsetzend (im Mittel)	4,13015	3,94008	4,24246	4,09126
Zierpflanzen indirektabsetzend (1. Drittel)	5,86403	4,67424	5,07092	5,35965
Zierpflanzen indirektabsetzend (3. Drittel)	2,07148	2,02348	2,81997	2,37255
Zierpflanzen direktabsetzend (im Mittel)	6,30462	5,82002	5,44895	6,54079
Zierpflanzen direktabsetzend (1. Drittel)	7,78187	6,57168	7,03981	8,14441
Zierpflanzen direktabsetzend (3. Drittel)	3,88684	3,04052	3,62268	4,07827
Topfpflanzen (im Mittel)	4,28935	3,97544	4,24286	4,21241
Topfpflanzen (1. Drittel)	6,78387	4,94854	5,80965	5,90445
Topfpflanzen (3. Drittel)	2,21056	2,44660	2,90864	2,57005
Schnittblumen (im Mittel)	1,94067	1,84939	2,34004	2,06892
Schnittblumen (1. Drittel)	2,37283	2,37938	2,37368	2,56067
Schnittblumen (3. Drittel)	1,19824	0,96083	1,38892	1,28601
Unterglasgemüsebau (im Mittel)	2,44060	2,24655	1,92593	2,15198
Unterglasgemüsebau (1. Drittel)	2,89521	2,35912	2,19329	2,72084
Unterglasgemüsebau (3. Drittel)	1,49240	2,08073	1,15669	1,43088
Dienstleistungen (im Mittel)	24,18478	18,45547	14,69451	20,90548
Dienstleistungen (1. Drittel)	26,77530	23,77136	14,75157	23,81424
Dienstleistungen (3. Drittel)	14,25679	20,12767	11,53687	16,88636
Handel (im Mittel)	12,43658	10,25993	8,61258	11,10295
Handel (1. Drittel)	13,93113	11,74011	10,45002	13,94293
Handel (3. Drittel)	11,14524	6,22736	5,70667	7,14672

**Quelle:** Eigene Darstellung und Berechnung auf Grundlage der Daten des Zentrums für Betriebswirtschaft im Gartenbau e. V., Stand 14. Mai 2014. Die Einordnung der Betriebe (1. Drittel oder 3. Drittel) richtet sich nach dem Betriebseinkommen pro Arbeitskraft.

Weitere Herausforderungen ergeben sich für den Gartenbau bei der Analyse des Einflusses der Anbau- und Liefersaison und des Einflusses von Produktionsverfahren, beispielsweise bei der Verwendung größerer Jungpflanzen, der Zwischenpflanzung einer zweiten Tomatenkultur in ältere Bestände und vor allem der Temperaturführung im Unterglasanbau. Auch ist der Einfluss natürlicher Standortverhältnisse auf die Energieintensität (durch unterschiedliche Sonneneinstrahlung und das Klima) nicht zu vernachlässigen (41). Es kann allerdings trotzdem "energieeffizient" sein, in klimatisch benachteiligten Regionen zu produzieren, wenn hierdurch ein im Vergleich höherer Nutzen zum Beispiel durch Regionalität gestiftet wird. Hier spielen nicht zuletzt auch unterschiedliche Transport- und Absatzsysteme eine wesentliche Rolle.

Als bedeutendster Nachteil der vorgeschlagenen ökonomischen oder ökonomisch-thermodynamischen Indikatoren gelten ihre unzulängliche Eignung für Zeitreihenvergleiche durch schwankende Marktpreise der Prozessin- und outputs. Nur weil die Erklärung von Veränderungen dieser Energieeffizienzindikatoren im Zeitverlauf herausfordernder sind als andere, sind sie nicht zwingend weniger zielführend. Effizient ist ein Prozess dann, wenn eine knappe Ressource möglichst nutzenstiftend eingesetzt wird. Die Knappheit und der Nutzen verändern sich im Zeitverlauf und/oder sind zeitabhängig. Eine Überproduktion in Zeiten von geringer Knappheit unter Einsatz von Energie ist nicht so nutzenstiftend und damit energieeffizient wie in Zeiten von großer Knappheit. Auch wenn in einer Anlage Produkte technisch effizient produziert werden, diese aber nicht am Markt abgesetzt werden können und daher zu einem Großteil kompostiert werden müssen, war die Produktion nicht energieeffizient. Der Preis eines Produktes zeigt den Nutzen für den durchschnittlichen Kunden des Gutes an. Die Wertschöpfung eines Unternehmens ist somit ein Maß dafür, wieviel Nutzen es durch seine Tätigkeit gestiftet hat und das Verhältnis zu der eingesetzten Energie (in Form von Energiekosten, denn diese zeigen die Knappheit der Ressource an) ist somit die zielführendste Definition von Energieeffizienz.

Der Indikator wird für die Nachhaltigkeitsbewertung für Gartenbauunternehmen wie in der Funktion in Abbildung 3 bewertet. Er beinhaltet sowohl die ökonomische Energieeffizienz (Energieintensität) als auch die ökonomisch-thermodynamische Energieeffizienz (Energieproduktivität), welche gesondert aufgeführt werden sollen. Die Bewertungsfunktion orientiert sich an dem Schema, welches auch im REPRO-Modell (18) verwendet wird. Hierbei wird der Nachhaltigkeitsindikator so normalisiert, dass seine Nachhaltigkeitsleistung von null bis eins bewertet wird, wobei eine Nachhaltigkeitsleistung von null die schlechteste und eine Nachhaltigkeitsleistung von eins die beste Bewertung darstellt. Die Bewertung findet für die einzelnen Sparten unterschiedlich statt und richtet sich nach Vergleichswerten der jeweiligen Sparte.



**Abbildung 3:** Bewertungsfunktion des Indikators Energieeffizienz.

**Quelle:** Eigene Darstellung.

Gartenbauunternehmen, deren Energieeffizienzindikatoren Werte wie in dem ersten Drittel der jeweiligen Sparte aufweisen, werden mit der maximalen Nachhaltigkeitsleistung von eins bewertet. Werte im Spartendurchschnitt werden mit der Nachhaltigkeitsleistung von 0,75 bewertet. Energieeffizienzindikatoren mit Werten des dritten Drittels liegen bei einer Nachhaltigkeitsleistung von 0,25. Sollten die Werte schlechter als das dritte Drittel der Gartenbauunternehmen der jeweiligen Sparte sein, so wird eine Nachhaltigkeitsleistung von unter 0,25 vergeben. Das schlechteste Unternehmen von allen untersuchten Unternehmen einer Sparte erreicht eine Nachhaltigkeitsleistung von null.

### 3 Fazit

Energieeffizienz steht aktuell, aber auch schon seit der Ölkrise in den siebziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts, im Mittelpunkt nationaler energiepolitischer Maßnahmen und im Vordergrund der Debatte über eine nachhaltige Energienutzung im Gartenbau (41). Überraschend wenig Aufmerksamkeit erhielt die genaue Definition und Messung des Konzeptes Energieeffizienz. Wenn Energieeffizienz ein Politik- und Unternehmensziel darstellt, so muss deren Entwicklung oder Fortschritt überwacht werden, um eine Soll-Ist-Analyse durchführen zu können und ein Energiemanagement zu ermöglichen. Hierfür müssen theoretisch fundierte (über-)betriebliche Definitionen von Energieeffizienz entwickelt werden. Dieser Artikel hat jedoch gezeigt, dass eine Reihe von kritischen methodischen Problemen existieren, welche einer Etablierung eines einheitlichen strategischen und operativen Indikators für die Energieeffizienz im Wege stehen. Der Adressierung und Überwindung dieser methodischen Probleme muss mehr Aufmerksamkeit gewidmet werden. Insbesondere in der Nachhaltigkeitsdebatte dürfen makroökonomische Effekte nicht unberücksichtigt bleiben. An dieser Stelle sind Rebound-Effekte zu nennen, welche von Naturwissenschaftlern und Ingenieuren, häufig unbeabsichtigt oder beabsichtigt, nicht wahrgenommen werden.

Die Aussagekraft thermodynamischer Indikatoren ist auf Unternehmens-, aber auch auf makroökonomischer Ebene sehr begrenzt, sofern sie nicht so angepasst werden, dass sie unterschiedliche Energiequalitäten berücksichtigen. Ihre mangelnde Aussagekraft verdanken sie dem Umstand, dass sie keinen Vergleich der Energieeffizienz von Prozessen zulassen, welche verschiedene Energieein- und Ausgänge aufweisen. Physikalisch-thermodynamische Indikatoren, welche den Output in physikalischen Messeinheiten, die sich auf den gewünschten Verwendungszweck des Prozesses beziehen, quantifizieren, sind häufig zielführender. Allerdings erlauben diese Indikatoren nur einen Vergleich der Effizienz von Prozessen, welche den gleichen Output generieren. Daher sind physikalisch-thermodynamische Indikatoren restriktiver als allgemeine Energieeffizienzmaße. Ökonomisch-thermodynamische Indikatoren, wie das Verhältnis zwischen Energie und Wertschöpfung, sind besonders auf politischer und makroökonomischer Ebene sinnvoll einzusetzen. Sie haben allerdings häufig das Problem der Trennung zwischen Struktureffekten und der zugrunde liegenden technischen Energieeffizienz.

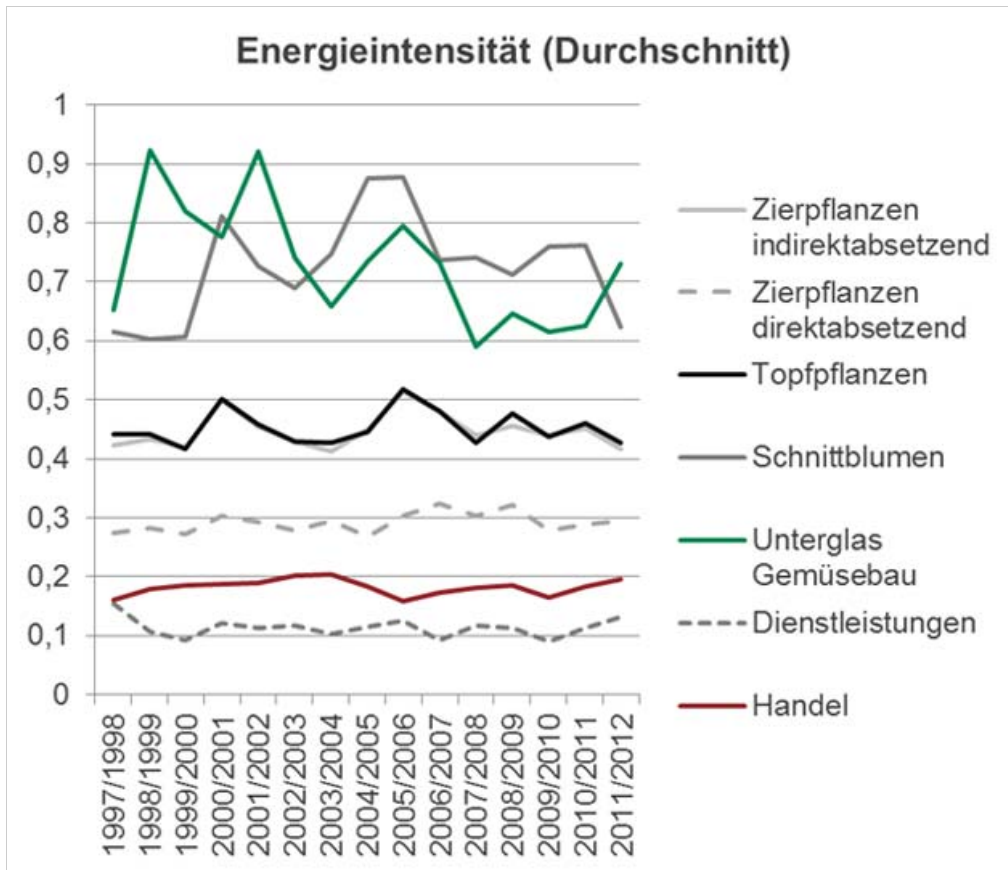
Das Problem unterschiedlicher Energiequalitäten ist eine fundamentale Herausforderung bei allen Energieeffizienzindikatoren, sofern diese dazu dienen sollen, Prozesse mit In- und Outputs unterschiedlicher Qualitäten zu vergleichen. Insbesondere der Nutzen von thermodynamischen Indikatoren auf makroökonomischer Ebene hängt wesentlich von der Behebung des Problems unterschiedlicher Energiequalitäten ab. Bis dieses Problem behoben ist, können thermodynamische Indikatoren lediglich für eine Analyse auf Prozessebene eingesetzt werden. Andere Probleme bei der Messung der Energieeffizienz sind weniger kritisch, sollten aber dennoch berücksichtigt werden, sofern Energieeffizienz auf makroökonomischer Ebene und/oder im Nachhaltigkeitskontext gemessen werden soll.

Für die Nachhaltigkeitsbewertung der Energieeffizienz deutscher Gartenbauunternehmen wird die ökonomische Energieeffizienz (Energieintensität) als Quotient aus dem Energieaufwand<sup>5</sup> (in Euro) inklusive Abschreibungen auf Produktionsanlagen und Maschinen<sup>6</sup> (in Euro) und der Nettowertschöpfung<sup>7</sup> (in Euro) und die ökonomisch-thermodynamische Energieeffizienz (Energieproduktivität) als Verhältnis zwischen Nettowertschöpfung (in Euro) und Energieinput ( $\Delta H$  in Kilowattstunden) vorgeschlagen. Aufgrund fehlender Daten wird der Energieinput in den folgenden Darstellungen durch den Energieaufwand (in Euro) abgebildet. Die Energieproduktivität ist hier ein klassischer Ökoeffizienzindikator. Tabelle 4 zeigt die Werte der vorgeschlagenen Energieeffizienzindikatoren für die einzelnen Sparten des Gartenbaus und Abbildungen 4a und 4b deren Veränderung im Zeitverlauf.

**Tabelle 4: Energieintensität und Energieproduktivität der unterschiedlichen Sparten des Gartenbaus (im Mittel, 1. Drittel, 3. Drittel) 2011/2012**

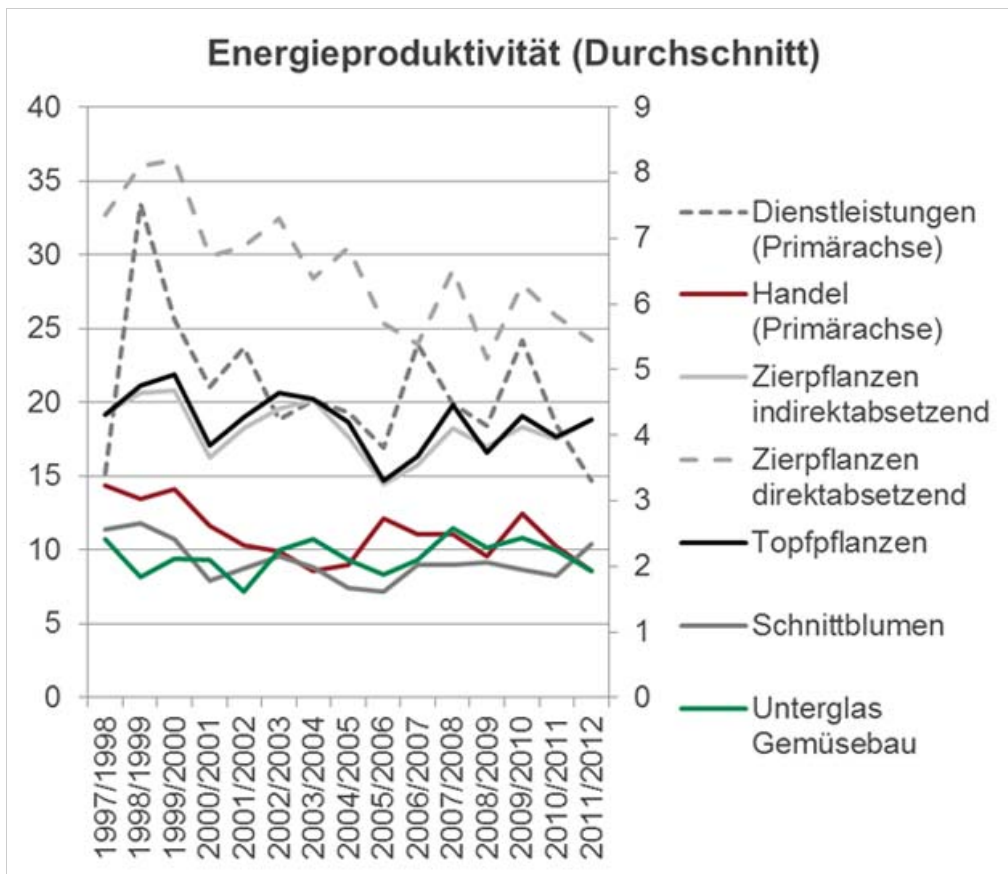
<b>Sparte</b>	<b>Energieintensität</b>	<b>Energieproduktivität</b>
Zierpflanzen indirektabsetzend (mittel)	0,417	4,242
Zierpflanzen indirektabsetzend (1. Drittel)	0,377	5,071
Zierpflanzen indirektabsetzend (3. Drittel)	0,552	2,820
Zierpflanzen direktabsetzend (mittel)	0,296	5,449
Zierpflanzen direktabsetzend (1. Drittel)	0,241	7,040
Zierpflanzen direktabsetzend (3. Drittel)	0,445	3,623
Topfpflanzen (mittel)	0,427	4,243
Topfpflanzen (1. Drittel)	0,339	5,810
Topfpflanzen (3. Drittel)	0,545	2,909
Schnittblumen (mittel)	0,623	2,340
Schnittblumen (1. Drittel)	0,567	2,374
Schnittblumen (3. Drittel)	1,107	1,389
Unterglas Gemüsebau (mittel)	0,731	1,926
Unterglas Gemüsebau (1. Drittel)	0,620	2,193
Unterglas Gemüsebau (3. Drittel)	1,379	1,157
Dienstleistungen (mittel)	0,132	14,695
Dienstleistungen (1. Drittel)	0,152	14,752
Dienstleistungen (3. Drittel)	0,138	11,537
Handel (mittel)	0,196	8,613
Handel (1. Drittel)	0,170	10,450
Handel (3. Drittel)	0,252	5,707

**Quelle:** Eigene Darstellung und Berechnung auf Grundlage der Datenbasis des Zentrums für Betriebswirtschaft im Gartenbau e.V., Stand 13. Mai 2014.



**Abbildung 4a:** Veränderung der Energieintensität zwischen 1998/1999 und 2011/2012.

**Quelle:** Eigene Darstellung und Berechnung auf Grundlage der Datenbasis des Zentrums für Betriebswirtschaft im Gartenbau e.V., Stand 13. Mai 2014.



**Abbildung 4b:** Veränderung der Energieproduktivität zwischen 1998/1999 und 2011/2012.

**Quelle:** Eigene Darstellung und Berechnung auf Grundlage der Datenbasis des Zentrums für Betriebswirtschaft im Gartenbau e.V., Stand 13. Mai 2014.

## Zusammenfassung

Energieeffizienz wird im deutschen Gartenbau als ein wesentlicher Indikator ökologischer und ökonomischer Nachhaltigkeit betrachtet. Der Indikator kann auf unterschiedlichste Art und Weise erhoben werden. Eine einheitliche Definition ist nicht vorhanden. Um die Möglichkeiten einer Quantifizierung von Energieeffizienz zu diskutieren, werden die thermodynamischen, physikalisch-thermodynamischen, ökonomisch-thermodynamischen und ökonomischen Indikatoren beschrieben. Bei der Auswahl eines Indikators für die unterschiedlichen Analyseebenen müssen methodische Probleme hinsichtlich der Objektivität, Qualität der In- und Outputs, des Nutzens des Outputs, der Operationalisierbarkeit, der Berücksichtigung des Faktors Zeit, der Aggregierbarkeit und der Rückschlüsse auf die technische Effizienz berücksichtigt werden. Bei der Gegenüberstellung der unterschiedlichen Möglichkeiten einer Quantifizierung von Energieeffizienz wird die Vorteilhaftigkeit ökonomischer und/oder ökonomisch-thermodynamischer Indikatoren der Energieeffizienz im Rahmen einer Nachhaltigkeitsbewertung deutscher Gartenbauunternehmen deutlich.

## Summary

### **Measuring operational energy efficiency as an indicator of environmental and economic sustainability of horticultural companies**

In German horticulture, energy efficiency is considered a key indicator of ecological and economic sustainability. It can be measured in various ways. A single definition does not exist. To discuss possible ways of energy quantification, thermodynamic, physical thermodynamic, economic thermodynamic and economic indicators are described. When choosing an indicator for the various levels of analysis, methodological challenges in terms of objectivity, quality of inputs and outputs, output benefits, operationalizability, time factor, aggregability and in terms of possible conclusions regarding technical efficiency must be considered. A comparison of the various ways of quantifying energy efficiency will reveal the advantages of economic and/or economic thermodynamic indicators of energy efficiency as part of a sustainability assessment for German horticultural companies.

## Résumé

### **Mesurer l'efficacité énergétique opérationnelle comme un indicateur de la durabilité environnementale et économique des horticulteurs**

Dans l'horticulture en Allemagne, l'efficacité énergétique est considérée comme un indicateur essentiel d'une durabilité environnementale et économique. Etant donné qu'il n'existe pas de définition convenue, il y a plusieurs manières de déterminer cet indicateur. Pour pouvoir discuter une possible quantification de l'efficacité énergétique, les indicateurs thermodynamiques, physico-thermodynamiques, écono-thermodynamique et économiques sont décrits. En choisissant un indicateur pour les différents niveaux d'analyse, il faut prendre en considération les problèmes méthodologiques concernant l'objectivité, la qualité des entrées/sorties, l'utilité des sorties, l'applicabilité technique, le facteur temporel, l'agrégabilité et les possibles conclusions quant à l'efficacité technique. Une comparaison des différentes possibilités de quantification révèle les avantages des indicateurs économique et/ou écono-thermodynamiques dans le cadre d'une évaluation de la durabilité des horticulteurs en Allemagne.

---

## Fußnoten

- 1) Nein (rot) wenn Energiequalitäten berücksichtigt werden sollen.
- 2) Nein (rot) wenn Energiequalitäten berücksichtigt werden sollen.
- 3) Energieaufwand inklusive Abschreibungen.
- 4) Wertschöpfung inflationsbereinigt (real).
- 5) Der Energieaufwand setzt sich zusammen aus Aufwendungen für Heizung (Produktion) + Strom + Treib- und Schmierstoffe + Heizung (Verkaufs- und Arbeitsräume).
- 6) Die Abschreibungen auf Produktionsanlagen und Maschinen setzen sich zusammen aus AfA (Absetzung für Abnutzung) Gewächshäuser + AfA Betriebsvorrichtungen + AfA Heizanlagen + AfA Fuhrpark.
- 7) Die Nettowertschöpfung setzt sich zusammen aus dem Betriebsertrag – Betriebsaufwand (einschließlich Abschreibungen) + Lohnaufwand.



## LITERATUR

1. AHERN, J.E., 1980: The exergy method of energy systems analysis. Wiley, New York, xii, 295.
2. AKAU, R.; SCHOENHALS, R., 1980: The second law efficiency of a heat pump system. *Energy* 5 (8-9), 853–863.
3. ANDRESEN, B.; SALAMON, P.; BERRY, R.S., 1984: Thermodynamics in finite time. *Phys. Today* 37 (9), 62.
4. BABBIE, E.R., 2013: *The Practice of social research*, 13th ed. Wadsworth Cengage Learning, Belmont, CA, xxiii, 584.
5. BEJAN, A., 1980: Second law analysis in heat transfer. *Energy* 5 (8-9), 720–732.
6. BERNDT, E.R., 1978: Aggregate energy, efficiency, and productivity measurement. *Annual Review of Energy* 3 (1), 225–273.
7. BERRY, S.R.; FELS, M.F., 1973: The Energy Cost of Automobiles. *Bulletin of the Atomic Scientists* (10), 11-17 und 58-60.
8. BOULDING, K.E., 1981: *Evolutionary economics*. Sage Publications, Beverly Hills, Calif., 200.
9. BULLARD, C.W.; HERENDEEN, R.A., 1975: The energy cost of goods and services. *Energy Policy* 3 (4), 268–278.
10. BMELV (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz), 2010: Ertragslage Garten- und Weinbau 2010. Berichtsjahr für die BMELV-Testbetriebsergebnisse ist das Wirtschaftsjahr 2008/09 bzw. Kalenderjahr 2008.  
▶ <http://berichte.bmelv-statistik.de/GBB-2000000-2010.pdf>. Accessed 20 March 2014.
11. COSTANZA, R., 1980: Embodied Energy and Economic Valuation. *Science* 210 (4475), 1219–1224.
12. ELECTRICITY CORPORATION OF NEW ZEALAND, 1992: The Developing market for energy efficiency in New Zealand. A discussion paper. The Corporation, Wellington, N.Z., 55.
13. FLENKER, J., 2014: Aktuelle Ergebnisse der ökonomischen Begleitforschung im Projekt ZINEG, in: Deutsche Gartenbauwissenschaftliche Gesellschaft e.V. (DGG) und Bundesverband der Hochschulabsolventen/Ingenieure Gartenbau und Landschaftsarchitektur e.V. (BHGL) (Ed.), 49. Gartenbauwissenschaftliche Jahrestagung, 5. bis 8. März 2014 in Dresden. Nachhaltigkeit und Gartenbau, Dresden.
14. GRUDA, N.; RUHM, G.; BOKELMANN, W.; SCHMIDT, U., 2009a: Die Auswirkung von Heizölpreiserhöhungen auf sächsische Gartenbauunternehmen. Teil II: Ausgangs- und Energiesituation der Unterglasbetriebe, in: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (Ed.), *Berichte über Landwirtschaft*, Band 87(2), Berlin, 246–265.
15. GRUDA, N.; RUHM, G.; BOKELMANN, W.; SCHMIDT, U., 2009b: Die Auswirkung von Heizölpreiserhöhungen auf sächsische Gartenbauunternehmen. Teil I: Ausgangs- und Energiesituation der Unterglasbetriebe, in: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (Ed.), *Berichte über Landwirtschaft*, Band 87(1), Berlin, 87–105.
16. GURRATH, P., 2006: Ergebnisse der Gartenbauerhebung 2005. *Wirtschaft und Statistik* 10/2006. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
17. GYFTOPOULOS, E.P.; LAZARIDIS, L.J.; WIDMER, T.F., 1974: *Potential fuel effectiveness in industry*. Ballinger Pub. Co, Cambridge, Mass., vii, 89.
18. HÜLSBERGEN, K.-J., 2003: Entwicklung und Anwendung eines Bilanzierungsmodells zur Bewertung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Systeme. Shaker, Aachen, 257, XXII S.
19. JENNE, C.; CATTELL, R., 1983: Structural change and energy efficiency in industry. *Energy Economics* 5 (2), 114–123.
20. KRISTINSSON, J., 2006: *The Energy-producing Greenhouse*, Geneva.
21. LEACH, G., 1975: Net energy analysis — is it any use? *Energy Policy* 3 (4), 332–344.
22. LIU, X.; ANG, B.; ONG, H., 1992: Interfuel substitution and decomposition of changes in industrial energy consumption. *Energy* 17 (7), 689–696.
23. PATTERSON, M., 1993a: An accounting framework for decomposing the energy-to-GDP ratio into its structural components of change. *Energy* 18 (7), 741–761.
24. PATTERSON, M.G., 1993b: Approaches to energy quality in energy analysis. *International journal of global energy issues* (5), 19–28.
25. PATTERSON, M.G., 1996: What is energy efficiency? *Energy Policy* 24 (5), 377–390.
26. PATTERSON, M.G.; WADSWORTH, C., 1993: Updating New Zealand's energy intensity trends. What has happened since 1984 and why? *Energy Efficiency and Conservation Authority*, Wellington, N.Z., 82.
27. PENZ, A.; BAKKE, D., 1981: A national index for energy productivity: a study. United States. Congress. Joint Economic Committee, Washington.
28. RENSCHAW, E.F., 1981: Energy efficiency and the slump in labour productivity in the USA. *Energy Economics* 3 (1), 36–42.
29. RICHTER, B., 2011: Statistischer Überblick über den Einsatz von Heizenergie im Unterglasanbau in Deutschland.  
▶ [http://www.energieportal-hortigate.de/download/Heizenergie\\_Unterglasanbau.pdf](http://www.energieportal-hortigate.de/download/Heizenergie_Unterglasanbau.pdf). Accessed 20 March 2014.

30. ROBERTS, W.N.T., 1979: Overall energy balances and the "adding up" problem. Workshop on Energy Data of Developing Countries: (held by the International Energy Agency in Paris from 11th to 15th) December 1987, 69–73.
31. RUHM, G.; GRUDA, N.; ALLWÖRDEN, A. VON; STEINBORN, P.; HATTERMANN, H.; BOKELMANN, W.; SCHMIDT, U., 2007: Energiekonzepte für den Gartenbau. Untersuchungen zu den Auswirkungen weiterer Heizölpreissteigerungen auf sächsische Gartenbauunternehmen, daraus abgeleitete innovative Handlungsfelder und Strategie. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Dresden.
32. SCHIPPER, L.; HOWARTH, R.B.; GELLER, H., 1990: United States Energy Use from 1973 to 1987: The Impacts of Improved Efficiency. *Annu. Rev. Energy* 15 (1), 455–504.
33. SCHUCH, I., 2014: 5 Jahre ZINEG – Ein Resümee zur Energieeffizienz des Solarkollektorgewächshauses mit Wärmespeicher, in: Deutsche Gartenbauwissenschaftliche Gesellschaft e.V. (DGG) und Bundesverband der Hochschulabsolventen/Ingenieure Gartenbau und Landschaftsarchitektur e.V. (BHGL) (Ed.), 49. Gartenbauwissenschaftliche Jahrestagung, 5. bis 8. März 2014 in Dresden. Nachhaltigkeit und Gartenbau, Dresden, 28.
34. SCHURR, S.H., 1984: Energy use, technological change, and productive efficiency: an economic-historical interpretation. *Annual Review of Energy* 9 (1), 409–425.
35. SLESSER, M., 1974: Energy Analysis Workshop on Methodology and Conventions, IFIAS Workshop on Energy Analysis, 1974: Energy Analysis Workshop on Methodology and Conventions. 25th - 30th August 1974, Guldsmedshyttan, Sweden. IFIAS, Stockholm, 88 (eng).
36. SENFF, D., 2013: Licht der Zukunft: LED. Bundesministerium für Bildung und Forschung.  
▶ <http://www.photonikforschung.de/forschungsfelder/beleuchtungled/>. Accessed 18 October 2013.
37. SIOSHANSI, F.P., 1986: Energy, Electricity, and the U.S. Economy: Emerging Trends. *EJ* 7 (2).
38. STANHILL, G., 1980: The energy cost of protected cropping: A comparison of six systems of tomato production. *Journal of Agricultural Engineering Research* 25 (2), 145–154.
39. STERN, D.I., 1993: Energy and economic growth in the USA. *Energy Economics* 15 (2), 137–150.
40. STORCK, H., 1978: Towards an Economics of Energy in Horticulture, in: Kristofferson, T. (Ed.), Symposium on more profitable use of energy in protected cultivation, The Hague, 15–30.
41. STORCK, H., 1979: Energieeinsatz und Energieeffizienz im Bereich des Gartenbaus, in: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Ed.), Berichte über Landwirtschaft; Sonderheft 195. Neue Folge. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Bonn, 40–59.
42. TURVEY, R.; NOBAY, A.R., 1965: On Measuring Energy Consumption. *The Economic Journal* 75 (300), 787–793.
43. Energetische Nutzung von Biomasse im Unterglasgartenbau, 2010: ▶ [http://www.bgt.uni-hannover.de/fileadmin/mitarbeiterseiten/Literatur/Posterbeitrag\\_IPM\\_end.pdf](http://www.bgt.uni-hannover.de/fileadmin/mitarbeiterseiten/Literatur/Posterbeitrag_IPM_end.pdf). Accessed 20 March 2014.
44. VADIEE, A.; MARTIN, V., 2012: Energy management in horticultural applications through the closed greenhouse concept, state of the art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (7), 5087–5100.
45. VAN GOOL, W., 1980: Thermodynamic aspects of energy conservation. *Energy* 5 (8-9), 783–792.
46. VRINGER, K.; BLOK, K., 2000: The energy requirement of cut flowers and consumer options to reduce it. *Resources, Conservation and Recycling* 28 (1-2), 3–28.
47. WILSON, B.; TRIEU, L.H.; BOWEN, B., 1994: Energy efficiency trends in Australia. *Energy Policy* 22 (4), 287–295.
48. WU, C., 1988: Power optimization of a finite-time Carnot heat engine. *Energy* 13 (9), 681–687.

---

## Autorenanschrift

Stephan Meyerding M.Sc.  
 Zentrum für Betriebswirtschaft im Gartenbau e. V.  
 am Institut für gartenbauliche Produktionssysteme  
 der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover  
 Herrenhäuser Str. 2  
 30419 Hannover

E-Mail: ▶ [meyerding@zbg.uni-hannover.de](mailto:meyerding@zbg.uni-hannover.de)