7.1 Einleitung

Seit Jahrhunderten wurden technische Erzeugnisse ausschließlich mit dem Ziel ihres *Gebrauchs* entwickelt und produziert, ohne zu berücksichtigen, was danach mit ihnen geschehen soll. Die Frage einer möglichen Wiederverwendung bzw. Wiederverwertung und letztlich einer Entsorgung stellte sich nicht. Das Entsorgen der Erzeugnisse, bisher zu interpretieren als das „Entledigen“ eines unbrauchbar gewordenen Produktes, erfolgte durch Wegwerfen, im günstigsten Fall wenigstens noch durch Ablagerung auf einer Mülldeponie. Mit Recht tragen daher vergangene und mit nur geringen Einschränkungen auch noch die heutige Industriegesellschaft den Stempel „*Wegwerfgesellschaft*“. Der Wegwerfgrund „Unbrauchbarkeit“ bezog und bezieht sich dabei immer nur auf den technisch oder ökonomisch nicht mehr sinnvollen Einsatz des Produktes, wobei man andere Werte, wie z. B. die Werkstoff- und Energieeigenschaften, ignoriert. So scheiden hohe Produktwerte nach immer kürzer werdender Gebrauchsdauer aus dem Nutzungskreislauf aus und verkommen zu Abfall. Jedoch wird aufgrund

- eines exponentiell wachsenden Verbrauchs von stofflichen Ressourcen bei nur endlicher Verfügbarkeit,
- des zunehmenden Anstiegs von freigesetzten Schadstoffen bei nur begrenzter Aufnahmefähigkeit der Biosphäre und
- eines zunehmenden Verlusts stofflicher Ressourcen durch Ablagerung nicht mehr benötigter technischer Produkte auf Mülldeponien (womit die Rückgewinnung aufgrund der durch die dissipative Stoffverteilung geringen Werkstoffkonzentrationen praktisch unmöglich ist)

diese Wegwerfmentalität heute zur existenziellen Bedrohung der Menschheit.

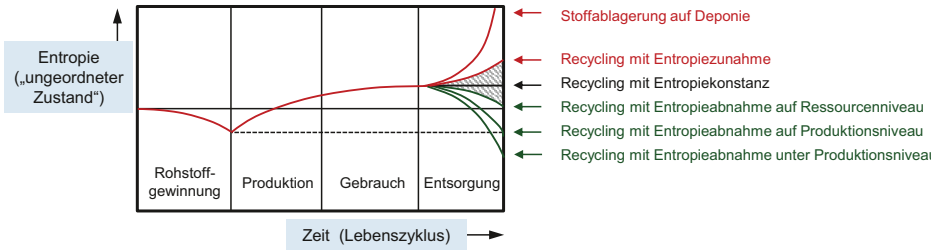

Abb. 7.1 Verlauf der Entropie von Stoffen im Produkteinsatz. (Nach [1])

Der unwiederbringliche Verlust von Rohstoffen durch ihre Entropiezunahme ist besonders problematisch.[1] Die Entropie eines Prozesses ist nicht nur durch die Differenz der Stoffmengen zu Prozessbeginn und -ende, sondern auch durch die Differenz der Ordnungszustände zu Beginn und Ende eines Prozesses gekennzeichnet. Abb. 7.1 zeigt, dass der Ordnungszustand unserer Rohstoffe durch die Herstellung von Wertstoffen zunächst noch weiter verbessert wird (Abnahme der Entropie), um sich dann ständig zu verschlechtern, z. B. in der Produktion durch Abfälle, mit einem weiteren „Verdünnen“ bzw. „Vermischen“ der Werkstoffe durch Montage zu komplexen Gebilden sowie im Gebrauchsprozess durch Verschleiß und Korrosion. Schließlich steigt die Stoffvermischung mit der Ablagerung auf Deponien exponentiell in das Extreme („Stoffablagerung auf Deponie“ in Abb. 7.1). Die dissipative Verteilung der Wertstoffe macht diese praktisch zu verlorenem Material. Anzustreben ist daher ein Recycling mit Erhalt der Entropie („Recycling mit Entropiekonstanz“ in Abb. 7.1). Im Allgemeinen sind jedoch Verluste zu akzeptieren, sodass zukünftig unabdingbare Recyclingprozesse im grauen Bereich von Abb. 7.1 liegen werden.

Bezieht man die bisherigen Betrachtungen auf elektronische Geräte, so fallen einige Besonderheiten bei deren Fertigung, Nutzung und Entsorgung auf:

- Massenhafte Existenz von Geräten (ungefähr eine Milliarde Elektronikgeräte sind in Deutschland im Gebrauch),
- hohe Erneuerungs- und damit hohe Freisetzungsrate „alter“ Geräte,
- massenhaftes Elektronikschrottaufkommen (in der EU wandern rund 5 Mio. t ausgedienter Elektro- und Elektronikgeräte jährlich in den Müll),
- hoher Werkstoffeinsatz in den Geräten und hohe Werkstoffintensität bei deren Produktion (eine Tonne Werkstoff muss gewonnen, transportiert und bearbeitet werden, um „4 kg Gerät“ zu erzeugen),
- hoher Anteil von Schad- und Wertstoffen in den Geräten,

[1] Ein Beispiel zur Veranschaulichung des Entropiebegriffs sind komplexe, bautechnische Gebilde. Hier befinden sich die Steine in einem hochgeordneten und damit *entropiearmen* Zustand. Dieser Zustand konnte nur durch Einsatz von Energie erreicht werden. Überlässt man dieses Gebilde sich selbst, so verfällt es im Laufe der Zeit, und nach einigen Jahren herrscht der ungeordnete, entropiereiche Zustand. Verallgemeinert bleibt bei allen natürlichen Prozessen die Entropie erhalten oder sie nimmt zu.

- geringe Wiederverwendungs- und Wiederverwertungsrate (30 bis 40 %),
- Energieverbrauch durch Standby-Betrieb (3 bis 4 % des gesamten Stromverbrauchs in Deutschland),
- Recyclingunfreundlichkeit insbesondere komplexer Geräte.

Es ist daher eine dringende Forderung der Zeit, von der bisherigen Abfall- bzw. Wegwerfwirtschaft zu einer *Kreislaufwirtschaft* überzugehen. Das erfordert, die bisherige „offene Stoffflusskette“ (Abb. 7.2 links) durch erneutes Verwenden oder Verwerten der Produkte bzw. Geräte zu einem Kreislauf zu schließen (Abb. 7.2 rechts). Damit sollen die eingesetzten Rohstoffe über deren Lebenszyklus hinaus wieder vollständig in den Produktionsprozess zurückgelangen.

Schon seit 1994 gilt in der Bundesrepublik Deutschland das Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz, KrWG) (2012 umbenannt in „Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen“ [2]). Zweck des Gesetzes ist die Förderung der Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen. Der Teil 3 des Gesetzes mit dem Titel „*Produktverantwortung*“ legt fest, dass sich diese auf den gesamten Lebenszyklus eines Produktes von der Entwicklung über die Herstellung und den Einsatz bis hin zur Entsorgung bezieht: „Erzeugnisse sind möglichst so zu gestalten, dass bei ihrer Herstellung und ihrem Gebrauch das Entstehen von Abfällen vermindert wird und sichergestellt ist, dass die nach ihrem Gebrauch entstandenen Abfälle umweltverträglich verwertet oder beseitigt werden.“ [2]

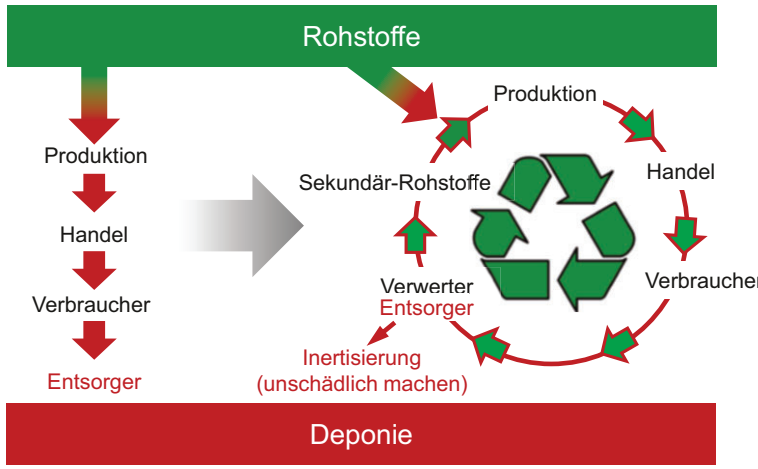

Abb. 7.2 Übergang von der bisherigen offenen Stoffflusskette (*links*) zu einer Kreislaufwirtschaft (*rechts*)

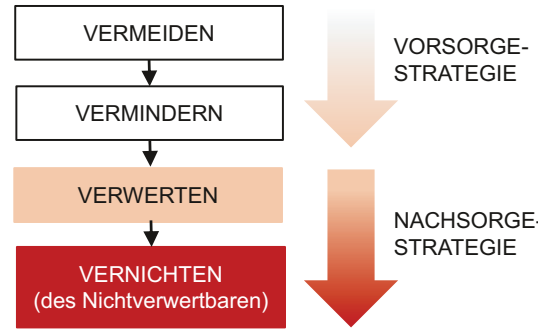

Abb. 7.3 Die 4-V-Strategie der Abfallbehandlung, die eine Abfallvermeidung priorisiert und das Vermindern des nichtvermeidbaren Abfalls anstrebt

Die sich für den Entwicklungsingenieur ergebende Produktverantwortung ist hierbei definiert als

1. die Entwicklung, die Herstellung und das Inverkehrbringen von Erzeugnissen, die mehrfach verwendbar, technisch langlebig und nach Gebrauch zur ordnungsgemäßen, schadlosen und hochwertigen Verwertung sowie zur umweltverträglichen Beseitigung geeignet sind,
2. den vorrangigen Einsatz von verwertbaren Abfällen oder sekundären Rohstoffen bei der Herstellung von Erzeugnissen,
3. die Kennzeichnung von schadstoffhaltigen Erzeugnissen, um sicherzustellen, dass die nach Gebrauch verbleibenden Abfälle umweltverträglich verwertet oder beseitigt werden,
4. den Hinweis auf Rückgabe-, Wiederverwendungs- und Verwertungsmöglichkeiten oder -pflichten und Pfandregelungen durch Kennzeichnung der Erzeugnisse sowie
5. die Rücknahme der Erzeugnisse und der nach Gebrauch derselben verbleibenden Abfälle sowie deren nachfolgende umweltverträgliche Verwertung oder Beseitigung.

Damit hat heute die stoffliche Verwertung unter Vermeidung von Werkstoffänderungen Vorrang vor der energetischen Verwertung von Abfällen, also der Nutzung deren energetischen Gehalts. Während bisher nichtverwertbarer Abfall möglichst umweltgerecht zu vernichten war, erfordert die Kreislaufwirtschaft bezüglich des Abfalls eine Vorsorgestrategie, die im *Abfallvermeiden* und dem *Vermindern des nichtvermeidbaren Abfalls* besteht. Insgesamt gilt für die Behandlung des Abfalls die sog. „4-V-Strategie“, wie sie Abb. 7.3 veranschaulicht.