



Energiemessung – Energiekennzahlen

Einleitung

Die zur Herstellung eines Produktes benötigte Energie beeinflusst die Umweltlast des Herstellungsprozesses wesentlich. Dabei liegt die oft übersehene eigentliche Problematik bei den durch die Energieerzeugung (z.B. Verbrennung fossiler Energieträger) generierten Emissionen und Abfällen. Diese rufen eine Fülle von Belastungen hervor. Beispielsweise finden wir bei einer harmlosen Laborreaktion plötzlich radioaktive Abfälle!¹ Aus diesem Grund ist die Reduktion des Energieverbrauchs chemischer Umsetzungen in der Industrie, und damit auch als Lehrziel im Labor aus Sicht des Umweltschutzes und der Nachhaltigen Entwicklung wichtig.

Um dieses Ziel zu erreichen und den bei der Optimierung der Synthese erreichten Fortschritt zu beurteilen, ist es zunächst notwendig, den Energieverbrauch zu erfassen und mittels Kennzahlen zu bewerten. Im Labor ist die Erfassung und Bewertung des Energieverbrauchs relativ einfach mit Hilfe kostengünstiger Geräte zu erreichen. Nachfolgend wird die Vorgehensweise bei der Energiemessung beschrieben.

Messen des Energieverbrauchs

Die für eine Umsetzung verbrauchte elektrische Energie lässt sich mit relativ geringem Aufwand messen. Im Handel gibt es kostengünstige Verbrauchszähler, die in ihrer Genauigkeit für den Zweck der Energiemessung bei Laborreaktionen ausreichen. Beispiele:



Abb.1: Beispielmessgerät 1



Abb.2: Beispielmessgerät 2



Abb.3: Beispielmessgerät 3

¹ Hintergrund des radioaktiven Abfalls ist der Strombezug aus dem Stromnetzverbund in Deutschland. Die Energieerzeugung erfolgt hierbei in Steinkohle-, Braunkohle-, Heizöl-, Gas-, Kern- und Wasserkraftwerken.



Bei der Vorbereitung der Messung ist es notwendig, alle für den jeweiligen Arbeitsschritt der Umsetzung benötigten Verbraucher am Messgerät anzuschließen. Werden mehrere Verbraucher benötigt, kann dies zum Beispiel über eine Mehrfachsteckerleiste realisiert werden. Um vergleichbare Messungen durchzuführen ist es ratsam, die angeschlossenen Geräte vor Start der Messung in ihren Betriebszustand zu überführen. Dies bedeutet, dass z.B. die gewünschte Ölbad- oder Kryostattemperatur bereits erreicht ist, da der Energieverbrauch zum Aufheizen bzw. Abkühlen je nach Starttemperatur unterschiedlich ist. Sind die Geräte angeschlossen und in ihrem Betriebszustand, kann die Messung gestartet werden. Nach Beendigung der Reaktion wird die verbrauchte Energie einfach abgelesen. Bei der Messung des Energieverbrauchs können die Messwerte je nach Bearbeiter, verwendeten Geräten und der Ansatzgröße schwanken. Der Aufbau der Versuchsanordnung darf für Vergleichsmessungen nicht verändert werden.

Die Energieverbrauchszähler ermitteln die verbrauchte elektrische Energie in der Regel in der Einheit Wattstunden (Wh). Mit Hilfe des Umrechnungsfaktors 3.6 kann diese Einheit leicht in die abgeleitete SI-Einheit Kilojoule (kJ) überführt werden. Über den ermittelten Energieverbrauch können nun einige Energiekennzahlen berechnet werden. Mit Hilfe der Kennzahlen lassen sich Problembereiche einer Reaktion erkennen und Optimierungspotenziale aufzeigen.

Energiekennzahlen

Umweltkennzahlen sind analog den betriebswirtschaftlichen Kennzahlen als "eine umweltrelevante Größe in Form einer absoluten oder relativen Zahl, die gezielt einen Sachverhalt mit erhöhtem Erkenntniswert beschreibt" definiert [1]. Eine Auswahl passender Umweltkennzahlen kann folglich, entsprechend den betriebswirtschaftlichen Zahlen, für eine entscheidungsorientierte Datenaufbereitung ein geeignetes Instrument sein. Eine Form von Umweltkennzahlen sind Energiekennzahlen. Sie beschreiben, bei Anwendung in der chemischen Synthese, Zusammenhänge zwischen Energie- und Stoffverbrauch bzw. die Verhältnisse des Energieverbrauchs in Reaktion und Aufarbeitung. Dadurch können dem Anwender Schwachstellen aufgezeigt und Optimierungen zielgerichtet durchgeführt werden. Die Aussagekräftigkeit einer Kennzahl ist dabei abhängig von der Qualität der ermittelten Daten. Je genauer die Aufnahme der Verbrauchswerte durchgeführt wird, desto aussagekräftigere Kennzahlen lassen sich ermitteln und umso besser lassen sich Verbesserungen ansetzen. So kann



beispielsweise die Reaktion selbst, oder aber auch nur die Aufarbeitung betrachtet werden. Bei der Bewertung der generierten Kennzahlen ist zu beachten, dass lediglich die verbrauchte elektrische Energie berücksichtigt wurde. Der Verbrauch an Primärenergie, beispielsweise aus der Verbrennung fossiler Energieträger liegt deutlich höher. Je nach Kraftwerkstyp kann für die Berechnung des Primärenergiebedarfs ein Faktor von bis zu 3 angenommen werden.

Energieeffizienz

Die Energieeffizienz stellt das Verhältnis der in einer Synthese verbrauchten elektrischen Energie und dem isolierten Produkt der Reaktion dar.

$$E_E = \frac{m_{\text{Zielprod.}}}{E_{\text{verbr.}}}$$

E_E = Energieeffizienz [kg/kJ]

$m_{\text{Zielprod.}}$ = Masse Zielprodukt [kg]

$E_{\text{verbr.}}$ = Energieverbrauch der Synthese (Reaktion und Aufarbeitung) [kJ]

Unter Berücksichtigung der Umweltlasten aus der Energieerzeugung sinken die Umweltlasten einer Reaktion mit steigender Energieeffizienz. Beim Arbeiten mit der Kennzahl Energieeffizienz ist zu beachten, dass verschiedene Reaktionen nicht miteinander verglichen werden dürfen, da sie einen unterschiedlichen theoretischen Energieverbrauch haben. Es dürfen daher nur gleiche Reaktionen für einen Vergleich herangezogen werden. Die Energieeffizienz ist eine sehr grobe Kennzahl, die einer "Black-Box-Betrachtung" ähnelt. Mit ihrer Hilfe lässt sich nur feststellen, ob sich die Gesamtsynthese hinsichtlich des Verbrauchs elektrischer Energie verbessert hat. Will man detailliertere Aussagen treffen, muss auch die Kennzahl verfeinert werden.

Energetischer Aufarbeitungsaufwand (A_E)

Die Aufarbeitung eines Reaktionsgemisches nimmt bei der chemischen Synthese einen wesentlichen Teil der Arbeiten ein. Neben den im Vergleich zur Reaktion oft größeren Mengen benötigter Stoffe, wird für die Isolierung und Reinigung sehr oft auch eine große Menge elektrischer Energie benötigt. Die relative Kennzahl "energetischer Aufarbeitungsaufwand A_E " erlaubt es, eine Aussage über die Höhe des Energieeinsatzes pro Produkteinheit zu treffen. Sie wird gebildet aus dem Verhältnis von für die Aufarbeitung verbrauchter Energie zur Masse des erhaltenen Zielproduktes:



$$A_E = \frac{E_{\text{Aufarbeit.}}}{m_{\text{Zielprod.}}}$$

- A_E = Energetischer Aufarbeitungsaufwand [kJ/kg]
 $E_{\text{Aufarbeit.}}$ = Energieverbrauch der Aufarbeitung [kJ]
 $m_{\text{Zielprod.}}$ = Masse Zielprodukt [kg]

Verhältnis Reaktion/Aufarbeitung

Der Energieverbrauch von Reaktion und Aufarbeitung trägt wesentlich zur Gesamtumweltbelastung von Laborreaktionen bei. Interessant ist, dass sehr oft ein Ungleichgewicht des Energieverbrauches auf Seiten der Aufarbeitung liegt. Ursache dafür sind Parallel- und Folgereaktionen sowie im Reaktionsgemisch verbleibende Katalysatoren und Lösungsmittel, die oft über viele Stufen abgetrennt werden müssen. Mit Hilfe des Vergleiches des Energieverbrauches von Reaktion und Aufarbeitung können Aussagen über den Grad der notwendigen Aufarbeitung nach der Reaktion gemacht werden.

$$E_{R/A} = \frac{E_{\text{Aufarbeit.}}}{E_{\text{Reaktion}}}$$

- $E_{R/A}$ = Verhältnis Energieverbrauch Reaktion/Aufarbeitung
 $E_{\text{Aufarbeit.}}$ = Energieverbrauch der Aufarbeitung [kJ]
 $E_{\text{Reaktion.}}$ = Energieverbrauch der Reaktion [kJ]

Je kleiner die Kennzahl, desto günstiger ist die Reaktion zu bewerten. Je größer die Kennzahl, desto notwendiger werden Optimierungen der Reaktion, um die Aufarbeitung zu erleichtern.

Energieinduzierte Methanäquivalente

Mit Hilfe der Kenngröße "Energieinduzierte Methanäquivalente", soll die für eine Synthese und deren Aufarbeitung benötigte Energie anschaulich dargestellt werden. Es wird dabei zu Grunde gelegt, dass elektrische Energie in Deutschland mehrheitlich aus der Verbrennung fossiler Energieträger gewonnen wird. Für die Ermittlung der Methanäquivalente wird angenommen, dass elektrischer Strom nur aus der Verbrennung von Methan ($H_U^2 = 47.5 \text{ MJ/kg}$) gewonnen wird. Das Modellkraftwerk arbeitet nicht mit der Methode der ² H_U (unterer Heizwert): *Nutzbarer Anteil der bei einer Verbrennungsreaktion frei werdenden Energie. Berechnet sich aus der gesamten frei werdenden Energie (oberer Heizwert H_O) vermindert um die zur Verdampfung des Reaktionswassers notwendige Energie.*



Kraft-Wärmekopplung und stellt mit einem Wirkungsgrad von 43 % elektrische Energie zur Verfügung. Es wird nun die Menge Methan in Mol berechnet, die für die Bereitstellung der in der Reaktion, in der Synthese oder in der ganzheitlichen Betrachtung der Reaktion verbrauchten Energie benötigt wird (1MJ = 3,052 mol Methan). Demnach steht nicht mehr die eigentliche Energie im Vordergrund, sondern es wird die Reaktion



zur Energieerzeugung mit der Laborsynthese verglichen. Mit Hilfe dieser Abstraktion kann die Bedeutung des Energieverbrauchs für die Umweltlast chemischer Reaktionen verdeutlicht werden. Um eine chemische Reaktion im Labor zu ermöglichen, müssen gleichzeitig in einer anderen Reaktion fossile Energieträger umgesetzt werden. Die Kennzahl Methanäquivalente K_M wird gebildet, in dem die Ausbeute der Reaktion in Mol zu der errechneten Stoffmenge Methan ins Verhältnis gesetzt wird.

$$K_M = \frac{n \text{ Methan}}{n \text{ Zielprodukt}}$$

K_M	= energieinduzierte Methanäquivalente
$n \text{ Methan}$	= Stoffmenge Methan zur Energiebereitstellung [mol]
$n \text{ Zielprodukt}$	= Stoffmenge Zielprodukt [mol]

Mit Hilfe dieser Kennzahl kann die, für viele Chemiker möglicherweise zu abstrakte, Einheit der elektrischen Energie kJ bzw. Wh anschaulich dargestellt werden. Zusätzlich kann mit dieser Kennzahl direkt eine Aussage über den Beitrag der Reaktion zum anthropogen verursachten Treibhauseffekt gemacht werden.

[1] Loew, Thomas und Kottmann, Heinz, 1996. Kennzahlen im Umweltmanagement Ökologisches Wirtschaften 2/96, S. 10-12.