

Was hat Recycling mit Entropie zu tun?

Prof Dr. Bernd Spangenberg



Prof. Dr. Bernd Spangenberg
Studium der Chemie und Philosophie an der Philipps-Universität Marburg. Nach der Promotion 1987 Forschungs- und Entwicklungsleiter bei Scheurich Pharmwerk GmbH in Appenweiler und bei der Ebulon AG in Basel. Seit 1991 Professor für Umweltanalytik an der Fachhochschule Offenburg im Fachbereich Verfahrenstechnik mit den Arbeitsschwerpunkten Chromatographie, Chemometrie sowie Abfall- und Recyclingtechnik.

Zusammenfassung

Alle Materie strebt nach maximaler Unordnung. Dieses Erkenntnis wird durch die thermodynamische Funktion der Entropie beschrieben. Auch bei jeglicher Art menschlichen Handelns wird die Entropie immer erhöht. Wird in der Technik Materie in geordnete Formen gebracht (z. B. beim Herstellen von Pfandflaschen), findet in diesem Produkt eine Entropieerniedrigung statt. Gleichzeitig wird aber an anderer Stelle die Unordnung beträchtlich vergrößert. Diese Entropieerhöhung nennen wir Abfall. Jede Entropieerhöhung ist mit dem Verbrauch wertvoller Ressourcen verbunden. Durch eine optimale Recyclingtechnik kann einer Entropieerhöhung von Materie entgegengearbeitet werden. Aber nur Recyclingraten von über 90 % erlauben eine wirksame Streckung der Ressourcen.

Einleitung

Die Erdkruste enthält eine sehr große Menge an Materialien wie Metalloxide oder auch Phosphate, die als „nicht erneuerbare“ Rohstoffe zur Metall- oder zur Kunstdüngergewinnung unverzichtbar sind. Daneben benötigt die Menschheit auch große Mengen an „nachwachsenden“ Rohstoffen wie Holz, Süßwasser oder Nahrungsmittel allgemein, die damit auf den ersten Blick unerschöpfliche Ressourcen darstellen, da sie immer wieder neu produziert werden. Bei aller Diskussion um das Thema „Nachhaltigkeit“ muß heute mehr denn je von der prinzipiellen Endlichkeit aller Ressourcen ausgegangen werden. Schon 1980 wird in „The Global 2000 Report to the President“ [1] festgestellt, dass gerade erneuerbare Ressourcen endlich und sogar erschöpfbar, also nicht wieder regenerierbar sind. Als Beispiel ist die Nordamerikanische Wandertaube aufgeführt [1]. Als man im neunzehnten Jahrhundert in Nordamerika Jagd auf diese Taubenart machte, galten die in riesigen Schwärmen auftretenden Vögel als unendliche, weil erneuerbare Ressource. Schließlich brüteten die Tauben und brachten so jedes Jahr neue Tauben hervor. Im Gegensatz zu mineralischen Rohstoffen waren die Tauben aber nicht über die ganze Welt verstreut. Leider sammelten sie sich, einem biologisch verhängnisvollen Instinkt folgend, nach jedem Jagdangriff wieder neu. Das ließ sie zu einem erneuten leichten Ziel der Jäger werden. Die Geschichte ist bekannt. Nach wenigen Jahren waren die schier unerschöpflichen Wandertaubenbestände ausgerottet. Da die Art heute ausgestorben ist, kann sie auch nie wieder erneuert werden.

Entropie

Mineralische Rohstoffe sind zumindest theoretisch vollständig erneuerbar, da Atome weder verbraucht noch vernichtet werden können. Ein Zinkatom bleibt

ein Zinkatom und kann damit über einen Recyclingprozess prinzipiell unendlich häufig wiederverwendet werden. Das dem in der Wirklichkeit nicht so ist, zeigt schon die Tatsache, dass Zink als Abfall nur in geringem Umfang recycelt wird. Eher wird Zink aus Mineralien neu gewonnen.

All die bis hierher geschilderten Vorgänge lassen sich mit dem aus der Thermodynamik stammenden Begriff der Entropie beschreiben. Die Entropie (S) bezeichnet den „Grad der Vermischtheit aller Dinge“. Beim menschlichen Wirtschaften wie auch in der Natur führt das Aufkonzentrieren von Materie auf der einen Seite immer auch zu einer (wertmäßig größeren) Verdünnung von Materie auf der anderen Seite [2]. Bei der Aufkonzentration von z. B. Eisenerz zu Roheisen wird gleichzeitig Schlacke produziert und vor allem CO₂ in der Umwelt verteilt. Die Entropie einer Verteilung für n mole Substanz, wobei N_R für die molare Stoffmenge des Rohstoffes in der Gesamtmenge N_G des Erzes steht, wird folgendermaßen beschrieben:

$$S = nR \ln(P) = nR \ln \frac{N_R}{N_G} \quad (1)$$

Die Abkürzung P beschreibt dabei die Wahrscheinlichkeit eines Zustandes im Vergleich zu anderen Zuständen [3]. Oft wird jedoch das Stoffmengenverhältnis des Rohstoffes zur Gesamterzmenge N_R/N_G angegeben [4]. Die Entropie beschreibt bei Erzlagern die Güte eines Erzes. Niedrige Entropie bedeutet ein großes Verhältnis von Rohstoff zur Gesamterzmenge. Arme Lagerstätten zeigen einen grossen Erzentropiewert, also einen kleinen P-Wert, da der gesuchte Rohstoff stark mit anderen Materialien verunreinigt ist. Zur Aufkonzentration wird, wie Abb. 1 zeigt, entsprechend viel Energie benötigt. Diese freie Energie U_N für n mole berechnet sich zu:

$$U_N = nRT \ln \frac{N_R}{N_G} \quad (2)$$

Je niedriger die Entropie einer Ressource, um so wertvoller ist sie für uns. Die begehrte Jagdbeute Wandertaube war eine konzentriert vorhandene und damit bequem ausbeutbare Ressource.

Was ist Abfall?

Alles, was bei einem Produktionsprozess wie der Eisengewinnung nicht als Roheisen in eine entropieerniedrigte Form wandert, sondern übrig bleibt, nennen wir Abfall. Abfall ist für uns wertlos, weil aus ihm nur unter extremer Entropieerniedrigung, also verbunden mit hohen Kosten, verwertbare Produkte gewonnen werden können. Zeigen Abfälle eine niedrige Entropie, das heißt einen kleinen Vermischungsgrad, sind sie prinzipiell wertvoller als Abfälle hoher Entropie. Die Abgrenzung des Begriffs Abfall, gerade gegenüber der Bezeichnung „Wertstoff“, ist schwer zu fassen und wird am besten als Materieentropie definiert. Je höher die Entropie eines Stoffes, je eher ist dieser als Abfall zu klassifizieren.

Was beschreibt Recycling?

Falls Abfall nicht deponiert sondern erneut benutzt wird, nennen wir diesen Vorgang Recycling. Wörtlich

aus dem englischen übersetzt bedeutet es „in den Kreislauf zurückführen“.

Betrachtet man einen Produktionsprozess (z. B. die Produktion von Pfandflaschen) über die Zeit hinsichtlich der Materieentropie, zeigt das Endprodukt immer die niedrigste Entropie aller beteiligten Stoffe [5]. Aus den Rohstoffen Sand und Soda wird durch Entropieerhöhung von CO₂ Glas in eine hochgeordnete Flaschenform gebracht. Das Endprodukt „gefüllte Pfandflasche“ wird im weiteren durch die Benutzung des Verbrauchers in seiner Entropie erhöht. Beim Trinken wird der Flascheninhalt verteilt und die Flasche selbst verunreinigt. Sie wird zu Abfall. Um eine Pfandflasche erneut benutzen zu können, muß deren Entropie wieder erniedrigt werden. Der Recyclingwunsch wandelt die Abfallflasche zum Wertstoff. Sie wird nun beim Abfüller gereinigt, gefüllt und neu beschriftet. Ein erster Kreislauf ist geschlossen. Diesen Vorgang nennt man *Wiederverwendung*. Die Entropieerniedrigung in der Pfandflasche geht einher mit einer (grösseren!) Entropieerhöhung im Waschwasser. Die durch die Funktion der Entropie ausgedrückte thermodynamische Unsymmetrie läßt sich auch wie folgt formulieren: „Beim Säubern (der Flaschen) wird zwangsweise etwas anderes schmutzig. Wird etwas schmutzig, muß aber nicht automatisch etwas anderes sauber werden.“

Wird die gebrauchte Pfandflasche für einen anderen, neuen Anwendungsbereich verwendet, z. B. als Kerzenständer oder Behälter für Altöl, nennen wir dies eine *Weiterverwendung*. Auch hier zeigt sich die entropische Unsymmetrie. Eine solchermaßen weiterverwendete Flasche wird beim Abfüller sicherlich aussortiert, statt erneut mit Getränk gefüllt zu werden. Falls die Pfandflasche nicht weiterverwendet wird, kann sie im Kreislauf der Wiederverwendung eine Zyklenzahl von etwa 43 erreichen [6]. Leider wird die Flaschenentropie durch jeden Zyklus leicht erhöht, da das Transportieren, Benutzen und Reinigen der Flasche deren Oberfläche abnutzt. Bedingt durch kleine Ritze wird die Glasflasche irgendwann brechen, und dann werden die Glasscherben üblicherweise durch Schmelzen in den chemischen Grundstoff Glas umgewandelt, welches erneut einem Produktionsprozess zugeführt werden kann. Diese Entropieerniedrigung durch einen Produktionsprozess nennt man *Wiederverwertung*. Hierbei wird unter Formaauflösung das Produkt Pfandflasche für den Wiedereinsatz erneut hergestellt.

Läßt das Abfallglas (z. B. wegen zu starker Vermischung verschieden farbiger Gläser) eine erneute Flaschenproduktion nicht zu, kann das Glas einer *Weiterverwertung* (z. B. feingemahlen als reflektierender Straßenbelag) zugeführt werden. Von einer Weiterverwertung spricht man, wenn der Abfall unter Gestaltänderung zu neuen Wertstoffen umgearbeitet wird. Die Weiterverwertung steht damit am Ende eines Flaschenlebens. Hier erhält die Pfandflasche die größte Materieentropie aller Recyclingstufen.

Häufig scheitert das Recyclieren von Wertstoffen gerade an der zu teuren Sortierung. Das Altglas kann in diesem Fall nur noch deponiert werden. Wird die Flasche zu Abfall, steigt ihre Entropie über die der Glasrohstoffe Sand und Soda, da der Abfall nicht als Wert-

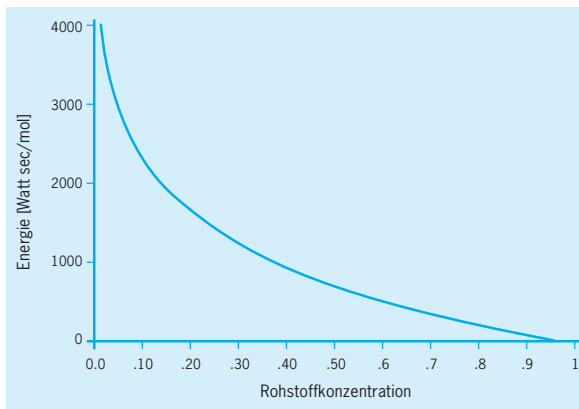


Abbildung 1:
Auftragung der Freien Energie (bei Raumtemperatur) gegen die eingesetzte Erzverteilung

stoff recycelt wird. Dies ist der Fall, wenn die Kosten einer Entropieerniedrigung des Abfalls über den Kosten einer Rohstoffbereitstellung liegen. Aber auch für Abfall auf einer Deponie gilt: die Entropie darf sich nicht weiter erhöhen. Das Multibarrierenkonzept [6] zum Betrieb von Deponien soll dies verhindern.

Die Grenznutzungsrate in Recyclingprozessen

Beim Recyclieren soll aus der Gesamtstoffmenge des Wertstoffes N_W die Rohstoffmenge N_R unter Abtrennung des Abfalls N_A isoliert werden. Es gilt dann:

$$N_W = N_R + N_A \quad [3]$$

Bei einer Umwandlungsrate von Wertstoff in Rohstoff mit 90% geht nur 1/10 des Wertstoffes als Abfall verloren. Hier und im Abfall des Betriebsprozesses (z. B. der Verlustenergie oder dem Maschinenverschleiss) steckt die Entropieerhöhung, die zur Entropieabsenkung des Wertstoffes zum Rohstoff benötigt wird. Da vom Wertstoff nur 10% als Abfall aus dem Prozess ausgetragen wird, kann dieser Wertstoff rein rechnerisch 10 mal zu Rohstoff recycelt werden. Erst dann ist der gesamte Wertstoff des ersten Recyclingschrittes in den Abfall gewandert. Die maximale Grenznutzungsrate NR_G , der Kehrwert des Anteils der abgetrennten Abfallmenge N_A , liegt damit bei 10. Bei einer festgelegten Wertstoffmenge von $N_W = 1$ (100%) gilt für die maximale Grenznutzungsrate aus einem Recyclingprozess:

$$NR_G = \frac{1}{N_W - N_R} = \frac{1 - N_R + N_R}{1 - N_R} = 1 + \frac{N_R}{1 - N_R} \quad (4)$$

Wird die aus einem Recyclingprozess erhaltene Rohstoffmenge N_R als prozentuale Recyclingrate $RR(\%)$ der eingesetzten Wertstoffmenge geschrieben, gilt folgende Gleichung eines Michaelis-Menten-Typs:

$$NR_G = 1 + \frac{RR(\%)/100}{1 - RR(\%)/100} \quad (5)$$

Wird z. B. ein Wertstoff mit einer Recyclingrate von 50 % recycelt, also in einen Rohstoff umgewandelt, wird nach dem ersten Recyclingschritt eine Nutzungsrate von 1.5 (100 % Nutzung des Neuproduktes und 50 % Nutzung nach Recycling) erreicht. Der nächste Recyclingschritt liefert nur noch einen Beitrag von 0.25 zur Grenznutzungsrate, da von den 50 % im Recyc-

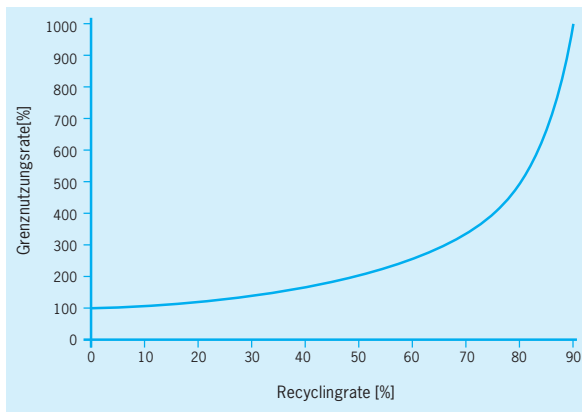


Abbildung 2:
Auftragung der
Grenznutzungsrate
gegen die Recycling-
rate

lingprodukt nur die Hälfte über einen zweiten Recyclingschritt zu erneutem Rohstoff wird. Es ist leicht einzusehen, dass bei mehrfachem Recyclieren eines Neuproduktes mit einer Recyclingrate von 50 %, die Grenznutzungsrate in diesem Prozess gegen den Grenzwert 2 läuft. Wie Gleichung (5) zeigt, kann ein Recyclingprozess mit 50 % Recyclingrate einen Rohstoff maximal um das Doppelte strecken. Aus Abb. 2 wird ersichtlich, dass bei Recyclingraten von über 90 % Grenznutzungsrate von 10 und mehr erreicht werden. Erst bei diesen Raten kann von einer merklichen Streckung eines Rohstoffes gesprochen werden. Beim Recyclieren der Pfandflaschen wird eine maximale Nutzungsrate von etwa 43 erreicht, was einer sehr guten Recyclingrate von 97,7 % entspricht. Um diesen Wert zu erhalten, dürfen beim Spülen der Flaschen nicht mehr als zwei auf 100 Flaschen zerbrechen.

Schlussfolgerungen

Was ist die Quintessenz aus den angeführten Betrachtungen? Alle Materie strebt nach maximaler Unordnung, die durch die Funktion der Entropie beschrieben werden kann. Daher läuft in der Technik nichts verlustfrei, sondern wird immer unter Dissipation betrieben. Die Entropie der Materie steigt global unaufhaltsam an, gerade auch durch den enormen Ressourcenverbrauch der Industrieländer. Durch eine optimale Recyclingtechnik können diese Ressourcen gestreckt werden. Dabei sollte die Materieentropie in jedem Kreislaufsystem (Wiederverwendung, Weiterverwendung, Wiederverwertung, Weiterverwertung) möglichst niedrig gehalten werden. Optimal sind Grenznutzungsrate von über 50, denen Recyclingraten von über 98 % ($49 \cdot 100/50$) entsprechen.

In der Technik hängt die Größe der Entropieerhöhung besonders vom Grad der Information ab, die wir über einen Produktionsprozess besitzen. Das gilt gerade auch für Recyclingprozesse. Das „know how“ ist in der Recyclingtechnik zum Energiesparer und Abfallvermeider geworden. Wissen, nicht nur technisches Wissen, wird in Zukunft einen immer größeren Beitrag zur Reduktion oder Vermeidung von Entropieerhöhungen leisten. In der Wissenschaft und Technik vermutete Hans Jonas sogar die einzige permanent anti-entropische Bewegung [7]. Dabei sollten wir jedoch nicht vergessen, dass das umfangreichste „know how“ auf Erden in den Lebewesen dieses Planeten ge-

speichert ist. Leben ist Materie extrem niedriger Entropie. Heute wissen wir um diesen Schatz, beginnen aber erst allmählich, diese Information auch technisch umzusetzen. Trotzdem lassen wir zu, dass Arten unwiederbringlich verschwinden. Die Wandertauben Nordamerikas wurden im wahrsten Sinne des Wortes zu Abfall, den wir durch keinen Reclingprozess der Welt wieder in Tauben verwandeln können. Hierzu fehlt uns einfach das Wissen.

Leider kann trotz ausreichender Information zu einen Produktionsprozess nicht oft beliebig recycelt werden. Zur Entropieerniedrigung wird neben Information auch immer freie Energie benötigt. Abb. 1 zeigt anschaulich, wie die Energie zur Gewinnung von Rohstoffen steil ansteigt, wenn sich der Verteilungsgrad vergrößert. Irgend wann wird uns die fossile Energie zur Rohstoffgewinnung ausgehen, zumal die Rohstofflagerstätten selbst immer größere Verteilungsgrade bekommen. Unseren augenblicklichen Wohlstand verdanken wir der niedrig entropischen Energie Erdöl. Wständen wir, müssten wir unser Erdöl wie Olivenöl selber herstellen? Auch sollten wir mit dem Selbstbetrug aufhören, Energieinhalte anderer fossiler Quellen auf Erdöläquivalente hochzurechnen, ohne deren relativ hohe Entropie zu berücksichtigen. Wir sollten vielmehr bei Zeiten, gleich der Natur, zur Entropieerniedrigung auf die Sonne als Energiequelle setzen. Deren Abfälle belasten die Erde nicht. Nur die Sonne kann uns auf Dauer die für den Fortbestand der Menschheit notwendige freie Energie liefern. Moralisch kann die Ausbeutung einmaliger Rohstoffe niedriger Entropie ohnehin nur dann gerechtfertigt werden, wenn wir zukünftigen Generationen als Gegenleistung eine nachhaltige, dauerhaft funktionierende Technik bereitstellen. Damit sollten wir bald anfangen, denn die Menschheit hat nur einen Versuch frei, mit den fossilen Schätzen unseres Planeten eine dauerhafte Lebensgrundlage für zukünftige Generationen zu schaffen. Scheitern wir heute, braucht es wieder Millionen von Jahren, bis die Sonne durch Pflanzen, Tiere, Wind und Wasser erneut soviel potentielle Energie als niedrig entropische Materie bereitgestellt hat, dass ein zweiter Versuch, mit wem auch immer, anlaufen könnte.

Literaturangaben

- [1] Global 200, Der Bericht an den Präsidenten, Zweitausendeins, 1980, 480–486
- [2] G.Eichele, Müll und Abfall, 6 (1989), 330–332
- [3] F. Vollrath, AbfallwirtschaftsJournal 2, (1990), 94–96
- [4] M. Faber, H. Niemes, G. Stephan, Entropy, Environment and Ressourcen, Springer-Verlag, 1987, 1995
- [5] R. Esser, AbfallwirtschaftsJournal 4 (1992), 227–237
- [6] F. J. Dreyhaupt, VDI-Lexikon Umwelttechnik S. 802, VDI-Verlag 1994
- [7] H. Jonas, Das Prinzip Verantwortung, Suhrkamp 1984

Anschrift des Verfassers

Prof. Dr. Bernd Spangenberg
 Fachbereich Verfahrenstechnik
 Fachhochschule Offenburg
 Badstrasse 24, 77652 Offenburg
 Tel.: (07 81) 2 05-0
 Fax: (07 81) 20 52 42