



# 5 Umweltrelevante Systeme und Technologien

## 5.1 Energiewirtschaft und Energietechnik

*Magdalena Wolf und Tobias Pröll*

*Institut für Verfahrens- und Energietechnik,*

*Department für Materialwissenschaften und Prozesstechnik (MAP)*

*[magdalena.wolf@boku.ac.at](mailto:magdalena.wolf@boku.ac.at), [tobias.proell@boku.ac.at](mailto:tobias.proell@boku.ac.at)*

### 5.1.1 Energie und Zivilisation

#### 5.1.1.1 Der Energiebegriff

Die Energie ist eine grundlegende physikalische Größe, die in allen bekannten Betrachtungsebenen auftritt und deren Einheit das Joule<sup>1</sup> (1 J) ist. Das Wort Energie kommt aus dem Griechischen und bedeutet „innen wirken“, in diesem Sinne die Eigenschaft eines Systems (Körper, Stoff, Mechanismus), aus sich heraus eine bestimmte Wirkung zu entfalten. Beispiele dafür sind gespannte Federn, aufgeladene Batterien, chemisch gebundene Energie in Brennstoffen oder die bei der Kernfusion in Sternen, wie unserer Sonne, freigesetzte nukleare Energie. Die Energie hat grundlegende Bedeutung in biologischen Systemen (Energiezufuhr mit Nahrung) und in unserer Zivilisation (Energienutzung).

#### 5.1.1.2 Energienutzung in der Menschheitsgeschichte

Neben der Energiezufuhr über die Nahrungskette hat die Menschheit vor rund 500.000 Jahren begonnen, das Feuer kontrolliert zu nutzen. Dabei wird chemische Brennstoffenergie durch Reaktion mit Luftsauerstoff als Wärme freigesetzt, die aufgrund der hohen Reaktionstemperaturen teilweise als sichtbares Licht abgestrahlt wird. Durch die Verwendung von Feuer stieg der Lebensstandard der Menschen (künstliches Licht, Wärme), und es eröffneten sich neue technologische Möglichkeiten (Bearbeitung von Holz, Stein, Metallverarbeitung). Bis heute geht die zivilisatorische Entwicklung der Menschheit einher mit dem verstärkten Einsatz von Energie. Wind- und Wasserkraft werden seit Jahrhunderten für Mühlen und Bewässerungsanlagen genutzt. Wer über Energie verfügt, kann meist besser leben. Heute sorgt in den industrialisierten Ländern die Energiewirtschaft dafür, dass Energie bedarfsgerecht bereitsteht. Dabei existieren parallele Systeme wie Stromnetz, Erdgasnetz, Tankstellen, Festbrennstoff-

<sup>1</sup> 1 Kilojoule (kJ) = 10<sup>3</sup> J, 1 Megajoule (MJ) = 10<sup>6</sup> J, 1 Petajoule (PJ) = 10<sup>15</sup> J, 1 Exajoule (EJ) = 10<sup>18</sup> J; 3,6 MJ = 1 Kilowattstunde (kWh); 3,6 PJ = 1 TWh (Terawattstunde)

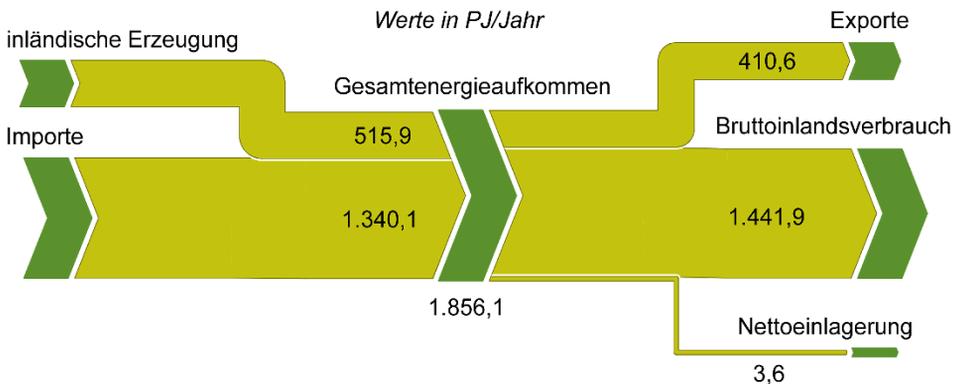
händler und Fernwärmesysteme. Die technische Energienutzung bewirkt Arbeitserleichterung und Produktivitätssteigerung und führt zu Wohlstand bei den Nutzungsberechtigten. Diese haben deshalb ein Interesse daran, den Zugang zu Energie aufrechtzuerhalten und auszubauen. Aus diesem Zusammenspiel resultieren immer wieder Konflikte. Unsere Vorschläge zur Bewältigung globaler Krisen müssen deshalb stets die große Bedeutung der Energieverfügbarkeit für die individuelle und gesellschaftliche Entwicklung berücksichtigen.

### 5.1.1.3 Energie und Wohlstand am Beispiel Österreichs

Der Energiebedarf einer Volkswirtschaft kann durch den Bruttoinlandsverbrauch (BIV) ausgedrückt werden. Dieser wird meist in Energieeinheiten pro Kalenderjahr angegeben und ist wie folgt definiert:

$$\text{Bruttoinlandsverbrauch (BIV)} = \text{inländische Erzeugung} + \text{Importe} - \text{Exporte} + \text{Lagerentnahmen} - \text{Einlagerung}$$

Abbildung 5.1.1 zeigt die Energiebilanz Österreichs 2017. Es sind hier nur die Lagerstandsveränderungen dargestellt, die für das Jahr 2017 einer Nettoeinlagerung entsprechen. Der BIV Österreichs beträgt rund 1.440 PJ oder 400 TWh pro Jahr. Wichtig ist, dass diese Energiebilanz alle Energieträger (Kohle, Erdöl, Erdgas, Biomasse, elektrische Energie, Nutzwärme) inkludiert. Wasserkraft, Windkraft und Solarenergie werden in Form von primär erzeugter elektrischer Energie oder Wärme berücksichtigt. Energielagerung erfolgt in Festbrennstofflagern, in Mineralöltanks und in unterirdischen Kavernenspeichern für Erdgas.

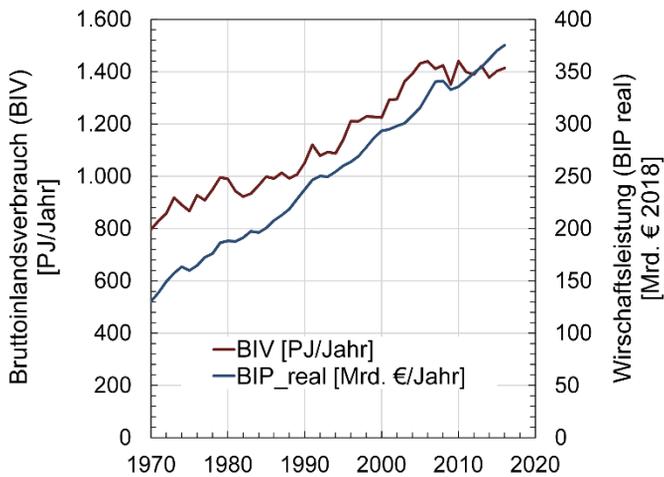


**Abbildung 5.1.1: Volkswirtschaftliche Energiebilanz Österreichs für das Jahr 2017**  
(Datenquelle: Statistik Austria 2019)

In Abbildung 5.1.2 wird die Entwicklung des österreichischen BIV seit 1970 der Entwicklung der Wirtschaftsleistung (Bruttoinlandsprodukt BIP, kaufkraftbereinigt)

gegenübergestellt. Es zeigt sich (beide Ordinatenachsen sind von null weg skaliert), dass der Energieverbrauch im betrachteten Zeitraum annähernd proportional zur Wirtschaftsleistung zugenommen hat. Ähnliches lässt sich auch für andere Staaten und Zeitabschnitte beobachten.

Der Energieverbrauch bezogen auf die Wirtschaftsleistung beträgt zuletzt mit 1.440 PJ und 380 Mrd. € rund 3,8 MJ/€ oder 1,05 kWh/€, was die *Energieintensität* der Volkswirtschaft beschreibt. Der Kehrwert dieser Zahl beträgt 0,95 €/kWh und drückt aus, wie viel unsere Volkswirtschaft insgesamt pro eingesetzter Energieeinheit erwirtschaftet (*Energieproduktivität*).



**Abbildung 5.1.2: Entwicklung von Energieverbrauch und Wirtschaftsleistung in Österreich** (Datenquelle: Statistik Austria 2019)

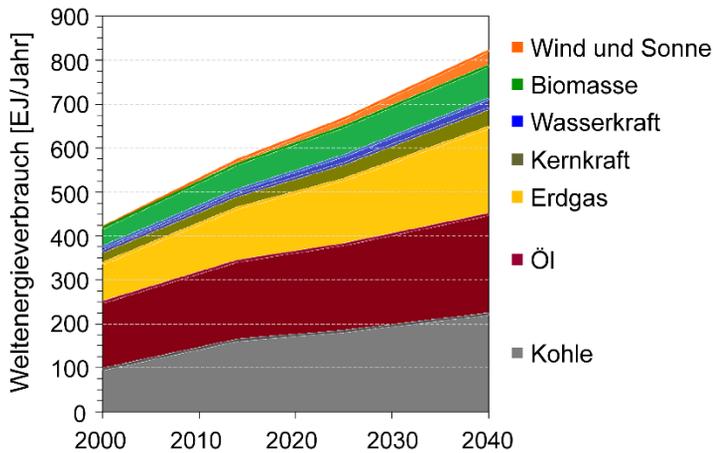
Wirtschaftliche Entwicklung und Energiebedarf sind grundsätzlich eng miteinander verknüpft. Speziell in den Schwellen- und Entwicklungsländern wird deshalb der Energiebedarf auch in Zukunft stark ansteigen.

#### 5.1.1.4 Energieversorgung und Klimawandel

Die Energieversorgung wird derzeit global von Kohle, Öl und Gas dominiert, während Erneuerbare in Summe nur etwa 13% des derzeitigen gesamten Verbrauchs ausmachen. Der Weltenergieverbrauch in Exajoule (EJ) ist nach Energieträgern in Abbildung 5.1.3 veranschaulicht. Diese enthält die Prognose für das „Current Policy Szenario“, in dem keine besonderen Anstrengungen unternommen werden, den Energieverbrauch zu reduzieren oder auf Erneuerbare umzusteigen.

Das bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe freigesetzte Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) ist hauptverantwortlich für den vom Menschen verursachten Klimawandel. Bisher ist die

mittlere globale Temperatur seit Beginn der Industrialisierung (Bezugsjahr 1880) um rund 1 °C gestiegen, in Österreich sogar um 2 °C (APCC 2014, S. 28).



**Abbildung 5.1.3: Weltenergieverbrauch nach Energieträgern basierend auf dem „Current Policy Scenario“** (Datenquelle: IEA 2016)

Der vom Menschen verursachte  $CO_2$ -Ausstoß ist nach Kaya und Yokobori (1997) das Produkt von vier Faktoren:

$$CO_2 = POP \cdot \frac{BIP}{POP} \cdot \frac{Energie}{BIP} \cdot \frac{CO_2}{Energie} \quad (5.1.1)$$

Darin steht  $CO_2$  für den  $CO_2$ -Ausstoß in Masseneinheiten,  $POP$  für die Bevölkerungszahl,  $BIP/POP$  für die Wirtschaftsleistung pro Kopf,  $Energie/BIP$  für die Energieintensität der Volkswirtschaft (vgl. Abbildung 5.1.2) und  $CO_2/Energie$  für die  $CO_2$ -Intensität des Energiemix. Nachdem wir global sowohl ein Bevölkerungswachstum als auch einen steigenden wirtschaftlichen Wohlstand erwarten, nehmen die ersten beiden Faktoren in Gleichung 5.1.1 zu. Um die globalen  $CO_2$ -Emissionen einzuschränken, müssten die letzten beiden Faktoren den Anstieg der ersten beiden überkompensieren. Das heißt (a) Effizienzsteigerung (3. Faktor) und (b) die Dekarbonisierung der Energieversorgung (4. Faktor).

Das Zusammenspiel von Energiewirtschaft und technischen Lösungen zur effizienten und möglichst  $CO_2$ -neutralen Bereitstellung von Energie (Energietechnik) ist bei der Gestaltung einer nachhaltigen Zukunft von großer Bedeutung.

### 5.1.1.5 Wege zu einem zukunftsfähigen Energiesystem

Übergangsprozesse zu einer  $CO_2$ -neutralen Energieversorgung werden oft mithilfe volkswirtschaftlicher Modellrechnungen bewertet, in denen die möglichen technischen

Lösungen mit Kosten verknüpft sind. Anschließend wird eine Gesamtlösung gesucht, die ein gesetztes Ziel wie die Begrenzung der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration auf 450 v-ppm, das sind 450 Millionstel Volumsanteile, oder die Begrenzung der Temperaturerhöhung um 2 °C erreicht und zudem die Gesamtkosten zur Zielerreichung minimiert. Dabei setzt sich üblicherweise nicht eine einzelne Maßnahme durch, sondern das Optimum wird durch Maßnahmenpakete erreicht (Abbildung 5.1.4). Diese volkswirtschaftlichen Modellrechnungen berechnen auch die Kosten pro Tonne vermiedenen CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Zeitablauf. Es zeigt sich, dass diese beträchtlich ansteigen können, sobald relevante Emissionsreduktionen angestrebt werden (Kriegler et al. 2014).

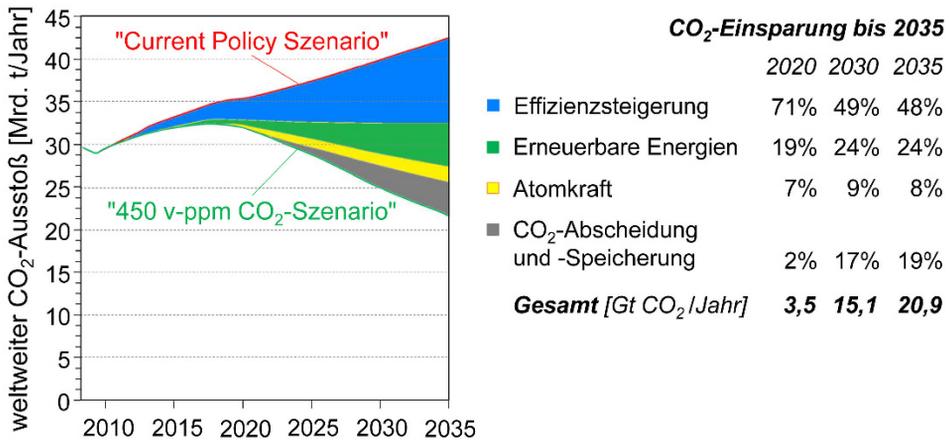


Abbildung 5.1.4: Maßnahmenmix zur Erreichung des 450 v-ppm CO<sub>2</sub>-Szenarios (Datenquelle: IEA 2010)

## 5.1.2 Physikalische Grundlagen der Energietechnik

### 5.1.2.1 Bedeutung der Energietechnik

Bei der Gestaltung eines nachhaltigen Energiesystems ist das Wissen um die zur Verfügung stehenden technologischen Möglichkeiten von großem Nutzen. Dieses Wissen geht vom Verständnis der physikalischen Grundlagen der Energietechnik aus. Im Folgenden versuchen wir, ausgewählte Erscheinungsformen der Energie physikalisch zu beschreiben und einfache Bewertungskriterien für Energieumwandlungsketten vorzustellen sowie diese anhand von praktischen Beispielen zu erläutern.

### 5.1.2.2 Arbeit und Leistung

Zentrale Grundlage energietechnischer Überlegungen ist Klarheit über die physikalischen Begriffe Arbeit und Leistung. Arbeit  $W$  (englisch: *work*) wird in der SI<sup>2</sup>-Einheit

<sup>2</sup> Internationales Einheitensystem oder SI (französisch: *Système international d'unités*)

Joule (1 J) gemessen und entspricht einer Energiemenge. Demgegenüber ist die Leistung  $P$  (englisch: *power*) die in einer Zeiteinheit geleistete Arbeit oder der Energieumsatz pro Zeiteinheit:

$$P = \frac{dW}{dt} \quad (5.1.2)$$

Die SI-Einheit der Leistung ist Joule pro Sekunde oder Watt (1 W = 1 J/s). Umgekehrt lässt sich für die Arbeit, die in einem bestimmten Zeitintervall verrichtet wurde, schreiben:

$$W_{12} = \int_{t_1}^{t_2} P(t) \cdot dt \quad (5.1.3)$$

Wird die Leistung als Funktion der Zeit in einem Diagramm dargestellt, ergibt sich die in einem bestimmten Zeitabschnitt verrichtete Arbeit als Fläche unter der Kurve. Ein Beispiel dafür ist der elektrische Energieverbrauch eines Haushaltes: Je nachdem, welche Verbraucher gerade aktiv sind, schwankt die bezogene Leistung über die Zeit. Die insgesamt verbrauchte elektrische Energie (Arbeit) ergibt sich durch Integration über die Zeit gemäß Gleichung 5.1.3. Vom Energieversorger wird dann der sogenannte „Arbeitspreis“ in Geldeinheiten pro Energieeinheit verrechnet. Wichtige Gebrauchseinheiten für die Energie sind, neben dem Vielfachen von Joule, die Wattstunde (1 Wh) und deren Vielfache.

### 5.1.2.3 Energie in mechanischen Systemen

In mechanischen Systemen ist die Arbeit definiert als Kraft mal Weg, wobei es sich um das Skalarprodukt zweier Vektoren handelt:

$$W_{12} = \int_1^2 \vec{F}(\vec{x}) \cdot d\vec{x} \quad (5.1.4)$$

Arbeit in diesem Sinn wird beispielsweise verrichtet, wenn eine Masse im Schwerfeld vertikal bewegt wird, wenn eine Feder gespannt wird, oder auch, wenn ein Gegenstand entgegen einer Reibungskraft über eine raue Oberfläche gezogen wird.

Da die Geschwindigkeit die Zeitableitung des Ortsvektors ist,

$$\vec{v} = \frac{d\vec{x}}{dt}, \quad (5.1.5)$$

folgt mit Gleichung 5.1.2 für die Leistung in mechanischen Systemen:

$$P = \vec{F} \cdot \vec{v} \quad (5.1.6)$$

Wird eine Masse beschleunigt oder gebremst, wirkt der Geschwindigkeitsänderung die Trägheitskraft entgegen. Die Beschleunigungs- oder Bremskraft ist:

$$\vec{F}_a = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (5.1.7)$$

Aus den Gleichungen 5.1.3, 5.1.6 und 5.1.7 folgt die Beschleunigungsarbeit:

$$W_{12} = \int_{t_1}^{t_2} m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} \cdot \vec{v} \cdot dt = m \cdot \int_{v_1}^{v_2} \vec{v} \cdot d\vec{v} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_2^2 - v_1^2) \quad (5.1.8)$$

Die kinetische Energie der bewegten Masse entspricht der Beschleunigungsarbeit aus einem Ruhezustand ( $v_1 = 0$ ) auf eine Geschwindigkeit  $v$ :

$$E_{kin} = W_{12}|_0^v = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (5.1.9)$$

Die Masse kann beim Abbremsen Arbeit verrichten, und die kinetische Energie kann dadurch prinzipiell zurückgewonnen werden. In der praktischen Energietechnik sind mechanische Systeme zur Leistungsübertragung meist rotierende Anordnungen (Turbine, Welle etc.). Betrachten wir eine Masse, die um ein ruhendes Zentrum rotiert gemäß Abbildung 5.1.5a, dann gilt zwischen Tangentialgeschwindigkeit  $v_t$  und Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  in Radiant pro Sekunde:

$$v_t = R \cdot \omega \quad (5.1.10)$$

Da bei einer vollen Umdrehung ein Winkel von  $2\pi$  überstrichen wird, gilt folgender Zusammenhang zwischen Winkelgeschwindigkeit, Frequenz  $f$  [Hz] und Drehzahl  $n$  [1/min]:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot n \quad (5.1.11)$$

Aus Gleichung 5.1.6 wird, übertragen auf das rotierende System

$$P = F_t \cdot v_t = F_t \cdot R \cdot \omega, \quad (5.1.12)$$

wobei  $F_t$  eine tangential wirkende Kraft ist, welche die Drehbewegung beschleunigen kann. Wird das Drehmoment als

$$M = F_t \cdot R \quad (5.1.13)$$

definiert, folgt die Leistung im rotierenden System:

$$P = M \cdot \omega \quad (5.1.14)$$

Die in einer rotierenden Welle zwischen Turbine und Generator, aber auch zwischen Getriebe und Antriebsrädern eines Kraftfahrzeugs, übertragene Leistung entspricht demnach dem Produkt aus Drehmoment und Winkelgeschwindigkeit.

Gleichung 5.1.10 in Gleichung 5.1.9 eingesetzt, ergibt die kinetische Energie der rotierenden Masse zu

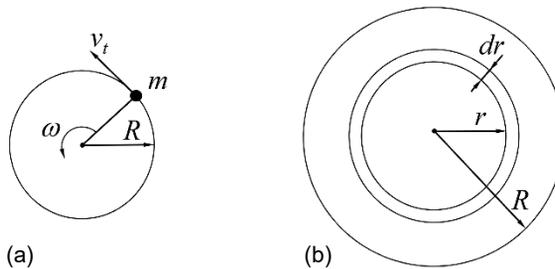
$$E_{rot} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_t^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot R^2 \cdot \omega^2 = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2, \quad (5.1.15)$$

wobei  $m \cdot R^2$  im Massenträgheitsmoment  $I$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ] zusammengefasst wird. Für am Umfang angeordnete Massen gilt  $I = m \cdot R^2$ . Liegt die Drehmasse über verschiedene Abstände vom Zentrum verteilt vor, ist jedes Massenelement mit dem jeweiligen Radius

zum Quadrat zu gewichten. Für eine zylindrische Scheibe mit Radius  $R$ , konstanter Dicke  $h$  und konstanter Dichte  $\rho$ , wie in Abbildung 5.1.5b illustriert, ergibt sich:

$$\begin{aligned}
 I_{\text{Scheibe}} &= \rho \cdot \int_V r^2 \cdot dV = \rho \cdot \int_{r=0}^R r^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \cdot dr = \\
 &= 2 \cdot \pi \cdot h \cdot \rho \cdot \int_{r=0}^R r^3 \cdot dr = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot \rho \cdot R^4}{4} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot R^2
 \end{aligned}
 \tag{5.1.16}$$

Kinetische Energie kann, gemäß dieser Zusammenhänge, in Schwungrädern gespeichert werden. In der Energietechnik sind rotierende Schwunghmassen zur kurzzeitigen Energiespeicherung wichtig, z.B. zur Erreichung eines Gleichlaufs bei Kolbenmaschinen.



**Abbildung 5.1.5:** (a) Rotierende Masse und (b) Integration über den Radius zur Bestimmung der Drehmasse einer zylindrischen Scheibe

### 5.1.2.4 Energie in elektrischen Systemen

Materie ist aus elektrisch geladenen Elementarteilchen aufgebaut: Negativ geladene Elektronen umgeben die positiv geladenen Atomkerne. In elektrischen Leitern wie Metallen ist ein Teil der Elektronen beweglich und kann zu benachbarten Atomen wandern. Wird nun in einem Leiter ein Elektronenüberschuss erzeugt und in einem anderen ein Elektronenmangel, spricht man von einer elektrischen Potenzialdifferenz zwischen diesen Polen oder einer elektrischen Spannung  $U$ . Einheit der Spannung ist das Volt (1 V). Werden die beiden Pole über einen elektrischen Leiter verbunden, dann bewegen sich die Ladungsträger, und es fließt elektrischer Strom  $I$ . Einheit des Stroms ist das Ampere (1 A). Für die elektrische Leistung ergibt sich in Analogie zur Mechanik (vgl. Gleichungen 5.1.6 und 5.1.14):

$$P = U \cdot I
 \tag{5.1.17}$$

Die elektrische Arbeit, die einer Energiemenge entspricht, ergibt sich durch Integration der Leistung über die Zeit, gemäß Gleichung 5.1.3.

Werden zwei leitende Platten parallel zueinander so angeordnet, dass keine leitende Verbindung entsteht, und wird eine Spannung angelegt, bildet sich ein elektro-

statisches Feld zwischen den Platten aus (Abbildung 5.1.6a). Die Platten ziehen sich an. In diesem Feld wird Energie gespeichert. Wird die Spannungsquelle entfernt, bleiben die Platten geladen. Man spricht von einem Kondensator. Das Verhalten von Strom und Spannung am Kondensator bei Lade- und Entladevorgängen wird von folgendem Zusammenhang beschrieben:

$$I(t) = C \cdot \frac{dU}{dt} \quad (5.1.18)$$

Dabei ist  $C$  die Kapazität in Farad ( $1 \text{ F} = 1 \text{ As/V}$ ). Die Gleichungen 5.1.17 und 5.1.18 sind mathematisch analog zu den Gleichungen 5.1.6 und 5.1.7. Für die im Kondensator gespeicherte Energie folgt analog zur kinetischen Energie:

$$W_C = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \quad (5.1.19)$$

Wird ein Leiter von einem Strom durchflossen, bildet sich rund um diesen ein konzentrisches Magnetfeld aus. Wird der Leiter zu einer Spule gewickelt, überlagern sich die magnetischen Feldlinien (Abbildung 5.1.6b). Der Aufbau des Magnetfeldes ist mit Arbeit im physikalischen Sinn verbunden.

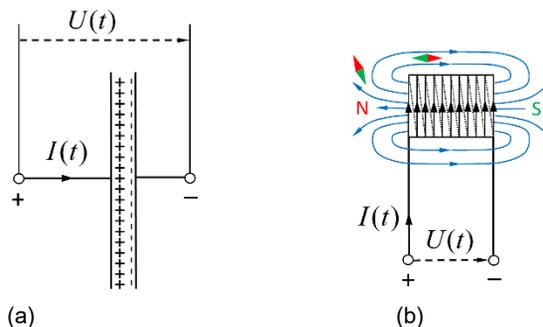
Das Verhalten von Strom und Spannung an der Spule wird von folgendem Zusammenhang beschrieben:

$$U(t) = L \cdot \frac{dI}{dt} \quad (5.1.20)$$

Dabei bezeichnet  $L$  die Induktivität in Henry ( $1 \text{ H} = 1 \text{ Vs/A}$ ). Aus Gleichung 5.1.20 folgt mit Gleichung 5.1.17 die im Magnetfeld gespeicherte Energie:

$$W_L = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \quad (5.1.21)$$

Kondensatoren und Spulen dienen in der Elektronik zur kurzfristigen Energiespeicherung z.B. bei Oszillatoren. Als Speicher in der Energietechnik sind elektrische und magnetische Felder wegen der geringen Energiedichte nicht relevant.



**Abbildung 5.1.6:** (a) Kondensator (Kapazität  $C$ ) und (b) Spule (Induktivität  $L$ )

## 5.1.2.5 Energie in thermischen Systemen

Materie ist aus Elementarteilchen (Atomen bzw. Molekülen) aufgebaut. Diese befinden sich ständig in Bewegung, wobei sie sich in Fluiden (d.h. in Gasen und Flüssigkeiten) frei bewegen und in Feststoffen lediglich am gleichen Ort schwingen. Alle Stoffe beinhalten demnach die kinetische Bewegungsenergie der Elementarteilchen. Die Messgröße für die Bewegungs- bzw. Schwingungsintensität der Elementarteilchen ist die Temperatur  $T$ , gemessen in der SI-Einheit Kelvin (1 K). Über die Temperatur lassen sich interessante Beobachtungen zur Bewegungsenergie der Elementarteilchen, auch als thermische Energie bezeichnet, machen:

1. In einem vollständig wärmeisolierten Behälter bleibt die Temperatur konstant. Die Bewegung der Elementarteilchen nimmt nicht ab.
2. Bringt man Objekte unterschiedlicher Temperatur zusammen, erfolgt eine Übertragung der thermischen Energie vom wärmeren auf den kälteren Körper. Der wärmere Körper kühlt dabei ab, der kältere erwärmt sich, bis die Temperatur ausgeglichen ist.

Vorgänge, bei denen eine Temperaturdifferenz zur Übertragung thermischer Energie führt, werden als Wärmeübertragungsvorgänge bezeichnet. In Feststoffen und in ruhenden Fluiden kann die Wärmeleitung infolge eines Temperaturgradienten (= Temperaturänderung pro Längeneinheit) durch das Fourier'sche Wärmeleitungsgesetz beschrieben werden:

$$\dot{Q}_x = -A \cdot \lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad (5.1.22)$$

Dabei ist  $\dot{Q}_x$  der Wärmestrom in x-Richtung in Watt,  $A$  die Fläche des betrachteten Querschnitts (normal auf die x-Achse), und  $\lambda$  ist die Stoffeigenschaft der Wärmeleitfähigkeit in  $W/(m \cdot K)$ . Der Wärmestrom entspricht einer Leistung, für die die über einen bestimmten Zeitraum übertragene Wärmemenge  $Q$  gilt, analog zu Gleichung 5.1.3:

$$Q_{12} = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q}(t) \cdot dt \quad (5.1.23)$$

Wärme ist eine aufgrund eines Temperaturunterschiedes transportierte thermische Energie. Die in einem Stoff in einem bestimmten Zustand enthaltene thermische Energie wird durch die Enthalpie  $H$  beschrieben. Wird einem Stoff bei konstantem Druck Wärme zu- oder abgeführt, so ändert sich seine Enthalpie um den Wert der Wärmemenge (Definition der Enthalpie):

$$H_2 - H_1 = Q_{12} \quad (p = \text{const.}) \quad (5.1.24)$$

Die Enthalpie berechnet man, relativ zu einem Bezugspunkt (z.B. 1 bar, 298,15 K), für einen Stoff in einem bestimmten Zustand als Funktion anderer Größen (z.B. Druck

und Temperatur) eindeutig über die sogenannte kalorische Zustandsgleichung, in die Materialeigenschaften einfließen. In vielen praktisch bedeutsamen Fällen (für Feststoffe, Flüssigkeiten unterhalb des Siedepunktes und für als Idealgas betrachtbare Gase) kann die Druckabhängigkeit der Enthalpie vernachlässigt werden, und die kalorische Zustandsgleichung vereinfacht sich:

$$H(T) = m \cdot \int_{T_0}^T c_p(T) \cdot dT \approx m \cdot \bar{c}_p \cdot (T - T_0) \quad (5.1.25)$$

Dabei ist  $m$  die Masse [kg],  $c_p$  [J/(kg·K)] die spezifische isobare Wärmekapazität des Stoffs, allgemein eine Funktion der Temperatur, und  $T_0$  eine festzulegende Bezugstemperatur. Liegen die betrachteten Temperaturen hinreichend nahe zusammen, kann mit einer mittleren Wärmekapazität  $\bar{c}_p$  gearbeitet werden.

In der Energietechnik wird thermische Energie in Form von Enthalpie in Rohrleitungen transportiert (Zentralheizung, Fernwärme). Wasser eignet sich aufgrund seiner hohen spezifischen Wärmekapazität hervorragend als Wärmeträgermedium. Versorgte Wärmeverbraucher entnehmen dem System Wärmeleistung, indem der Wärmeträger abgekühlt wird. Die entnommene Wärmeleistung entspricht dabei dem Produkt aus Massenstrom, spezifischer Wärmekapazität und der Differenz aus Vorlauf- (VL) und Rücklauf- (RL) Temperatur des Wärmeträgers:

$$\dot{Q}_{Nutz} = \dot{m} \cdot \bar{c}_p \cdot (T_{VL} - T_{RL}) \quad (5.1.26)$$

### 5.1.2.6 Energie in chemischen Systemen

Materie ist aus Atomen zusammengesetzt, diese können chemische Bindungen eingehen, was letztlich zur Ausgestaltung der Stoffe (Moleküle, Kristalle, Ionen in Lösung) führt. Bei chemischen Vorgängen (Reaktionen) bleiben die Atomkerne stets unverändert, die Interaktion passiert auf Ebene der Elektronenhülle. Zwischen den Elementarteilchen wirken Kräfte (z.B. elektrische Anziehung und Abstoßung). Wenn sich Atome also im Zuge einer chemischen Reaktion neu anordnen, verändern sich dabei die Abstände innerhalb der Hülle, und diese Veränderung entspricht physikalisch einer Arbeit (Bewegungen in einem Kraftfeld gemäß Gleichung 5.1.4). Bei chemischen Reaktionen muss diese Energieänderung stets ausgeglichen werden. Die für eine bestimmte chemische Reaktion benötigte Energie wird, wegen der Annahme, dass die Reaktion bei konstantem Druck abläuft, als deren Reaktionsenthalpie  $\Delta H_R$  bezeichnet. Wird für eine chemische Reaktion Wärme benötigt, ist  $\Delta H_R$  positiv, und man spricht von einer endothermen Reaktion. Wird bei der Reaktion Wärme freigesetzt, ist  $\Delta H_R$  negativ, und man spricht von einer exothermen Reaktion. Die Reaktionsenthalpie ist im Ausmaß der thermischen Enthalpieunterschiede zwischen Ausgangs-

stoffen und Produkten von Temperatur und Druck abhängig. Um Vergleichbarkeit zu schaffen, werden Reaktionsenthalpien daher meist auf den Standardzustand (1 bar = 100 kPa, 25 °C = 298,15 K) bezogen angegeben.

### Fallbeispiel 5.1.1: Verbrennung von Methan (Datenquelle: NIST 2019)

Die Verbrennung, eine Oxidation mit molekularem Sauerstoff (O<sub>2</sub>), ist eine in der Energietechnik wichtige Reaktion. Wir betrachten die Oxidation von Methan (CH<sub>4</sub>) mit Luftsauerstoff. Erdgas besteht in Wien zu mehr als 98 vol% aus Methan. Die chemische Reaktionsgleichung der Verbrennung lautet:



Bei der Verbrennung von Methan werden pro Mol CH<sub>4</sub> 802,56 kJ an thermischer Energie freigesetzt. Ein Mol eines Gases nimmt gemäß idealer Gasgleichung bei Normalbedingungen (101.325 Pa, 273,15 K) ein Volumen von 22,41 Litern ein. Pro Normalkubikmeter Methan werden demnach 35.800 kJ thermische Energie freigesetzt, was umgerechnet rund 10 kWh entspricht.

Die Reaktionsenthalpie von Verbrennungsreaktionen bei Standardbedingungen (1 bar, 298,15 K) wird, bezogen auf die Menge des eingesetzten Brennstoffes, als Heizwert des Brennstoffes bezeichnet. Dabei wird angenommen, dass das im Abgas enthaltene Wasser gasförmig vorliegt.

Heizwert = Reaktionsenthalpie der Verbrennungsreaktion

In der Energietechnik ist der Heizwert eine wichtige Bezugsgröße für Wirkungsgrade. Er wird pro kg oder Volumen eines Brennstoffes angegeben (Tabelle 5.1.1).

Die chemische Reaktionsenthalpie exothermer Reaktionen wird meistens als thermische Enthalpie freigesetzt. Eine Ausnahme bilden elektrochemische Reaktionen: Mithilfe einer elektrochemischen Zelle kann ein großer Teil der Reaktionsenthalpie direkt als elektrische Energie abgeführt werden. Solche Systeme gewinnen in der Energietechnik immer mehr an Bedeutung (Batteriespeicher, Brennstoffzellen).

**Tabelle 5.1.1: Heizwerte gebräuchlicher Brennstoffe (Datenquelle: Gammel 2019)**

Brennstoff	Heizwert	Einheit
Steinkohle	ca. 30	MJ/kg
Holz (lufttrocken)	ca. 15	MJ/kg
Ethanol	21,2	MJ/l
Benzin	ca. 30,5	MJ/l
Diesel, Heizöl Extra Leicht	ca. 35,5	MJ/l
Methan	35,8	MJ/Nm <sup>3</sup>
Wasserstoff	10,8	MJ/Nm <sup>3</sup>

### 5.1.3 Grundlagen der Energieumwandlung

#### 5.1.3.1 Energieerhaltungssatz

In Abschnitt 5.1.2 wurde die Energie in einigen ihrer Erscheinungsformen (mechanische, elektrische, thermische, chemische) vorgestellt. In der Natur lässt sich nun Folgendes beobachten: In einem nach außen hin abgeschlossenen System (isolierter Behälter, durch den keine Energieströme dringen können) bleibt die Gesamtenergie konstant.

Im abgeschlossenen System bleibt die Gesamtenergie erhalten.

Der Ausdruck „Gesamtenergie“ deutet bereits an, dass es zu Umwandlungen von einer Erscheinungsform in eine andere kommen kann. So könnte innerhalb des abgeschlossenen Systems eine Batterie entladen werden, um mittels eines Elektromotors ein Schwungrad zu beschleunigen, oder eine (andere) chemische Reaktion ablaufen, wodurch die Temperatur ansteigt. Die Gesamtenergie innerhalb des Systems bleibt dabei stets erhalten, solange keine Energie von außen zugeführt oder nach außen abgeführt wird.

#### 5.1.3.2 Konservative und dissipative Kraftfelder

Wird eine Masse im Schwerkraftfeld gehoben oder eine elastische Feder gespannt, so wird Arbeit im Sinne von Gleichung 5.1.4 verrichtet, die aber bei Zurückbewegung im jeweiligen Kraftfeld wieder zurückgewonnen werden kann. In diesen Fällen wird die Verschiebearbeit als potenzielle Energie gespeichert. Die Kraftfelder im Fall der Schwerkraft und der elastischen Feder sind sogenannte Potenzialfelder, auch konservative Kraftfelder genannt, weil die mechanische Energie konserviert wird, d.h. als solche erhalten bleibt. Ein solches Verhalten setzt voraus, dass die Bewegung ohne Reibungsverluste erfolgt, was bei makro- und mikrokosmischen Systemen (Himmelskörper, Elementarteilchen) gut erfüllt ist.

Wird ein Körper, auf den die Schwerkraft von oben wirkt, über eine horizontale, raue Oberfläche gezogen, wirkt der Bewegung die Reibungskraft entgegen. Hier wird ebenfalls im Sinne von Gleichung 5.1.4 Arbeit verrichtet, wobei diese aber nicht als potenzielle Energie gespeichert wird, sondern durch die Reibung werden die Elementarteilchen an der Reibungsfläche zu verstärkter Schwingung angeregt, die Temperatur steigt lokal an, und die geleistete Arbeit wird in thermische Energie umgewandelt. Man spricht hier von einem dissipativen Kraftfeld.

In technischen Systemen sind die Potenzialfelder stets von Reibung und Widerstand überlagert, trotzdem bleibt die Gesamtenergie erhalten. Bei dissipativen Vorgängen erfolgt eine Umwandlung mechanischer oder elektrischer Energie in thermische Energie,

die nicht mehr zurück in mechanische oder elektrische Energie verwandelt werden kann. Aus physikalischer Sicht sind Systeme mit geringerer Dissipation stets effizienter.

Ein effizientes Energiesystem vermeidet Dissipation.

### 5.1.3.3 Der Energieerhaltungssatz für Fließprozesse

In der Energietechnik und allgemeiner auch in der Prozesstechnik geht es um die Betrachtung von Bereitstellungsketten für Nutzenergie bzw. stoffliche Produkte. Solche Prozessketten lassen sich als kontinuierliche, stationäre Fließprozesse darstellen, die in einzelne Prozessschritte zerlegt werden können (Abbildung 5.1.7).



Abbildung 5.1.7: Prinzip einer Bereitstellungskette für Produkte oder Nutzenergie

Jeder Block in Abbildung 5.1.7 könnte wiederum in einzelne Zwischenschritte unterteilt werden, bis die Beschreibung auf Basis von Prozesseinheiten (Unit Operations, kleinste sinnvoll mögliche Bilanzräume entlang der Kette) erfolgt. Für jeden durchströmten Bilanzraum lässt sich gemäß Abbildung 5.1.8 die Energieerhaltungsgleichung als Leistungsbilanz in Watt anschreiben:

$$\dot{m} \cdot \left[ \left( h_2 + \frac{v_2^2}{2} + g \cdot z_2 \right) - \left( h_1 + \frac{v_1^2}{2} + g \cdot z_1 \right) \right] = \dot{Q} + P \quad (5.1.27)$$

Dabei steht  $\dot{m}$  für den Massenstrom [kg/s],  $h$  für die spezifische Enthalpie (chemisch und thermisch) [J/kg],  $v$  für die Geschwindigkeit [m/s],  $g$  für die Erdbeschleunigung (9,81 m/s<sup>2</sup>) und  $z$  für die geodätische Höhe [m]. Die die Bilanzgrenze überschreitenden Energieströme  $\dot{Q}$  und  $P$  [W] sind bei Leistungszufuhr positiv, bei Leistungsabfuhr negativ. Die Klammerausdrücke fassen jeweils Enthalpie, kinetische und potenzielle Energie pro Masseneinheit des Stoffstroms zusammen.

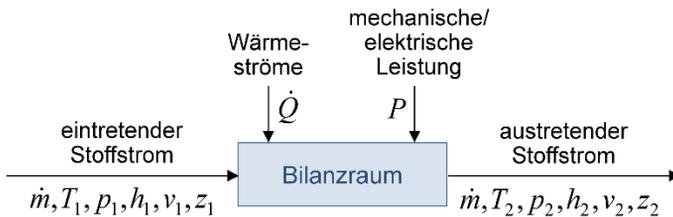


Abbildung 5.1.8: Energieerhaltung in einem stationären Fließprozess

Gleichung 5.1.27 ist sehr allgemein und gilt für alle als kontinuierlich beschreibbaren Prozesse der Energietechnik. Es lassen sich damit beispielsweise Wasserkraftwerke berechnen, aber auch Wärmeüberträger, Pumpen, Kompressoren und chemische Reaktoren wie Brennkammern. In vielen Fällen sind die kinetische und die potenzielle Energie im Schwerkraftfeld vernachlässigbar gegenüber den Enthalpieänderungen und werden nicht angeschrieben.

#### 5.1.3.4 Wirkungsgradbegriff

Obwohl die Gesamtenergie in jedem Prozessschritt erhalten bleibt, kommt es entlang der Bereitstellungskette zu einer Abnahme der technisch bzw. wirtschaftlich nutzbaren Energie. Es ist daher zweckmäßig, nutzbare und nichtnutzbare Energiekomponenten zu unterscheiden. Dies führt zur Definition des Wirkungsgrades als Nutzen, bezogen auf den Einsatz bzw. den Aufwand.

$$\text{Wirkungsgrad} = \text{Nutzen} / \text{Aufwand}$$

Nutzen und Aufwand weisen dabei die gleiche physikalische Einheit auf (bei energetischen Wirkungsgraden stationärer Fließprozesse die einer Leistung, d.h. Watt). Damit ist der Wirkungsgrad eine dimensionslose Zahl, die grundsätzlich zwischen 0 und 1 liegt und oft in Prozent angegeben wird. Sind die Einheiten von Nutzen und Aufwand unterschiedlich, ergeben sich dimensionsbehaftete Kennzahlen, die nicht als Wirkungsgrad bezeichnet werden sollten.

Wirkungsgrade sind gut geeignet, die Effizienz von Prozessalternativen zu vergleichen, die vom gleichen Energieträger bzw. der gleichen Energiequelle ausgehen, um einen bestimmten Nutzen zu erreichen. Stehen unterschiedliche Energiequellen zur Verfügung, ist ein Vergleich auf Basis der Wirkungsgrade meist nicht aussagekräftig.

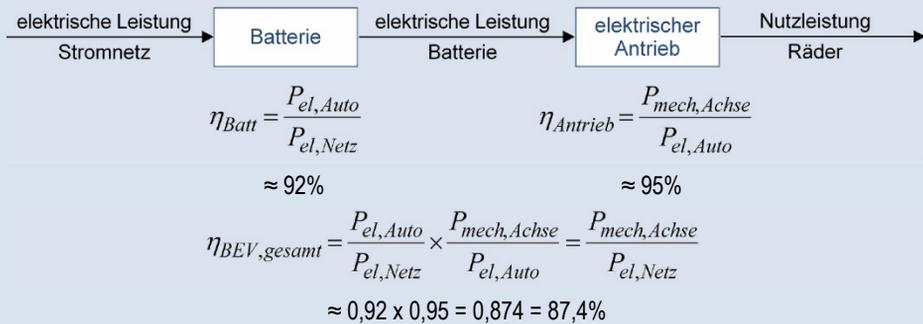
#### 5.1.3.5 Energieeffizienz von Bereitstellungsketten

Die Bereitstellung von Nutzenergie erfolgt über Bereitstellungsketten (siehe Abbildung 5.1.7). Der Wirkungsgrad der gesamten Prozesskette ergibt sich durch Multiplikation der Wirkungsgrade der einzelnen Prozessschritte (siehe Fallbeispiel 5.1.2). Ähnliche Schätzungen wie in Fallbeispiel 5.1.2 lassen sich für Kraftwerke, Wärmebereitstellungs- oder Kühlsysteme durchführen.

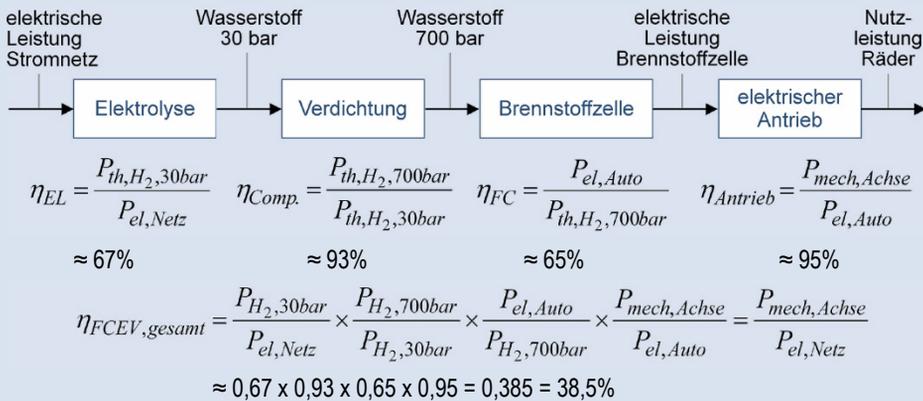
Energietechnikerinnen und Energietechniker bedienen sich zur Effizienzbewertung von Bereitstellungsketten, neben den Wirkungsgraden, auch komplexerer Definitionen, die die prinzipiellen Grenzen der Umwandelbarkeit von Energieformen berücksichtigen. So können Ansatzpunkte für relevante Effizienzsteigerungen zielsicher identi-

**Fallbeispiel 5.1.2: Bereitstellung von Antriebsleistung für Kraftfahrzeuge aus dem Stromnetz**

Kraftfahrzeuge könnten zukünftig elektrisch angetrieben werden. Derzeit werden Systeme mit Batteriespeichern (Battery Electric Vehicles, BEV) und Systeme auf Wasserstoffbrennstoffzellenbasis (Fuel Cell Electric Vehicles, FCEV) diskutiert, wobei der Wasserstoff durch Elektrolyse mit erneuerbar produzierter elektrischer Energie hergestellt werden soll. Wir vergleichen die beiden Antriebssysteme auf Basis der Wirkungsgrade. Als Nutzen wird die mechanische Leistung an der Antriebswelle der Räder definiert. Als Aufwand wird die elektrische Leistungsaufnahme zur Batterieladung bzw. zur Wasserstoffherstellung herangezogen. Damit ist die in Abschnitt 5.1.3.4 erwähnte Bedingung, dass auf die gleiche Energiequelle Bezug genommen wird, erfüllt. Die folgenden Zusammenstellungen sind grobe Vereinfachungen. Es fehlen wesentliche Verlustquellen wie Energietransport, Gleich- und Wechselrichter, deren Berücksichtigung die Gesamteffizienz beider Systeme weiter verringern würde.



**Abbildung 5.1.9: Elektroauto mit Batteriespeicher (BEV)**



**Abbildung 5.1.10: Brennstoffzellenauto mit Elektrolysewasserstoff (FCEV)**

Auf Basis des Wirkungsgradvergleiches ist das BEV wesentlich effizienter als das FCEV. In der Praxis müssen aber noch weitere Aspekte berücksichtigt werden. Chemische Energiespeicher wie Wasserstoff kommen für lange Speicherperioden infrage, wenn es z.B. um saisonalen Überschussausgleich geht. Der geringere Wirkungsgrad der Gesamtkette könnte in Kauf genommen werden, wenn ein echter Überschuss an erneuerbarer elektrischer Leistung vorhanden ist und die vorhandenen Batteriespeicher bereits geladen sind. Weitere Aspekte ergeben sich aus dem Lebenszyklus der Fahrzeuge im Zusammenhang mit der angestrebten Reichweite einer Batterieladung bzw. Tankfüllung.

fiziert werden. In weiterer Folge sind ökonomische Überlegungen und Ressourcenüberlegungen abseits der reinen Energiebereitstellungskette (Ökobilanzierung oder Lebenszyklusbetrachtung) anzustellen, um technologische Möglichkeiten bewerten zu können.

### 5.1.4 Zusammenfassung

Die technische Bereitstellung von Nutzenergie ist ein zentrales Erfordernis zivilisatorischer Entwicklung. Energie schafft Arbeitserleichterung und Wohlstand. Der Energiebedarf einer Volkswirtschaft wird durch den Bruttoinlandsverbrauch beschrieben. Das globale Energiesystem basiert zum überwiegenden Teil auf fossilen Energieträgern, und die Energiebereitstellung dominiert den vom Menschen verursachten Treibhausgasausstoß, der für den derzeit beobachteten Klimawandel verantwortlich ist. Um den anthropogenen Klimawandel einzudämmen, muss die Energieeffizienz drastisch erhöht und eine Dekarbonisierung der Energiebereitstellung durch Umstieg auf Erneuerbare erreicht werden.

Energie mit der Einheit Joule tritt in verschiedenen Formen auf, die teilweise ineinander umgewandelt werden können. Bei mechanischer und elektrischer Energie heißt die übertragene Energiemenge Arbeit, thermisch übertragene Energie wird als Wärme bezeichnet. Die pro Zeiteinheit übertragene Energie wird als Leistung oder als Wärmestrom bezeichnet und in der Einheit Watt gemessen. In praktischen technischen Systemen treten Reibung und/oder elektrischer Widerstand auf: Ein Teil der mechanischen oder elektrischen Energie wird dabei in thermische Energie umgewandelt und kann nicht mehr zurückverwandelt werden. Dieses Phänomen wird als Dissipation bezeichnet und verringert die Effizienz von Energieumwandlungsketten.

Einzelne Schritte einer Bereitstellungskette können als stationäre Fließprozesse modelliert werden, die stets das Energieerhaltungsgesetz in Form einer Leistungsbilanzgleichung erfüllen. Wirkungsgrade sind allgemein definiert als Nutzen dividiert durch Aufwand, wobei beides in der gleichen Einheit gemessen wird und sich ein dimensionsloser Wert ergibt, der für sinnvolle Definitionen zwischen 0 und 1 liegt. Neben der Betrachtung der Effizienz von Bereitstellungsketten sind für eine abschließende Bewertung von technologischen Alternativen auch wirtschaftliche und ökologische Aspekte zu berücksichtigen.

## Literatur

- APCC (Austrian Panel on Climate Change) (2014): Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Wien: Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften. <https://doi.org/10.1553/aar14s1>.
- Gammel (Gammel Engineering GmbH) (2019): Energie-Lexikon. Stichwort: Heizwert – Brennwert. Verfügbar in: [www.gammel.de/de/lexikon/Heizwert---Brennwert/4838](http://www.gammel.de/de/lexikon/Heizwert---Brennwert/4838) [Abfrage am 5.4.2019].

## 5 Umweltrelevante Systeme & Technologien

- IEA (The International Energy Agency) (2010): IEA World Energy Outlook 2010. Available at: [webstore.iea.org/world-energy-outlook-2010](http://webstore.iea.org/world-energy-outlook-2010) [accessed 5.4.2019].
- IEA (The International Energy Agency) (2016): IEA World Energy Outlook 2016. Available at: [webstore.iea.org/world-energy-outlook-2016](http://webstore.iea.org/world-energy-outlook-2016) [accessed 5.4.2019].
- Kaya, Y. and Yokobori, K. (eds.) (1997): Environment, Energy, and Economy: Strategies for Sustainability. Conference on Global Environment, Energy, and Economic Development, Tokyo, 25.-27.10.1993, Tokyo: United Nations University Press, UNUP-911.
- Kriegler, E., Weyant, J. P., Blanford, G. J., Krey, V., Clarke, L., Edmonds, J., Fawcett, A., Luderer, G., Riahi, K., Richels, R., Rose, S. K., Tavoni, M., and van Vuuren, D. P. (2014): The role of technology for achieving climate policy objectives: overview of the EMF 27 study on global technology and climate policy strategies. *Climatic Change*, 123, 353–367, <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0953-7>.
- NIST (National Institute of Standards and Technology) (2019): NIST Chemistry WebBook, U.S. Department of Commerce. Available at: <https://webbook.nist.gov/> [accessed 5.4.2019].
- Statistik Austria (2019): Webseite der Statistik Austria. Verfügbar in: [www.statistik.at](http://www.statistik.at) [Abfrage am 5.4.2019].

## 5.2 Angewandte Prozesstechnik

Anita Grausam und Christoph Pfeifer

Institut für Verfahrens- und Energietechnik,

Department für Materialwissenschaften und Prozesstechnik (MAP)

[anita.grausam@boku.ac.at](mailto:anita.grausam@boku.ac.at), [christoph.pfeifer@boku.ac.at](mailto:christoph.pfeifer@boku.ac.at)

### 5.2.1 Definitionen und Begriffe

Die angewandte Verfahrens- oder Prozesstechnik ist eine interdisziplinäre Ingenieurwissenschaft, die in unzähligen, bekannten Industriezweigen (z.B. in der Lebensmittel- und Kosmetikproduktion, Pharmazie, Abfallbehandlung, Papier- oder Metallindustrie) sowie in der Energieerzeugung ihre Anwendung findet. Alle Produkte und Waren durchlaufen bei der Erzeugung verfahrenstechnische Prozesse. Damit sind alle Vorgänge gemeint, in denen Eigenschaften, Form oder Zusammensetzung von Rohstoffen oder Energieträgern in einem oder mehreren Verfahrensschritt(en) verändert werden. Die Verfahrenstechnik befasst sich also mit der Herstellung, Trennung oder Umwandlung von flüssigen, gasförmigen und festen Stoffen. Hierbei werden physikalische und chemische Grundgesetze mit der praktischen, technischen Umsetzung verknüpft.

Ein Hauptziel der Verfahrenstechnik ist es, Prozesse zu entwickeln und zu verbessern, um dadurch zu einer wirtschaftlichen, energieeffizienten und umweltschonenden Produktion, Mobilität oder Energieversorgung beizutragen.

Die Verfahrenstechnik umfasst ein sehr breites Spektrum an Prozessen und Verarbeitungsaufgaben. Historisch hat sich daher eine Unterteilung nach physikalischen Grundlagen in verfahrenstechnische Teilgebiete etabliert (Hauptteilgebiete siehe Abbildung 5.2.1). Weitere gebräuchliche Teilgebiete wären z.B. noch die Elektroverfahrenstechnik oder die Nanoverfahrenstechnik.



**Abbildung 5.2.1: Einteilung der Verfahrenstechnik**

### Produkte und Produktionsprozesse

Bei der Neuentwicklung und Verbesserung von Produkten steht am Anfang oft eine Idee oder ein gewünschtes Produkt. In einer Entwicklungs- und Testphase im Labor wird die Synthese oder Herstellung eines Produktes definiert. In der Chemie bezeichnet

die Synthese ein Verfahren, mit dem aus Elementen eine Verbindung oder aus einfacher gebauten Verbindungen ein komplizierter zusammengebauter Stoff hergestellt wird. Danach wird meist eine etwas größere Pilotanlage gebaut, deren Dimension durch maßstäbliche Vergrößerung (Scale-up) bestimmt wird. Schließlich wird das Verfahren nach erfolgreichen Tests in einer großtechnischen Anlage umgesetzt und im Betrieb optimiert. Abbildung 5.2.2 zeigt schematisch, welche verfahrenstechnischen Schritte in großtechnischen Produktionsprozessen vom Rohstoff bis zum gewünschten Produkt generell durchlaufen werden. Hier sind die Vor- und Nachbereitung mindestens genauso wichtig wie die eigentliche Produkterzeugung bzw. Reaktion. Oft fallen bei der Produktion neben gewünschten Produkten Neben- oder sogenannte Koppelprodukte sowie nicht verwertbare Reststoffe an, die weiterverarbeitet oder entsorgt werden müssen. Diese sollten daher so gering wie möglich gehalten werden.



**Abbildung 5.2.2: Verfahrenstechnische Vorgänge im großtechnischen Produktionsprozess**

### Betriebsweisen verfahrenstechnischer Prozesse

Man unterscheidet verschiedene Betriebsweisen, je nachdem, ob ein Prozess ohne Unterbrechung oder mit prozessbedingten Stopps läuft. Man bezeichnet den Betrieb als kontinuierlich, wenn ständig Stoffströme oder Energien zu- und abgeführt werden und es keine vorgegebenen Unterbrechungen gibt. Ein Prozess im Batchbetrieb muss hingegen nach gewisser Zeit unterbrochen werden, um z.B. Behälter zu entleeren oder Filter zu reinigen. Es gibt auch kombinierte Betriebsweisen, die Semi- oder Mischbetrieb genannt werden.

Eine andere Einteilung unterscheidet zwischen stationärem und instationärem Betrieb. Ein Prozess läuft stationär, wenn sich die Prozessparameter im Zeitablauf nicht verändern. Das heißt, der Prozess läuft stabil. Beim instationären Prozess ändern sich Prozessparameter wie Volumenströme oder Druck im Laufe der Zeit (z.B. beim Anfahren von Anlagen oder bei unerwünschten Prozesszuständen).

### 5.2.1.1 Verfahrenstechnische Grundoperationen

Verfahrenstechnische Grundoperationen sind einfachste physikalische Vorgänge, die Eigenschaften, Zusammensetzung oder Art von Stoffen verändern. Die Aneinanderreihung von Grundoperationen ergibt den gesamten Prozess.

Ein wesentlicher Vorgang in fast allen verfahrenstechnischen Prozessen ist das Fördern von Stoffen. Dabei kommen Grundlagen der Strömungsmechanik in Strömungs- und Fördermaschinen wie Pumpen, Verdichtern und Förderschnecken zur Anwendung. In vielen weiteren verfahrenstechnischen Grundoperationen werden Grundlagen der Mechanik, der Wärme- und Stoffübertragung, der chemischen Reaktionstechnik oder von Separationsprozessen umgesetzt.

Tabelle 5.2.1 gibt einen Überblick über die wesentlichen verfahrenstechnischen Grundoperationen und die Zuordnung zu den verfahrenstechnischen Teilgebieten.

**Tabelle 5.2.1: Auswahl an verfahrenstechnischen Grundoperationen in Prozessen**

Vorgang	Grundoperation	Teilgebiet
Fördern	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pumpen, Verdichter, Förderschnecke</li> </ul>	Mechanische Verfahrenstechnik
Trennen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beheizen/Kühlen</li> <li>• Destillieren/Rektifizieren</li> <li>• Extrahieren</li> <li>• Trocknen</li> <li>• Membrantechnik</li> </ul>	Thermische Verfahrenstechnik
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Filtrieren</li> <li>• Zentrifugieren/Dekantieren</li> <li>• Zerkleinern/Mahlen</li> </ul>	Mechanische Verfahrenstechnik
Klassieren	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sieben</li> </ul>	Mechanische Verfahrenstechnik
Vereinigen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mischen/Rühren</li> <li>• Homogenisieren</li> <li>• Agglomerieren</li> </ul>	Mechanische Verfahrenstechnik
Konzentrieren	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kristallisieren</li> </ul>	Thermische Verfahrenstechnik
Reaktion/ Umwandlung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reaktionstechnik</li> <li>• Katalyse</li> </ul>	Chemische Verfahrenstechnik

Auf dem Weg zu einem reinen Produkt hat man es in der Verfahrenstechnik häufig mit Gemischen zu tun. Ein mehrphasiges Gemisch besteht immer aus einer kontinuierlichen Phase – dem sogenannten Dispersionsmittel – und einer darin verteilten, dispergierten Phase. Dabei können sowohl Dispersionsmittel als auch disperse Phase in allen Aggregatzuständen vorkommen. Tabelle 5.2.2 zeigt die entsprechenden Bezeichnungen.

Um Gemische mathematisch zu beschreiben, verwendet man unterschiedliche Konzentrations- und Mengenangaben. Üblicherweise wird hier in Massen-, Stoffmengen-

(Mol) oder Volumeneinheiten gerechnet. Diese Einheiten können ineinander umgerechnet und somit Stoffströme in einem Prozess einheitlich dargestellt werden.

**Tabelle 5.2.2: Bezeichnung von Gemischen**

Disperse Phase	Dispersionsmedium		
	Gas	Flüssigkeit	Feststoff
Gasförmig		Schaum	Schaumstoff
Flüssig	Aerosol (Nebel)	Emulsion	Poröser, flüssigkeitsgefüllter Feststoff
Fest	Aerosol (Rauch)	Suspension	Disperser Feststoff (z.B. Erz)

### 5.2.1.2 Mess-, Steuer- und Regelungstechnik, Digitalisierung

Um Anlagen richtig betreiben zu können, müssen wesentliche Prozessparameter wie Durchfluss, Druck, Temperatur gemessen werden. Ausgehend von Messgrößen kann der Prozess gesteuert oder geregelt werden. Von *Regelung* (bzw. einem geschlossenen Regelkreis) spricht man, wenn die Prozessgröße, die eingestellt werden soll (Regelgröße), über eine Rückkopplung den Wert der Eingangsparameter bestimmt. Überprüft man den aufgetretenen Wert der Prozessgröße nicht, spricht man von *Steuerung* bzw. einem offenen Wirkungsablauf. Mögliche Abweichungen (z.B. durch äußere Störungen hervorgerufen) wirken sich nicht auf den Steuerungsablauf aus. Anpassungen können entweder manuell oder automatisch durchgeführt werden; z.B. Erhöhung der Heizleistung, wenn die gemessene Temperatur zu niedrig ist, oder Zudrehen eines Ventils, wenn der Durchfluss zu hoch ist.

In den letzten Jahren haben sich technische Produktionsverfahren immer mehr zu halb- und vollautomatisierten Prozessen entwickelt. Dadurch hat das digitale Messen und Regeln von Prozessparametern immer mehr an Bedeutung gewonnen. Bei automatisierten Prozessen werden Prozessparameter nicht manuell von Betriebspersonal angepasst, sondern es existiert ein elektronisches Kontrollsystem, das Messwerte mit vorgegebenen Sollwerten vergleicht und automatisch in Form von Algorithmen Anpassungen einleitet. Prozessparameter werden nicht mehr nur gemessen, um den aktuellen Prozesszustand zu erfassen und zu überwachen, sondern es werden Daten auch automatisch erfasst, gespeichert und ausgewertet.

Heute werden aus den Daten oft schon Vorhersagen getroffen, die ein schnelleres, automatisiertes, effizientes und wirtschaftliches Eingreifen erlauben. Vorzeitiges Reagieren bei Prozessveränderungen, automatisierte Chemikaliennachbestellung und digitale Logistik, effizientere Anlagenwartung mit kürzeren Stehzeiten oder Fernüberwachung sind Beispiele, die zeigen, wie die Digitalisierung moderne Prozesse prägt. Die enge Verknüpfung von Prozesstechnik und Automation ist ein wesentlicher Faktor geworden.

## 5.2.2 Darstellung verfahrenstechnischer Prozesse

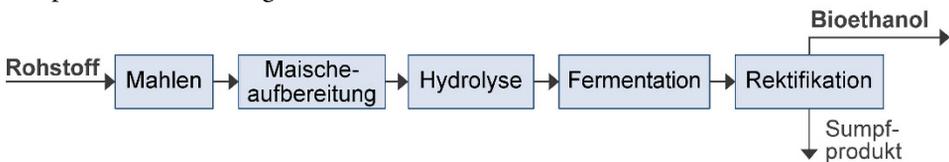
Bei der Entwicklung oder Projektierung verfahrenstechnischer Anlagen werden Abläufe und Stoffströme in *Fließbildern* dargestellt. Sie dokumentieren und veranschaulichen technische Prozesse und dienen somit als wesentliches Kommunikationsmittel (z.B. zwischen Technikerinnen und Technikern, Projektpartnerinnen und -partnern und Behörden). Es gibt drei verschiedene Fließbildformen, die sich v.a. im Detaillierungsgrad unterscheiden:

- Grundfließbild,
- Verfahrensfließbild,
- Rohrleitungs- und Instrumentierungsfließbild.

Normen vereinheitlichen und definieren die Form und den Inhalt von Fließbildern. Als wichtigstes Regelwerk ist hier die ÖNORM EN ISO 10628 (siehe Austrian Standards International 2013, 2015) zu nennen. Um alle technischen Details genau darstellen zu können, ist eine Vielzahl an Symbolen nötig. Oft werden firmenspezifische Legenden vorgegeben, um technische Lösungen eindeutig darstellen zu können. Im Folgenden werden die verschiedenen Darstellungsformen, ihre Funktion und Inhalte genauer beschrieben.

### 5.2.2.1 Grundfließbild

Grundfließbilder sind die einfachste Form, Prozesse darzustellen. Sie werden oft in einer frühen Konzeptphase verwendet, um die generelle Funktion des Prozesses zu skizzieren. Es können Aufgaben des Prozesses, Grundoperationen, Hauptströme (Stoffe, Energie) und Systemgrenzen definiert und dargestellt werden. Vorgänge und Teilschritte werden in Form von Rechtecken gezeichnet. Abbildung 5.2.3 zeigt ein Grundfließbild am Beispiel der Herstellung von Bioethanol.

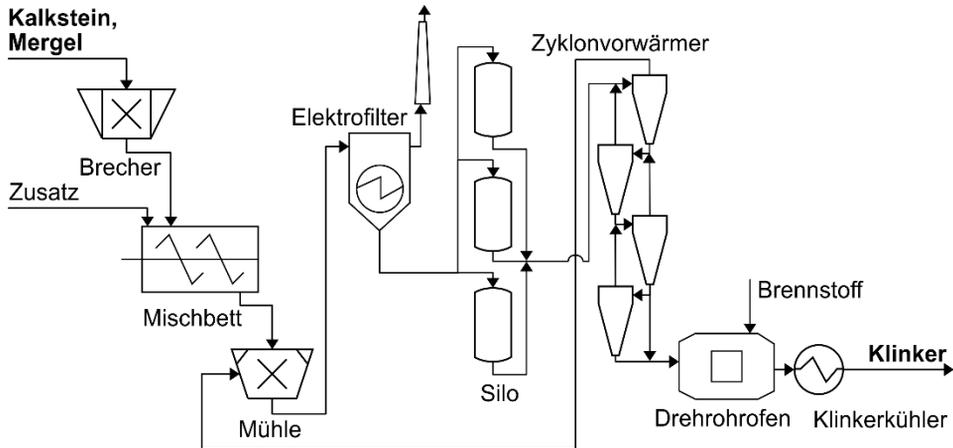


**Abbildung 5.2.3: Grundfließbild am Beispiel der Herstellung von Bioethanol**

### 5.2.2.2 Verfahrensfließbild

In einem Verfahrensfließbild werden konkrete Anlagenkomponenten, relevante Teilströme sowie Betriebs- und Regelungskonzepte dargestellt. Im Gegensatz zu Grundfließbildern verwendet man beim Verfahrensfließbild über Normen definierte Symbole anstelle von Rechtecken.

Abbildung 5.2.4 zeigt am Beispiel der Herstellung von Zementklinker, wie ein Verfahrensfliessbild aussehen kann. Bei der Zementherstellung werden Kalkstein und Mergel direkt vom Steinbruch aufgearbeitet (zerkleinert und homogenisiert). Das daraus entstehende sogenannte Rohmehl wird im Kalzinierer getrocknet, vorgewärmt und gebrannt. Im Drehrohrofen wird die gewünschte Klinkerphase gebildet.



**Abbildung 5.2.4:** Verfahrensfliessbild am Beispiel der Herstellung von Zementklinker

### 5.2.2.3 Rohrleitungs- und Instrumentierungsflussbild

Am detailliertesten werden Prozesse in Rohrleitungs- und Instrumentierungsflussbildern (R&I-Fließbild) dargestellt. Sie bilden oft neben anderen Spezifikationen die Grundlage für die Auslegung, den Einkauf und den Bau von Komponenten und Anlagen(-teilen).

In einem R&I-Schema werden Apparate, Maschinen und Antriebe symbolisch dargestellt und identifiziert. Weitere kennzeichnende Größen sind die Förderrichtung, genaue Angaben und Nummerierung von Rohrleitungen inklusive Klassen-, Material-, Nennweiten- und Druckstufenangaben. Ein wesentliches Merkmal von R&I-Fließbildern ist die Angabe und Identifikation von Mess-, Steuer- und Regeleinrichtungen.

In den meisten Prozessen werden Stoffströme transportiert und auf verschiedenen Druckstufen befördert. Je nach gefördertem Medium unterscheidet man zwischen Pumpen für Flüssigkeiten und beispielsweise Gebläsen, Ventilatoren und Verdichtern für Gase (vgl. Abbildung 5.2.5).

Stoffe werden in verfahrenstechnischen Prozessen nicht nur transportiert, sondern auch in Behältern gelagert, behandelt oder verarbeitet. Neben der Lagerung können Behälter auch durch Einbauten weitere Funktionen im Prozess erfüllen (vgl. Abbildung 5.2.5).

Sowohl bei Trennaufgaben als auch bei der Herstellung von Produkten durch chemische Reaktionen kommen sogenannte Kolonnen oder Reaktoren zum Einsatz. Dies sind Behälter mit Einbauten, die den Stoffaustausch und die Reaktionen verbessern oder begünstigen (vgl. Abbildung 5.2.5).

Für einfache Trennaufgaben von Feststoffen aus Flüssigkeiten werden häufig Filter verwendet (vgl. Abbildung 5.2.5).

Wesentliche Bestandteile in verfahrenstechnischen und energietechnischen Prozessen sind das Erwärmen und Kühlen von Stoffströmen, da die Temperatur eine wesentliche thermodynamische Größe ist. Abbildung 5.2.5 zeigt die allgemeinen Symbole für Wärmeaustauscher und als konkretes Beispiel einen Rohrbündelwärmeaustauscher, bei dem eines der beiden Medien in mehreren Rohren durch den Behälter geleitet wird, der mit dem anderen Medium gefüllt bzw. durchströmt wird.

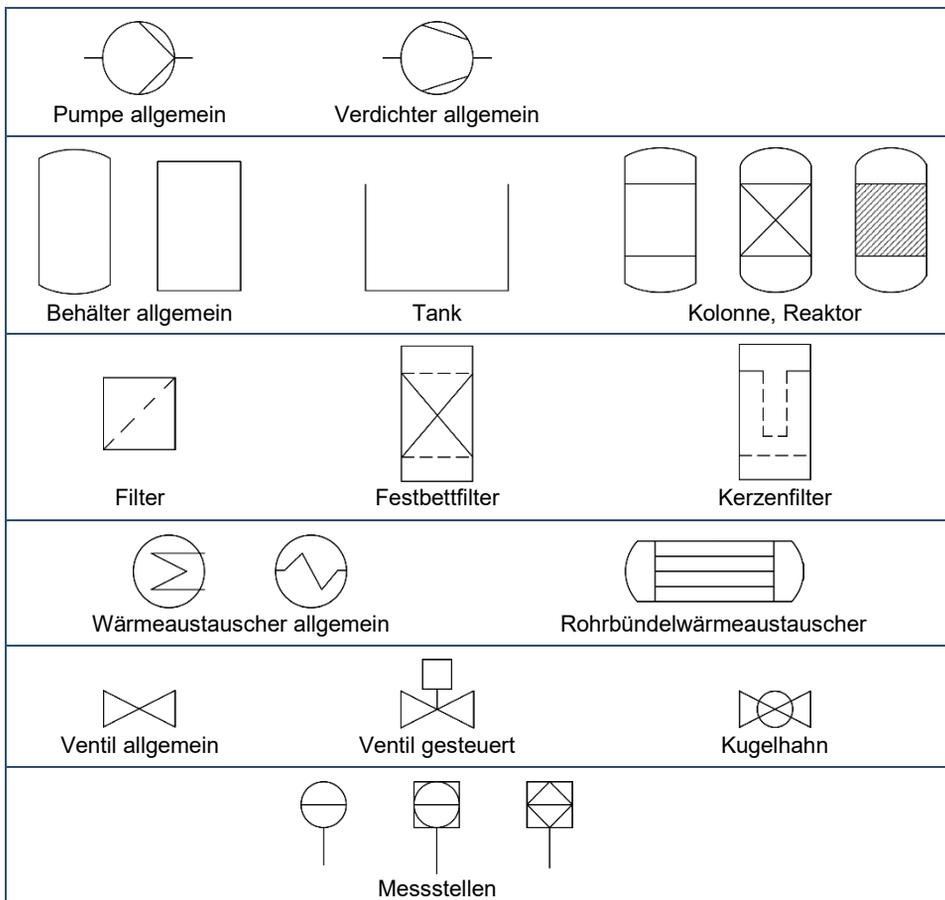


Abbildung 5.2.5: Symbole im R&I-Fließbild (beispielhaft)

In fast jedem verfahrenstechnischen Prozess werden die Prozessvariablen gemessen, gesteuert und geregelt. Speziell in modernen hochautomatisierten Prozessen spielen Mess- und Regeleinheiten eine entscheidende Rolle. Absperrorgane und allgemeine Messstellensymbole werden in R&I-Fließbildern dargestellt (vgl. Abbildung 5.2.5).

Häufig gemessene Größen sind Druck, Differenzdruck, Temperatur, Volumen- bzw. Massenstrom und Füllstand. Im R&I-Fließbild wird jede Messstelle als Kreis mit Angabe der Aufgabe sowie einer eindeutigen Nummer dargestellt. Tabelle 5.2.3 zeigt, wie die Kennzeichnung von Messstellen in den R&I-Symbolen aufgebaut ist. Jede Bezeichnung einer Mess- und Regelstelle hat als ersten Buchstaben die Bezeichnung der Messgröße, gefolgt von einer Aneinanderreihung von Ergänzungs- und Folgebuchstaben, die die Art der Messung (z.B. Differenzmessung) sowie der Anzeige, des Alarms etc. angeben.

**Tabelle 5.2.3: Kennbuchstaben der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik für das R&I-Fließbild (beispielhaft)**

Größe/ Funktion	Erst-	Ergänzungs- buchstabe	Folge- buchstabe
Druck (pressure)	P		
Temperatur (temperature)	T		
Volumenstrom (flow rate)	F		
Füllstand (level)	L		
Differenz (difference)		D	
Messumformer (transmitter)			T
Regelung (automatic control)			C
Anzeige (indication)			I
Aufzeichnung (recording)			R
Alarm (alarm)			A

Zur Erläuterung der Symbole werden in Fallbeispiel 5.2.1 drei Beispiele für Druck, Temperatur und Füllstandsmessungen mit unterschiedlichen Funktionen gezeigt.

**Fallbeispiel 5.2.1: R&I-Symbole für Mess- und Regelstellen**

Ein Druckmessumformer (P, T) mit Anzeige (I) am Messgerät und Regelungsfunktion (C) wird mit PICT dargestellt. TAT symbolisiert einen Temperaturmessumformer (T, T) ohne Anzeige mit Alarmfunktion (A). Ein Füllstandsmessumformer (L, T) mit Anzeige (I) am Gerät wird als LIT eingezeichnet. Das T am Ende steht für Messumformer (transmitter).

Abbildung 5.2.6 zeigt ein einfaches R&I-Fließbild eines geschlossenen atmosphärischen Tanks (B-008), dem zwei Flüssigkeiten zugeführt werden können (Flüssigkeit A bzw. B). Der Tank wird mittels Wäremeaustauscher (W-001) beheizt, das Gemisch kann mit einem Rührer (R-001) vermischt werden. Eine Kreiselpumpe (P-001) fördert das temperierte Gemisch weiter. Flüssigkeit C kann dem geförderten Gemisch direkt zudosiert werden.

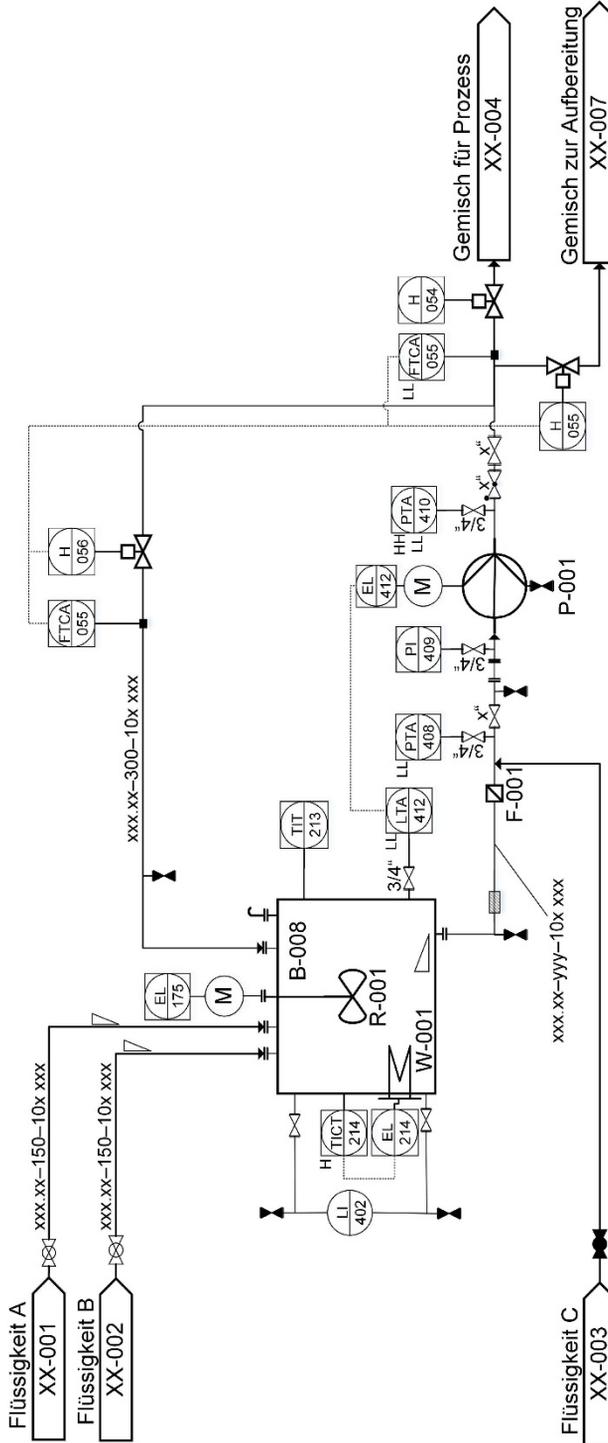


Abbildung 5.2.6: R&I-Fließbild eines beheizten Behälters mit Pumpe

### 5.2.3 Bilanzierung und Berechnungen in der Prozesstechnik

Sobald ein Prozess oder Produkt definiert ist, bedarf es oft schon in der Planungsphase einiger grundlegender Berechnungen, um Stoffströme, Energiebedarf und Apparategrößen festzulegen. Aber auch später im Betrieb der Anlage werden Bilanzen aufgestellt, um z.B. die Effizienz zu überprüfen oder Verbesserungen zu erarbeiten. Abbildung 5.2.7 zeigt die üblicherweise dafür benötigten Grundlagen und Berechnungen.



**Abbildung 5.2.7: Grundlagen und Berechnungen in der Verfahrenstechnik**

Unter Bilanzierung versteht man generell die Gegenüberstellung von zufließenden Strömen in ein und abfließenden Strömen aus einem System (Abbildung 5.2.8). Dabei können z.B. Stoffe, Energien oder auch Geld fließen. In der Prozesstechnik liegen dieser Gegenüberstellung Massen-, Energie-, und Impulserhaltungssätze zugrunde. Bei verfahrenstechnischen Berechnungen werden häufig Grundlagen der Stoffchemie, Mechanik, Strömungslehre und Wärmeübertragung mathematisch miteinander verknüpft. Beim Erstellen von Bilanzen muss der Bilanzraum eines Systems klar definiert und abgegrenzt werden. Ein betrachtetes System kann vom kleinsten Apparatebauteil bis hin zu komplexen Verfahren oder gesamten Anlagen reichen. Über die Systemgrenzen hinweg können Materie, Energie und Informationen transportiert werden.



**Abbildung 5.2.8: Prinzip der prozesstechnischen Bilanzierung**

Unterschiedliche Bilanzräume sind am Beispiel des beheizten Behälters mit Pumpe in Abbildung 5.2.9 dargestellt. Hier ändern sich Stoffströme und Energieströme je nach Wahl der Bilanzgrenzen. Zur Berechnung der benötigten Leistung für die Beheizung des Tanks eignet sich Bilanzraum 1 besser; zur Bestimmung der Massenströme, die Einfluss auf umliegende Prozessteile haben, ist Bilanzraum 2 relevant.

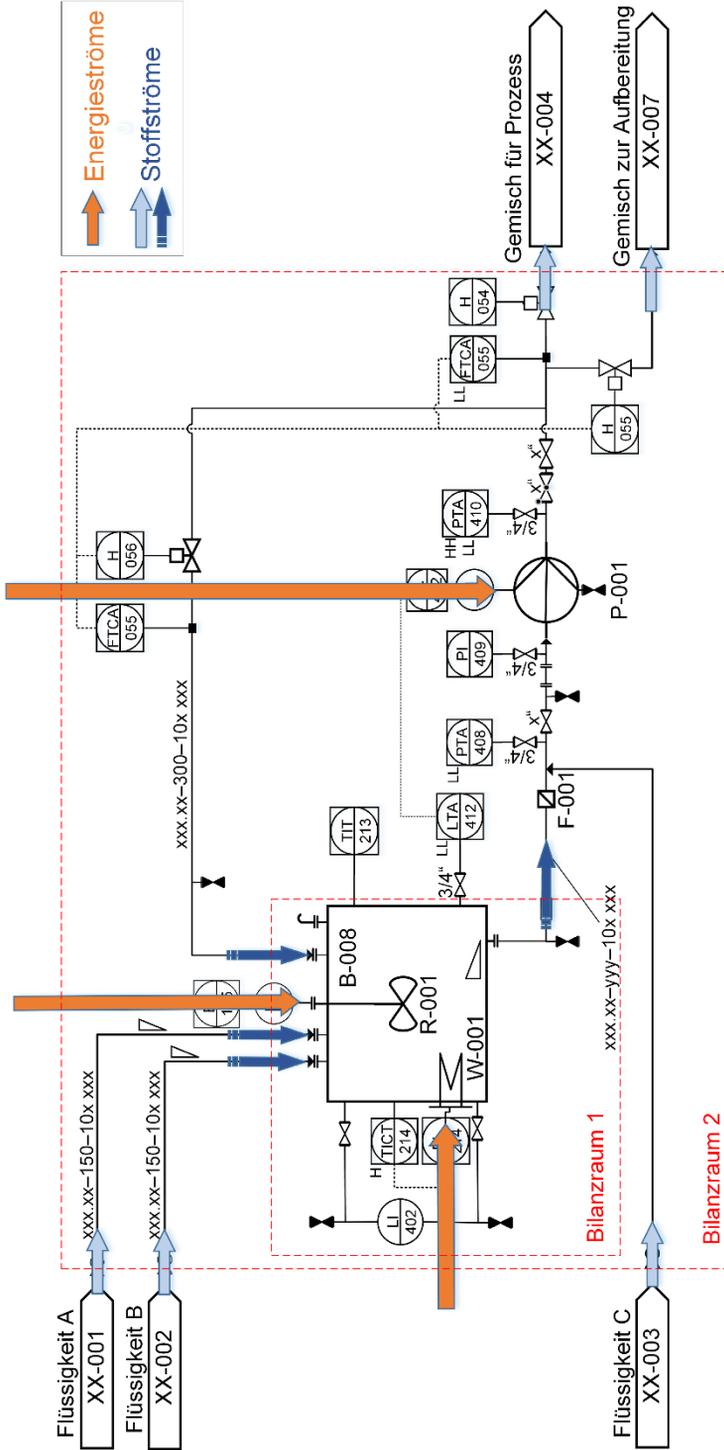


Abbildung 5.2.9: Darstellung von unterschiedlichen Bilanzräumen am Beispiel eines beheizten Behälters mit Pumpe

### 5.2.4 Projektmanagement in der Verfahrenstechnik

In diesem Abschnitt wird die wichtige Rolle des technischen Projektmanagements bei der Konzeption und beim Bau verfahrenstechnischer Anlagen gezeigt.

Bei großen verfahrenstechnischen Projekten werden Anlagen oder Anlagenteile entsprechend den Kundenvorgaben oder -spezifikationen geplant, ausgelegt, beschafft, gebaut, geliefert und in Betrieb genommen. Während der gesamten Projektlaufzeit ist eine Projektmanagerin/ein Projektmanager dafür verantwortlich, ein geeignetes, multidisziplinäres Projektteam zusammenzustellen, und hat als direkte Ansprechperson für die Auftraggeberin/den Auftraggeber für eine termingerechte Lieferung des Produktes/der Anlage zu sorgen. Die Aufgaben der Projektmitarbeiterinnen und -mitarbeiter sind klar definiert. Sie müssen im vorgegebenen Zeitraum erfüllt werden, da Aktivitäten miteinander verknüpft sind und Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Personen/Teams/Aktivitäten bestehen. Eine kleine zeitliche Verschiebung kann sich im Verlauf des Projekts zu einer großen Verzögerung und enormen, ungeplanten Kosten entwickeln.

Große Projekte werden in Abschnitte (Meilensteine) gegliedert. Sie dienen zur Strukturierung des Projektablaufs und sind häufig an Teilzahlungen der Auftraggeberin/des Auftraggebers geknüpft. Einen wesentlichen Anteil der Projektarbeit stellt eine umfassende Dokumentation dar. Sie wird für Projektpartnerinnen und -partner, für Genehmigungsverfahren und für Zertifizierungen benötigt. Dabei wird neben technischen Dokumenten, Anträgen, Verträgen und Spezifikationen auch eine komplette Enddokumentation erstellt. Als spezielle Beispiele können hier die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) oder die CE-Zertifizierung genannt werden. Eine UVP soll in der Planungsphase helfen, umweltrelevante Auswirkungen einzuschätzen. Die CE-Zertifizierung bestätigt die Einhaltung rechtlicher Mindestanforderungen, stellt aber kein Qualitätskennzeichen dar. Bau- oder Umbauvorhaben prozesstechnischer Anlagen sind ab einer bestimmten Größe bzw. Produktionskapazität oder ab Überschreitung ähnlicher Kriterien einer UVP zu unterziehen.

Das Ziel einer UVP ist es, direkte oder indirekte Auswirkungen des Projekts auf die Umwelt vorzeitig zu erfassen, Umweltschäden zu vermeiden und Umweltbelangen im Entscheidungsprozess einen adäquaten Stellenwert zu geben. Umfassende Genehmigungsverfahren sollen transparent sein, damit Antragstellerinnen und Antragsteller besser darauf vorbereitet sind. Vor dem Bau oder Umbau sind z.B. thermische Kraftwerke, Wasserkraftwerke, Chemieanlagen, Raffinerien sowie Papier- und Zellstoffanlagen einer UVP zu unterziehen. In der EU wurde die UVP durch die UVP-Richtlinie (2011) verankert, in Österreich durch das Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz (UVP-G 2000) und verschiedene Gesetze im Bereich der Bodenreform.

### 5.2.5 Zusammenfassung

Die angewandte Prozesstechnik beschäftigt sich mit aufeinander einwirkenden Vorgängen in einem technischen System, bei denen Energie, Materie und/oder Information umgewandelt, transportiert und/oder gespeichert werden. An der Schnittstelle zwischen Chemie und Maschinenbau werden dabei verschiedene Bereiche der technischen Industrie abgedeckt: Lebensmittelproduktion, Strom- und Wärmebereitstellung in Heizkraftwerken, Erdölraffinerie etc.

Die Darstellung von Prozessen in Fließbildern ist eine wesentliche Kommunikationsmöglichkeit sowohl innerhalb der Prozesstechnik als auch mit angrenzenden Disziplinen. Je nach Detailierungsgrad unterscheidet man zwischen Grund-, Verfahren- sowie Rohrleitungs- und Instrumentierungsfließbildern. Auf Basis der Fließbilder lassen sich Bilanzgrenzen für die Stoff- und Energiebilanzierung definieren. Damit können Stoff- und Energieströme berechnet und Daten für die Auslegung von Anlagenteilen ermittelt werden.

Basierend auf physikalischen und chemischen Grundlagen werden die detaillierte Auslegung und Berechnung von Anlagen inklusive aller Anlagenteile, Automatisierung, Digitalisierung, Mess-, Steuer- und Regelungstechnik durchgeführt.

Dabei werden wirtschaftliche, umweltschonende und energieeffiziente Anlagen und Prozesse entwickelt und diese an neue Anforderungen angepasst. Bei der Umsetzung in der Praxis spielt auch gutes Projektmanagement eine wesentliche Rolle.

### Literatur

- Austrian Standards International (2013): ÖNORM EN ISO 10628-2. Schemata für die chemische und petrochemische Industrie - Teil 2: Graphische Symbole (ISO 10628-2:2012). Wien.
- Austrian Standards International (2015): ÖNORM EN ISO 10628-1. Schemata für die chemische und petrochemische Industrie - Teil 1: Spezifikation der Schemata (ISO 10628-1:2014). Wien.
- UVP-G (2000): Bundesgesetz über die Prüfung der Umweltverträglichkeit (Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz 2000), i.d.F. Nov. 2018, zuletzt geändert mit BGBl. I Nr. 80/2018.
- UVP-Richtlinie (2011): Richtlinie 2011/92/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Dezember 2011 über die Umweltverträglichkeitsprüfung bei bestimmten öffentlichen und privaten Projekten. Abl L 26/2012, 1. Verfügbar in: <http://data.europa.eu/eli/dir/2011/92/oj> [Abfrage am 12.6.2019].

### Weiterführende Literatur

- Vauck, W. R. A. und Müller H. A. (1999): Grundoperationen chemischer Verfahrenstechnik. 11. Auflage, Weinheim: Wiley VCH.

## 5.3 Abfallwirtschaft und Recycling – am Beispiel von Kunststoffprodukten

*Christian Zafiu und Marion Huber-Humer*

*Institut für Abfallwirtschaft, Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt (WAU)*

*[christian.zafiu@boku.ac.at](mailto:christian.zafiu@boku.ac.at), [marion.huber-humer@boku.ac.at](mailto:marion.huber-humer@boku.ac.at)*

### 5.3.1 Von der Abfallentsorgung zur Ressourcenbewirtschaftung

In den Anfängen unserer Gesellschaft waren Abfälle nur organischen und damit natürlichen Ursprungs. Sie fielen auch nicht wirklich konzentriert an, und so erforderte ihr „Wegwerfen“ keine besonderen Vorkehrungen. Abfälle, sofern sie überhaupt als solche wahrgenommen wurden, fügten sich problemlos wieder in den natürlichen Stoffkreislauf ein. Ein Bewirtschaften wurde erst dort notwendig, wo sie in großen Mengen auf engem Raum anfielen. Zum akuten Problem wurden Abfälle mit der Urbanisierung und dem Wandel von einer Aufbewahrungs- und Reparaturgesellschaft hin zur heutigen Wegwerfgesellschaft. Natürliche Kreisläufe sind längst nicht mehr in der Lage, mit der Menge an Abfällen und v.a. mit der Vielzahl von synthetisierten Stoffen umzugehen.

Im 20. Jahrhundert lag der Schwerpunkt der geregelten Abfallbewirtschaftung in Österreich sowie in einigen anderen wirtschaftlich stark wachsenden und industrialisierten Teilen Europas hauptsächlich im Aufbau einer effizienten (getrennten) Abfallsammlung im urbanen Raum. Die Errichtung von kontrollierten, mit technischen Barrieren ausgestatteten Deponien lag dann v.a. in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts im Fokus. Die Ausrichtung der Abfallwirtschaft war damals eindeutig entsorgungsorientiert.

Die Ablagerung von nichtvorbehandelten Siedlungsabfällen auf „Hausmülldeponien“ (wissenschaftlich auch als „Reaktordeponien“ bezeichnet) bringt langfristige Umweltauswirkungen wie treibhausrelevante Emissionen von Methangas sowie kostenaufwendige Sammel- und Reinigungsverfahren für verunreinigte Deponiesickerwässer mit sich. Aufgrund dessen wurde in Europa die Vorbehandlung von Abfällen vor ihrer Ablagerung thematisiert. Es folgte der Erlass entsprechender gesetzlicher Vorgaben. Im Jahr 1990 wurde im österreichischen Abfallwirtschaftsgesetz (AWG § 1(1)) das Gemeinwohlprinzip (also der Umgang mit Abfällen ohne Gefährdung der menschlichen Gesundheit oder Schädigung der Umwelt) sowie das Vorsorgeprinzip (keine Beeinträchtigung künftiger Generationen) festgeschrieben. Auf europäischer Ebene erfolgte die Festschreibung dieser Prinzipien in der Abfallrahmenrichtlinie (derzeitige Fassung: Richtlinie 2008/98/EG).

In einigen europäischen Ländern – allen voran z.B. Deutschland, Österreich und die Niederlande – hat sich die Abfallwirtschaft in den letzten Jahrzehnten von der Ent-

sorgungsorientierung hin zur Ressourcenorientierung entwickelt. Dieser Prozess wird nun von der Europäischen Kommission in allen Mitgliedsstaaten eingefordert. Die EU hat dazu ambitionierte Ziele im sogenannten „Circular Economy Package“ (Kreislaufwirtschaftspaket; EU COM 2018a) festgelegt, welches am 4. Juli 2018 in Kraft getreten ist und nun in den nächsten zwei Jahren in nationales Recht umzusetzen ist. Übergeordnetes politisches Ziel des EU-Kreislaufwirtschaftspaketes ist es, den Übergang von einem linearen Wirtschaftsmodell in Europa hin zu einer Kreislaufwirtschaft anzukurbeln, dadurch die globale Wettbewerbsfähigkeit zu steigern und ein nachhaltiges Wirtschaftswachstum zu erreichen. Der Abfallwirtschaft wird hierbei eine zentrale Rolle abverlangt: Abfälle als Sekundärrohstoffe wieder in den Produktionskreislauf und die Nutzungskette zurückzuführen.

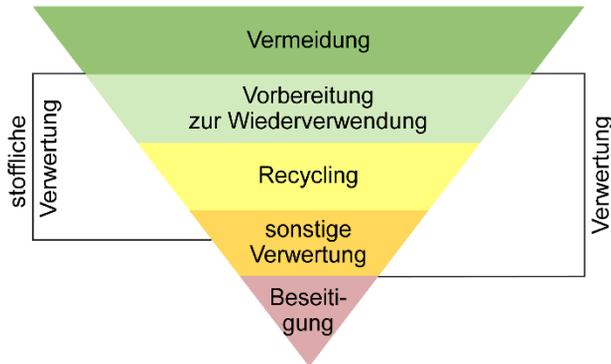
Abfallwirtschaftliche Maßnahmen sollen und können des Weiteren auch einen bedeutenden Beitrag zur Erreichung der SDGs leisten. So wird im SDG 11 (nachhaltige Städte und Gemeinden) und SDG 12 (nachhaltige/r Konsum und Produktion) die Abfallwirtschaft explizit angesprochen, und zwar in den Unterzielen 11.6 („Bis 2030 die von den Städten ausgehende Umweltbelastung pro Kopf senken, u.a. mit besonderer Aufmerksamkeit auf der Luftqualität und der kommunalen und sonstigen Abfallbehandlung“), 12.3 („Bis 2030 die weltweite Nahrungsmittelverschwendung pro Kopf auf Einzelhandels- und Verbraucherebene halbieren ...“), 12.4 („Bis 2020 einen umweltverträglichen Umgang mit Chemikalien und allen Abfällen während ihres gesamten Lebenszyklus ... erreichen ...“) und 12.5 („Bis 2030 das Abfallaufkommen durch Vermeidung, Verminderung, Wiederverwertung und Wiederverwendung deutlich verringern“). Zudem haben fehlende oder fehlgerichtete abfallwirtschaftliche Maßnahmen deutliche Auswirkungen u.a. auf SDG 6 (sauberes Wasser und Sanitärversorgung) z.B. durch Beeinträchtigung des Grund-/Trinkwassers aufgrund unsachgemäßer Abfallablagerung/Deponierung, SDG 13 (Maßnahmen zum Klimaschutz) z.B. Treibhausgasemissionen aus Abfalldeponien, SDG 14 (Leben unter Wasser) z.B. Meeresverschmutzung und -vermüllung durch Kunststoffabfälle/Mikroplastik.

### *5.3.2 Der Abfallbegriff und die Abfallwirtschaft heute*

Die Abfallwirtschaft beschäftigt sich heute mit der Vermeidung, Verwertung und Behandlung bzw. Beseitigung von Abfällen. Im rechtlichen Sinn (Abfallwirtschaftsgesetz (AWG 2002)) sind Abfälle bewegliche Sachen, deren sich die Besitzerin/der Besitzer entledigen will oder bereits entledigt hat (subjektiver Abfallbegriff) oder deren Sammlung, Lagerung, Beförderung und Behandlung als Abfall erforderlich ist, um die öffentlichen Interessen nicht zu beeinträchtigen (objektiver Abfallbegriff). Um Abfall nach dem objektiven Abfallbegriff einzuordnen, sind jene Gefahren für die Umwelt zu berücksichtigen, die von den Sachen selbst ausgehen und die durch

eine Erfassung und Behandlung verhindert werden können. Entscheidend ist immer das tatsächliche Gefährdungspotenzial der betreffenden Materialien für die Umwelt.

Die Bewirtschaftung der Abfälle erfolgt in Österreich gemäß der von der EU vorgegebenen fünfstufigen Maßnahmenhierarchie (Abfallrahmenrichtlinie 2008) und soll im Sinne einer möglichst umfassenden Ressourcenschonung sowie nachhaltigen und nachsorgefreien Bewirtschaftung der Abfälle ablaufen (siehe Abbildung 5.3.1).



**Abbildung 5.3.1: Maßnahmenhierarchie für die Behandlung von Abfällen gemäß EU-Abfallrahmenrichtlinie 2008**

Oberste Priorität in der Maßnahmenhierarchie hat die Vermeidung von Abfällen. Es handelt sich hierbei um Maßnahmen im Vorfeld der Abfallbewirtschaftung, die dafür sorgen, dass Produkte erst gar nicht zu Abfällen werden (also der rechtliche Abfallbegriff noch nicht schlagend wird). Um dieses Ziel zu erreichen, sind v.a. auch die Konsumentinnen und Konsumenten bei ihren alltäglichen Aktivitäten, ihren Kaufentscheidungen und prinzipiell in der Gestaltung ihres gesamten „Lifestyles“ gefordert.

Welche abfallwirtschaftlichen Maßnahmen gemäß dieser Hierarchie gesetzt und ergriffen werden können, wird in weiterer Folge am *Beispiel von Kunststoffabfällen* dargestellt. Dieses Beispiel wurde gewählt, da der Umgang mit Kunststoffprodukten bzw. -abfällen sowie deren unsachgemäße und unkontrollierte Freisetzung in die Umwelt (Schlagworte „Littering“ und „Mikroplastik“) ein sehr aktuelles und gesellschaftsrelevantes Umweltthema darstellen und neue gesetzliche Regelungen diesbezüglich die Abfall- und Kreislaufwirtschaft vor enorme Herausforderungen stellt.

### 5.3.3 Grundlagen und Relevanz von Kunststoffabfällen

#### 5.3.3.1 Mengen und Umweltrelevanz

Kunststoffe sind bedeutende Werkstoffe des 20. Jahrhunderts, die viele Bereiche der Gesellschaft verändert haben. Im Jahr 2015 wurden weltweit 322 Mio. t Kunststoffe

(PlasticsEurope 2017) und in der EU etwa 49 Mio. t (EU COM 2018a) produziert. Ihren Erfolg verdanken Kunststoffe v.a. den günstigen Produktionskosten, den vielfältigen Verarbeitungsformen und der Diversität ihrer Eigenschaften, die dazu führten, dass sie in den vergangenen Jahrzehnten in vielen Bereichen traditionelle Werkstoffe sehr schnell ersetzen. Kunststoffprodukte werden aber auch sehr rasch wieder zu Abfällen. In der EU fallen derzeit pro Jahr insgesamt etwa 25 bis 26 Mio. t Kunststoffabfälle an, wovon ca. 50% deponiert und 30% thermisch verwertet werden, 20% gehen ins stoffliche Recycling (EU COM 2018b). Für ein hochwertiges stoffliches Recycling müssen häufig noch Störstoffe und Verunreinigungen entfernt werden, was die Menge des letztendlich tatsächlich produzierten Sekundärrohstoffs deutlich verringert.

Besonders für kurzlebige alltägliche Güter wurden und werden häufig Kunststoffe eingesetzt. Ein Paradebeispiel dafür sind Verpackungen, die bei den Konsumentinnen und Konsumenten ebenso anfallen wie in der Produktion und im Handel (z.B. Transportverpackungen). Die jährliche Produktion von Kunststoffverpackungen beträgt weltweit derzeit 78 Mio. t. Diese werden meist schon nach sehr kurzen Nutzungsphasen zu Abfällen. Derzeit werden 40% der Kunststoffverpackungsabfälle deponiert, 14% thermisch behandelt (mit oder ohne energetischem Nutzen), 14% für eine anschließende Verwertung getrennt gesammelt, und es wird geschätzt, dass ca. 32% nicht in abfallwirtschaftlichen Systemen erfasst werden, sie gelangen vermutlich unkontrolliert (z.B. durch achtloses Wegwerfen, sogenanntes Littering) in die Umwelt (Ellen MacArthur Foundation und McKinsey & Company 2016). Das „Kunststofflittering“ in der Umwelt kann zu großen Problemen führen (z.B. Müllteppiche in den Ozeanen, siehe Abschnitt 5.3.5). Von den 14% für eine weitere Verwertung erfassten Kunststoffverpackungen werden nur 2% zu Recyclaten, die wieder für gleichwertige Produkte, sprich lebensmitteltaugliche Verpackungen, eingesetzt werden (z.B. PET to PET Recycling), 8% werden einem „Downcycling“ zugeführt (z.B. aus hochwertigen Lebensmittelverpackungen werden Blumentöpfe, Gartenzwerge etc.), und 4% sind Prozessverluste.

### 5.3.3.2 Basiswissen zu Kunststoffen

Kunststoffe bestehen hauptsächlich aus langkettigen Molekülen, die als Polymere bezeichnet werden und vorwiegend aus den chemischen Elementen Wasserstoff (H) und Kohlenstoff (C), gefolgt von Stickstoff (N) und Sauerstoff (O) sowie in selteneren Fällen auch Schwefel (S) und Halogenen bestehen. Das Wort *Polymer* beschreibt die gemeinsame Eigenschaft der Moleküle, vierteilig zu sein und somit aus einer Vielzahl von gleichen Einzelmolekülen zu bestehen, den *Monomeren*. Durch die chemische Reaktion der *Polymerisation* bilden Monomere *kovalente Bindungen* untereinander aus, sodass eine Kette an Monomeren entsteht. Die Eigenschaften der

Polymere werden in erster Linie von der *Kettenlänge*, die in technischen Anwendungen aus 50 bis 5.000 Monomeren bestehen können, sowie den chemischen Eigenschaften der *Seitenkette* bestimmt. Eine weitere Klassifizierung von Polymeren wird anhand ihrer mechanisch-thermischen Eigenschaften vorgenommen, die auf Kräften und Bindungen zwischen den Polymerketten beruhen und als *Thermoplaste*, *Elastomere* und *Duroplaste* bezeichnet werden.

*Thermoplaste* besitzen die Eigenschaft, in einem bestimmten Temperaturbereich verformbar zu sein. Unterhalb dieses Temperaturbereichs sind sie fest, oberhalb setzt die Zersetzung des Materials ein. Die verformbaren Eigenschaften basieren auf den schwachen nichtkovalenten Bindungen zwischen den Polymerketten. Sie ermöglichen die Verarbeitung in vielen technischen Verfahren (wie Spritzguss, Extrusion etc.). In der Abfallwirtschaft spielen Thermoplaste ebenfalls eine wichtige Rolle, da sie sich zum Recycling gut eignen. So können sortenreine thermoplastische Kunststoffe (Kunststoffe einer einzigen Polymersorte) nach einer Reinigung und einem Aufschmelzprozess zu neuen Rohmaterialien in der Produktion werden (werkstoffliches bzw. Materialrecycling).

*Elastomere* verformen sich unter Einwirkung mechanischer Kräfte reversibel (d.h. umkehrbar). Sie bestehen aus langkettigen Polymeren mit wenigen kovalenten Bindungen. Unter Zugkraft können die Polymerketten gegeneinander verschoben werden. Lässt die Zugkraft nach, wird das Elastomer aufgrund der Verbindungen zwischen den Polymerketten wieder in den Ausgangszustand gebracht. Bei einer Überdehnung brechen diese Verbindungen und können nicht wiederaufgebaut werden.

*Duroplasten* haben eine hohe Formbeständigkeit, die durch kurze und untereinander verbundene Polymerketten erreicht wird. Aufgrund sehr vieler Bindungen lassen sich die Polymerketten nicht durch mechanische Kräfte gegeneinander verschieben, sodass irreversible Schäden entstehen.

In den letzten Jahren werden in bestimmten Anwendungsbereichen auch zunehmend „Biokunststoffe“ eingesetzt. Der Begriff des Biokunststoffs ist derzeit (Stand Juli 2019) nicht eindeutig definiert. Damit sind einerseits Kunststoffe gemeint, die aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden, und andererseits solche, die biologisch abbaubar sind (also von Organismen abgebaut werden können – unabhängig davon, aus welcher Rohstoffquelle sie stammen). Grundsätzlich können auf chemischem Wege alle Monomere sowohl aus fossilem Erdöl als auch aus nachwachsenden Quellen gewonnen werden. Aufgrund des hohen ökonomischen und energetischen Aufwands sind Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen aber erst rudimentär am Markt verfügbar und werden in alltäglichen Produkten noch sehr eingeschränkt verwendet. Zudem wird für die Herstellung von „Biokunststoffen“ meist auch fossile Energie eingesetzt.

Abbildung 5.3.2 zeigt die Einteilung der Kunststoffe nach zwei Kriterien. In den Zeilen wird die Rohstoffquelle berücksichtigt (Biokunststoffe bzw. Kunststoffe aus fossiler Quelle) und in den Spalten die biologische Abbaubarkeit (biologisch abbaubar bzw. nicht biologisch abbaubar). Die Polymerkürzel in der blauen und roten Kachel unterscheiden sich allein durch die Vorsilbe *Bio*. Das heißt, chemisch gleiche Monomere können sowohl aus fossilen als auch aus nachwachsenden Rohstoffquellen gewonnen werden. Die gelbe Kachel enthält Polymere, deren Monomere aus einer fossilen Rohstoffquelle gewonnen werden, aber dennoch biologisch abbaubar sind. Die biologische Abbaubarkeit ist daher keine Eigenschaft der Rohstoffquelle, sondern liegt in der Natur der chemischen Bindung der Polymerkette und der enthaltenen Monomere.

		biologisch abbaubar?	
		ja	nein
aus nachwachsenden Rohstoffen?	ja	PLA PHA Stärke-Blends etc.	Bio-PA Bio-PP Bio-PE Bio-PET etc.
	nein	PBAT PCL etc.	PA PP PE ABS etc.

**Abbildung 5.3.2:** Einteilung von Kunststoffen hinsichtlich Rohstoff und biologischer Abbaubarkeit

Biologisch abbaubare Kunststoffe weisen in ihrer Polymerkette chemische Bindungen auf, die natürlich vorkommende Enzyme in kleinere Fragmente und Monomere spalten können. Erst dann können sie von der Zelle aufgenommen und dort weiter abgebaut und sowohl zum Aufbau von neuen Biomolekülen verwendet als auch vollständig zu Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Wasser abgebaut werden (Mineralisierung). Biologisch abbaubare Kunststoffe müssen daher sowohl eine enzymatisch abbaubare Polymerkette aufweisen, als auch aus biologisch abbaubaren Monomeren bestehen.

Die Eigenschaften von Kunststoffen werden in weiteren Verarbeitungsschritten durch Zusätze bestimmt. Dazu zählen der Zusatz von *Additiven* (*Compoundierung*) sowie das Herstellen von Gemischen unterschiedlicher Polymere (*Blends*). Häufig werden auch *Füllstoffe* verwendet. *Additive* sind Moleküle, die über schwache Wechselwirkungen im Material gebunden sind und die intermolekulare Wechselwirkungen verändern. Zu den bedeutsamen Additiven zählen Weichmacher und Flammhemmer. Problematisch

an den meisten Additiven ist, dass sie durch ihre geringe Masse das Material mit der Zeit unkontrolliert verlassen und sich aufgrund ihrer Eigenschaften im menschlichen Organismus anreichern können (Thompson et al. 2009). Bei einigen Substanzen wird vermutet, dass sie hormonelle Wirkungen besitzen und für Mensch und Umwelt gesundheitsschädlich sein können. Ein viel diskutiertes Thema waren z.B. Phthalat-Weichmacher im Polyvinylchlorid (PVC) (Fankhauser-Noti und Grob 2006), das besonders in weichem Plastikkinderspielzeug vorkam. Umweltrelevante Additive können v.a. auch während eines unkontrollierten Zerfalls von Kunststoffabfällen in der Umwelt freigesetzt werden.

### 5.3.4 Maßnahmen- und Behandlungsprioritäten in der Abfallwirtschaft

#### 5.3.4.1 Abfallvermeidung (1. Ebene)

Abfallvermeidung stellt die oberste Maßnahmenpriorität in der Abfallwirtschaft dar. Sie lässt sich wie folgt unterteilen:

- qualitative Abfallvermeidung,
- quantitative Abfallvermeidung,
- Wiederverwendung („Re-use“),
- Verminderung der schädlichen Auswirkungen von Abfall auf Umwelt und Gesundheit,
- Mehrwegsysteme (Gebinde und Transportverpackungen).

Unter *qualitativer Abfallvermeidung* versteht man die Vermeidung oder den Ersatz (*Substitution*) gefährlicher Materialien oder Zusatzstoffe (z.B. Additive in Kunststoffen). Hier ist v.a. das *Produkt-/Materialdesign* (Öko-Design) gefragt, wodurch ein Produkt z.B. besser repariert bzw. die Produktnutzungsdauer (Lebensdauer) verlängert werden kann, was auch zur quantitativen Abfallvermeidung beiträgt. Oder ein Material/Produkt, das zu Abfall wurde (dessen man sich entledigt hat), hätte zuvor verbrannt werden müssen (um z.B. organische Schadstoffe zu zerstören) und kann nun, durch verbessertes Design, wieder recycelt werden. Hierunter fällt auch die *Verminderung der schädlichen Auswirkungen von Abfall auf Umwelt und Gesundheit*.

*Quantitative Abfallvermeidung* bedeutet, dass ein bestimmtes Material/Produkt in geringeren Mengen als Abfall anfällt. Beispielsweise kann die Einsparung von Kunststoffverpackungen im Lebensmittelbereich das Abfallaufkommen reduzieren. Wird stattdessen aber Karton eingesetzt, steigt das Abfallaufkommen in einem anderen Abfallstrom.

Unter *Wiederverwendung (Re-use)* versteht man den Einsatz des Materials/Produkts durch eine neue Besitzerin/einen neuen Besitzer (z.B. Second Hand, Weitergabe über Onlineplattformen) oder durch die gleiche Besitzerin/den gleichen Besitzer (z.B. nach einer Reparatur), bevor das Produkt überhaupt zu Abfall geworden ist (im Sinne des subjektiven Abfallbegriffes). Letzteres ist der Fall, wenn beispielsweise beim Einkaufen ein Kunststofftragbeutel öfter genutzt und nicht nach der ersten Verwendung sofort entsorgt wird. Auch im Handel oder in der Gastronomie können derartige Abfallvermeidungsmaßnahmen gesetzt werden. So sollen in Zukunft wieder häufiger *Mehrwegsysteme* zum Einsatz kommen (v.a. bei Transportverpackungen und Großgebunden) und zunehmend auch Mehrwegtransportpaletten (Kunststoffpaletten) oder Mehrwegkunststoffkanister verwendet werden.

#### 5.3.4.2 Vorbereitung zur Wiederverwendung (2. Ebene)

Mit dieser Ebene beginnt die „klassische“ Abfallbehandlung. Ab hier handelt es sich um Güter/Sachen, die (im rechtlichen Sinne) bereits zu Abfall geworden sind. Das heißt, sie wurden bei (kommunalen) Abfallsammelzentren (z.B. Mistplätzen der MA 48) oder anderen autorisierten Sammelstellen/-behältern etc. abgegeben (die Entledigungsabsicht der Endkonsumentin/des Endkonsumenten wurde bereits schlagend). Die Vorbereitung zur Wiederverwendung erfordert meist einen Prozessschritt der Aufbereitung und ist somit mit einem Energie- und Ressourcenaufwand verbunden. Unter diesen Punkt fällt z.B. die Reinigung einer Sache (z.B. Altkleider) oder die Funktionsfähigkeitsprüfung und Reparatur (z.B. von Elektroaltgeräten oder von einzelnen Bestandteilen). Dabei werden die aufbereiteten Sachen bzw. die Bauteile meist wieder für denselben Verwendungszweck eingesetzt wie in der bestimmungsgemäßen Erstnutzung (oft auch als Produktrecycling bezeichnet).

#### 5.3.4.3 Stoffliches Recycling (3. Ebene)

Die dritte Ebene der Abfallhierarchie nimmt das stoffliche Recycling ein, welches auch als werkstoffliches oder „Materialrecycling“ bezeichnet wird, da werkstoffliche bzw. Materialeigenschaften erhalten bleiben. Im rechtlichen Sinne versteht man unter „Recycling“ generell alle Verwertungsverfahren, die Abfallmaterialien zu Produkten, Sachen oder Stoffen aufwerten. Diese können sowohl dem ursprünglichen Zweck oder anderen Verwendungen zugeführt werden (sinngemäß § 2 Abs. 4.7 AWG 2002). Auch die Verwertung von organischen Materialien (z.B. die Kompostierung von getrennt erfasstem Biomüll) fällt unter die Recyclingverfahren dieser Ebene. In Fallbeispiel 5.3.1 wird das werkstoffliche Recycling von PET-Flaschen dargestellt.

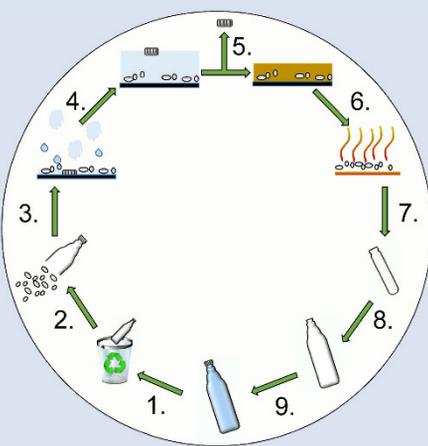
**Fallbeispiel 5.3.1: Werkstoffliches Recycling von Kunststoffen anhand von PET**  
(nach Veolia 2019)

Polyethylenterephthalat (PET) ist ein Copolymer. Es besteht aus den Monomeren Terephthalat und Ethylenglycol und zählt zu den sogenannten Polyestern, da die Monomere durch Esterbindungen verkettet sind. PET ist ein Thermoplast und eignet sich daher für werkstoffliches Recycling. Das Material weist viele physikalisch-chemische Eigenschaften auf, die es für die Verarbeitung zu Folien, Sichtfenstern und insbesondere zu Getränkeflaschen auszeichnen.

PET wird heutzutage in West- und Mitteleuropa schon größtenteils „Bottle to Bottle“ recycelt (siehe Abbildung 5.3.3). In Österreich wird die getrennte Sammlung von Kunststoffverpackungen (darunter auch PET-Flaschen) gemäß der Verpackungsverordnung 1996 und dem Abfallwirtschaftsgesetz 2002 von genehmigten Sammel- und Verwertungssystemen für Verpackungen durchgeführt. Dies geschieht im Rahmen der sogenannten erweiterten Produzentenverantwortung, die Herstellerinnen und Hersteller, Importeurinnen und Importeure, Abpackerinnen und Abpacker sowie Vertreterinnen und Vertreter von Verpackungen in Österreich (und in der EU) verpflichtet, die von ihnen in Verkehr gesetzten Verpackungen wieder zurückzunehmen. Sie können aber auch Gebühren an genehmigte Sammelsysteme entrichten (finanzielle Entpflichtung), die dann für sie die Sammlung und Verwertung der Verpackungen durchführen. Mit Jahresbeginn 2019 waren in Österreich sieben derartige Systeme für die Sammlung von Haushaltsverpackungen gemeldet. Die möglichst sortenrein erfassten PET-Flaschen werden an Recyclingunternehmen (z.B. „PET to PET Recycling Österreich GmbH“) übergeben, wo in mehreren Aufbereitungsschritten wieder lebensmitteltaugliche PET-Vorformen hergestellt und an die Getränkeindustrie weitergegeben werden.

Der Kreislauf beginnt bei der sachgerechten Entsorgung der leeren PET-Flaschen durch die Konsumentinnen und Konsumenten (1. Schritt). In einem 2. Schritt werden die Flaschen gesammelt und vorsortiert, um Fremdkörper zu entfernen, und danach nach Farben sortiert. In komprimierten Ballen werden die Flaschen in das Recyclingwerk gebracht, wo sie zunächst gesiebt werden, um kleinere Teile (z.B. Kappen) abzutrennen. Dann werden sie in einer Mühle zu sogenannten Flakes zerkleinert. Im 3. Schritt werden diese mit heißem Wasser und einem Laugenzusatz gewaschen, um sie von Schmutzpartikeln, Getränkerückständen sowie Etiketten zu befreien. Mithilfe des Schwimm-Sink-Verfahrens wird im 4. Schritt PET von PP, das üblicherweise für Getränkeverschlüsse verwendet

wird, und anderen Kunststoffen, die eine geringere Dichte aufweisen, getrennt. Das so gewonnene PP kann in einem separaten Kreislauf wieder zu Verschlüssen recycelt werden. Nachdem die PET-Flakes getrocknet wurden, entfernt man mithilfe eines Windsichters weitere leichte Materialien wie Folien oder Etiketten. Die fertigen Flakes werden als „Washed Flakes“ bezeichnet und können für Anwendungen außerhalb der Lebensmittelindustrie verarbeitet werden. Um PET in jener Qualität erzeugen zu können, die für Lebensmittelverpackungen erforderlich ist, werden die „Washed Flakes“ im 5. Schritt mit Natronlauge benetzt. Natronlauge hydrolysiert die Polymerkette und löst bei kurzzeitiger Anwendung eine geringe Schicht der Oberfläche der PET-Flakes auf (Peelingeffekt). Man erhält eine „frische“ Oberfläche, die zuvor noch nicht mit anderen Substanzen in Kontakt war.



**Abbildung 5.3.3: Vereinfachte Darstellung des PET-Kreislaufes für Getränkeflaschen**

Nachdem das Material getrocknet ist, wird es im 6. Schritt in einem großen Drehrohrföfen unter Vakuum leicht erwärmt, wodurch hauptsächlich flüchtige Verbindungen (Geruchs- und Geschmacksstoffe) entfernt werden. Im Anschluss werden die Flakes gewaschen und getrocknet und als CleanPET® FK bezeichnet. Aus einer Tonne Abfall-PET-Flaschen können etwa 750 – 800 kg lebensmitteltaugliche Recycling-Flakes gewonnen werden. Diese bilden einen Sekundärrohstoff und müssen teilweise noch mit Primärrohstoffen, die zum ersten Mal verarbeitet werden, gemischt werden. Mittlerweile gibt es bereits Produkte, die die Beimischung von primären PET nicht mehr benötigen. Diese Flakes werden noch im Werk durch das Spritzgussverfahren zu PET-Rohlingen verarbeitet und dann an die Getränkeherstellerinnen und -hersteller geliefert (7. Schritt). Dort werden die Rohlinge durch das Streckblasverfahren zu Flaschen geformt, abgefüllt (8. Schritt) und gelangen über den Handel wieder zu den Konsumentinnen und Konsumenten (9. Schritt), bei denen sich der Kreislauf schließt.

### **Fallbeispiel 5.3.2: Umgang mit biologisch abbaubaren Kunststoffen**

Biologisch abbaubare Kunststoffe können ebenso wie nichtabbaubare Kunststoffe entsprechend ihren Eigenschaften stofflich und thermisch verwertet werden. Bei abbaubaren Kunststoffen steht allerdings eine weitere Behandlungsoption über die Kompostierung offen, wo Kunststoffe durch Mikroorganismen (wie Pilze und Bakterien) abgebaut werden. In Österreich zählt die Kompostierung rechtlich zu den Recyclingverfahren. Im Falle von biologisch abbaubaren Kunststoffen ist sie aber eher als Entsorgungsweg und nicht als Verwertung zu sehen. Da das Material vollständig mineralisiert werden sollte, d.h. größtenteils zu CO<sub>2</sub> und Wasser abgebaut wird, trägt es nach derzeitigem Wissensstand nicht zum Huminstoffaufbau im Kompost bei und liefert auch sonst keine wertgebenden Substanzen.

Wenn überhaupt, dann sollten nur nachweislich (zertifizierte) abbaubare Kunststoffe Eingang in eine Kompostierung finden. Die ÖNORM EN 13432 (Austrian Standards International 2008) beschreibt, ob ein Kunststoff biologisch abbaubar und kompostierbar ist. Das Prüfmateriale muss jede der vier Stufen bestehen. Die Zertifizierung gilt für die untersuchte Materialzusammensetzung und die geprüfte Materialdicke sowie für dünnere Materialien.

Die erste Stufe prüft die Materialzusammensetzung mittels chemischer Analyse, bei der mögliche Schwermetalle und andere Schadstoffe identifiziert werden sollen.

Die zweite Stufe sieht die biologische Abbaubarkeit des Materials in einer Rotte bei Komposttemperaturen von mindestens 58 °C unter optimalen Rahmenbedingungen vor. Über einen Zeitraum von 6 Monaten müssen dabei 90% des Materials im Vergleich zum Referenzmaterial (Zellulose) abgebaut sein.

Die dritte Stufe prüft den Zerfall des Materials in kleinere Fragmente (Desintegration). Dabei wird das Material über einen Zeitraum von 3 Monaten unter „realitätsnahen“ Bedingungen kompostiert. Die Feststoffe im Kompost werden durch ein Sieb mit 2 mm Maschenweite getrennt und auf Kunststoffpartikel geprüft. In der Fraktion dürfen noch 10% der Eingangsmasse aufscheinen.

In der vierten Stufe vergleicht man mithilfe eines Ökotoxizitätstests das Pflanzenwachstum auf der mit dem Kunststoff angereicherten Kompostprobe mit einem Vergleichskompost ohne Kunststoff. Die Prüfung gilt als bestanden, wenn der Kunststoff keinen negativen Einfluss auf das Wachstum hat.

Da die Norm hohe Temperaturen von mindestens 58 °C über einen Zeitraum von 6 Monaten voraussetzt, wird auf Bedingungen geprüft, die, wenn überhaupt, nur in (technischen) industriellen Kompostanlagen erreicht werden. Materialien, die die Norm erfüllen, können grundsätzlich biologisch abgebaut werden, geprüft wird aber nicht, wie lange es dauert, bis der Kunststoff unter weit mildereren Umweltbedingungen (z.B. im Wasser, im Boden, im Komposthaufen zu Hause (Heimkompostierung)) mineralisiert ist.

### 5.3.4.4 Sonstige Verwertung (4. Ebene)

Die vierte Ebene der Maßnahmenhierarchie wird als sonstige Verwertung bezeichnet und unterscheidet zwischen stofflicher und allgemeiner Verwertung. Stoffliche Verwertung meint z.B. die Verfüllung, Rekultivierung und Verwendung von Abfall als Porosierungsmittel in der Ziegelherstellung. Die Materialien können sehr heterogen sein und müssen keine besonderen Eigenschaften aufweisen. Auch die rohstoffliche Verwertung von Kunststoffabfällen fällt in diese Ebene. Dabei werden die Polymerketten durch das Einwirken von Wärme zu Monomeren gespalten, die als petrochemische Grundstoffe und zur Herstellung neuer Kunststoffe eingesetzt werden können. Bei der rohstofflichen Verwertung können stark verunreinigte und sehr heterogene Altkunststoffe (Mischungen aus Abfällen unterschiedlicher Kunststoffarten wie auch Verbundmaterialien) wieder einer höherwertigen stofflichen Verwertung zugeführt werden. Beispiele für rohstoffliche Verwertungsverfahren sind Vergasung, Cracking, Hydrierung oder auch der Einsatz von Kunststoffen als Reduktionsmittel in Hochofenprozessen.

Eine weitere Art der sonstigen Verwertung ist die *thermische* oder *energetische Verwertung*. Darunter versteht man die Verwendung von Abfällen als Ersatzbrennstoffe zur Energiegewinnung. Einerseits kann der Kunststoffanteil im gemischten Siedlungsabfall (Restmüll) energetisch in Abfallverbrennungsanlagen genutzt, andererseits sortierte und aufbereitete Kunststofffraktionen auch gezielt als Ersatzbrennstoff in der Industrie (z.B. in Zementwerken) eingesetzt werden.

### 5.3.4.5 Beseitigung (5. Ebene)

Die fünfte Ebene der Abfallhierarchie ist die Beseitigung. Diese umfasst die Verbrennung von Abfällen ohne entsprechende Energienutzung (z.B. als thermische Abfallvorbehandlung vor einer Deponierung), die Vorbehandlung in mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen (MBA) sowie die Deponierung. In Österreich ist die direkte Deponierung von Kunststoffen seit 2004 de facto verboten (DVO 1996 bzw. 2008). Abfälle müssen gewisse Grenzwerte einhalten, damit sie auf bestimmten Deponietypen abgelagert werden dürfen; z.B. einen TOC-Gehalt (Total Organic Carbon = gesamter organischer Kohlenstoffgehalt) von < 5% in der Trockenmasse des Abfalls bzw. bei gewissen Deponietypen auch einen bestimmten Brennwert (< 6.600 kJ/kg Trockenmasse). Diese Grenzwerte können bei Kunststoffabfällen nicht eingehalten werden. Kunststoffabfälle werden daher in Österreich entweder thermisch behandelt oder getrennt erfasst (getrennt gesammelt, z.B. gelber Sack, Hohlkörpersammlung; aus gemischten Siedlungsabfällen aussortiert) und anschließend einer stofflichen Verwertung (3. Ebene) zugeführt.

Kunststoffabfälle und -verpackungen, die nicht getrennt erfasst werden, verbleiben im Restmüll (gemischte Siedlungsabfälle). Dieser wird in Österreich vorwiegend in Müllverbrennungsanlagen behandelt, die meist über einen entsprechenden energetischen Nutzungsgrad verfügen (4. Ebene). Geschieht die thermische Behandlung ohne entsprechende Ausnutzung der Energie, ist diese Maßnahme der 5. Ebene zuzuordnen. Gelangt der Restmüll in eine MBA-Anlage, wird ein Großteil des Kunststoffes im ersten Schritt mechanisch aussortiert (z.B. abgesiebt) und kommt als heizwertreiche Fraktion meist in die industrielle Mitverbrennung (dies stellt dort eine Substitution von Primärenergieträgern dar (4. Ebene)). Auch biologisch abbaubare Kunststoffabfälle im Restmüll werden in Österreich entweder thermisch behandelt oder in einer MBA-Anlage – sofern diese nicht im mechanischen Schritt mit der heizwertreichen Fraktion abgetrennt werden – voraussichtlich größtenteils im zweiten Schritt der MBA, der biologischen Behandlung (d.s. technisch forcierte Abbauprozesse durch Mikroorganismen) abgebaut.

Zuletzt werden die Rückstände aus diesen Behandlungsverfahren (Verbrennungsrückstände wie Aschen und Schlacken oder das stabilisierte Outputmaterial aus einer MBA, das noch Reste an Kunststoffen enthalten kann) möglichst reaktionsarm auf Deponien abgelagert.

2018 wurden in Österreich nur 1% der Kunststoffabfälle deponiert (v.a. Rückstände aus der Abfallvorbehandlung wie MBA), 26% recycelt und 73% verbrannt (40% davon energetisch verwertet) (Van Eygen et al. 2018). Welche Art der Verwertung und Behandlung von spezifischen Kunststoffabfällen ökologisch sinnvoll ist, hängt von unterschiedlichen Rahmenbedingungen ab und wird zunehmend mithilfe der Methode der Ökobilanzierung (Life-Cycle-Assessment) umfassend untersucht und bewertet.

### *5.3.5 Makro- und Mikrokunststoffe in der Umwelt – ein abfallwirtschaftliches Problem?*

Schätzungen zufolge werden weltweit 32% der produzierten und in Verkehr gesetzten Kunststoffverpackungen nicht in abfallwirtschaftlichen Systemen erfasst und gelangen unkontrolliert in die Umwelt (Böden, Oberflächengewässer etc.) (Ellen MacArthur Foundation und McKinsey & Company 2016). Zudem schätzt die EU, dass weltweit jedes Jahr etwa 5 bis 13 Mio. t Kunststoffe in die Weltmeere eingetragen werden, das sind 1,5 bis 4 % der weltweiten Kunststoffproduktion (EU COM 2018b). Diese sind für die Kreislaufwirtschaft verloren und gefährden globale Ökosysteme. Konventionelle Kunststoffe weisen nur eine sehr geringe Zersetzungsrates auf und werden daher in der Umwelt angereichert. Die offensichtlichsten Anzeichen der globalen Umweltverschmutzung durch Kunststoffe sind große ozeanische „Müllinseln“. Diese

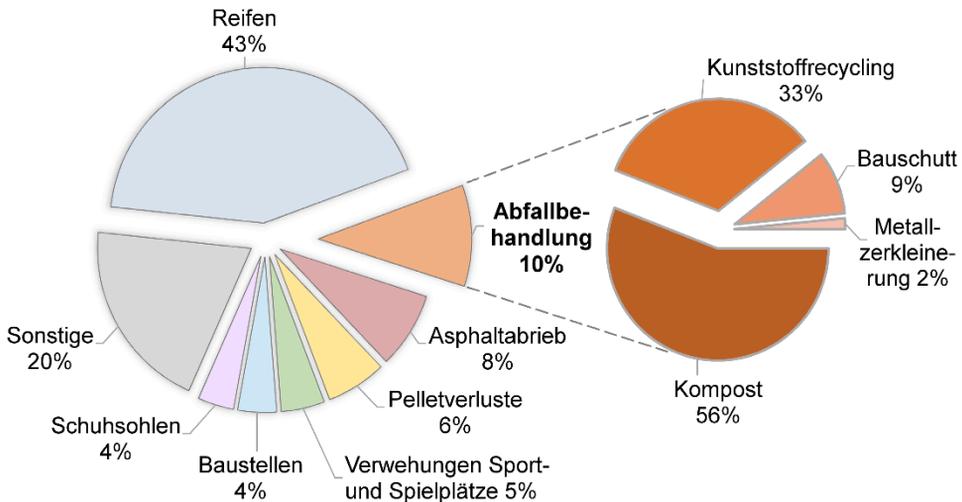
offenbaren aber nur einen kleinen Teil der tatsächlichen Verschmutzung, da nur jene Kunststoffe an der Oberfläche der Meere schwimmen, die eine geringe Dichte aufweisen, und viele Objekte zu klein sind (d.h. für das menschliche Auge unsichtbar). Erkennbare „große“ Kunststoffe werden als *Makrokunststoffe* bezeichnet. Lange Zeit vernachlässigt wurden *Mikrokunststoffe*. Das sind Objekte mit Durchmessern kleiner als 5 mm. Die Europäische Kommission (EU COM 2018b) schätzt, dass in der EU pro Jahr etwa 75.000 bis 300.000 t Mikroplastik unkontrolliert in die Umwelt freigesetzt werden. Nach neuester Betrachtungsweise ist es sinnvoll, Kunststoffe mit einem Durchmesser kleiner 100 nm als *Nanokunststoffe* zu klassifizieren, da Materialien in diesem Größenbereich in der Umwelt besondere Eigenschaften und Wirkungsweisen zeigen (Gigault 2018). Da mit geringer werdender Größe der instrumentelle Aufwand zur Charakterisierung und Quantifizierung von Kunststoffen steigt, ist das Wissen um *Mikroplastik-* und *Nanoplastikpartikel* in der Umwelt noch sehr eingeschränkt.

Mikrokunststoffe werden nach ihrer Entstehung unterteilt:

- *Primäres Mikroplastik* wird bei der Entstehung eines Produktes (absichtlich) hergestellt. Man unterscheidet zwischen Typ A und B. Typ A liegt als Produkt in „Mikrogröße“ vor (z.B. Kunststoffpellets, Peelingmittel etc.). Typ B wird erst während der Nutzungsphase in Form von Mikrokunststoffen emittiert (z.B. Reifenabrieb, Faserverlust von Funktionswäsche etc.).
- *Sekundäres Mikroplastik* entsteht durch Verwitterung und Fragmentierung von Makroplastik in der Umwelt.

Diese Einteilung erlaubt es, Vermeidungsmaßnahmen für die unterschiedlichen Mikrokunststofftypen abzuleiten. *Sekundäres Mikroplastik* kann über Vermeidung des *Litterings* von Makroplastik und die Installation von Rückhalte- und geeigneten Abfallwirtschaftsmaßnahmen reduziert werden. Bei der Entstehung von primärem Mikroplastik müssen v.a. die Emissionsquellen berücksichtigt werden. Abbildung 5.3.4 verdeutlicht, dass die größten Mikroplastikemissionen aus dem Straßenverkehr stammen und sich hauptsächlich aus dem Reifen- (43%) sowie dem Asphaltabrieb (8%) zusammensetzen (Bertling et al. 2018). Die zweitgrößte Quelle ist mit 10% die Abfallbehandlung. Hierbei wurde die Kompostierung bzw. die Ausbringung von Komposten als größte Quelle für Mikroplastik identifiziert, gefolgt vom Kunststoffrecycling. Während beim Kunststoffrecycling Mikroplastik primär bei der Zerkleinerung der angelieferten Kunststoffabfälle anfällt und die Entstehung lokal begrenzt ist, verhält sich die Situation beim Kompost etwas komplexer und ist noch nicht vollständig geklärt. Eine weitere Studie, in der die Behandlung von Bioabfall aus Haushalten jener von landwirtschaftlichen Rückständen gegenübergestellt wurde, zeigte, dass Mikroplastik in den untersuchten Komposten hauptsächlich durch Kunststoffkontamina-

tionen aus den Haushalten stammt (Weithmann et al. 2018). Der Biomüll wird nach der Anlieferung und während der Kompostierung bestmöglich von Kontaminationen befreit. Im fertigen Kompost wird derzeit ein Kunststoffanteil von 0,1% in der Trockenmasse akzeptiert.



**Abbildung 5.3.4: Mikrokunststoffe aus unterschiedlichen Emissionsquellen**  
(Abschätzung anhand von Literaturstudien: Bertling et al. 2018, Juni)

Um die Akkumulation von Makro- und Mikrokunststoffen in der Umwelt zu reduzieren, bedarf es Maßnahmen in allen Lebensphasen von Kunststoffprodukten (Produktions-, Nutzungs- und End-of-Life-Phase), einer Forcierung der Kreislaufwirtschaft sowie der Reduktion des Kunststoffverbrauchs, beispielsweise durch Substitutionsprodukte (Bertling et al. 2018). Um die durch den acht- und sorglosen Umgang mit Kunststoffprodukten bzw. -abfällen entstandenen Umweltprobleme zu reduzieren und Kunststoffprodukte, allen voran Verpackungsmaterialien, besser kreislauffähig zu machen, fordert die Europäische Kommission im „Circular Economy Package“ (Kreislaufwirtschaftspaket; EU COM 2018a) die Erhöhung der Recyclingquoten für Kunststoffverpackungen in den EU-Mitgliedsstaaten bis zum Jahr 2030 von derzeit geforderten 22,5% auf 55% und macht weitere Vorgaben für den Umgang mit Kunststoffen in der EU, so z.B. in der Kunststoffstrategie (EU COM 2018b) und in der Richtlinie über Einwegkunststoffe (Richtlinie (EU) 2019/904), die v.a. auf die Vermeidung und Verringerung von Kunststoffabfällen im Meer abzielt. Sie enthält Vorgaben zu signifikanten Verbrauchsminderungen in allen EU-Staaten (z.B. Lebensmittelverpackungen, Getränkebecher inklusive Verschlüsse/Deckel) bis zum Jahr 2026 sowie ein Verbot von bestimmten Einwegkunststoffen (voraussichtlich ab 2021).

### 5.3.6 Zusammenfassung

Die Abfallwirtschaft beschäftigt sich mit der Vermeidung, Verwertung und Behandlung von Abfällen mit dem Ziel, diese – wenn sie nicht vermieden werden können – im Sinne der Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung möglichst wieder zu verwenden oder hochwertig zu verwerten und als Sekundärrohstoffe im Kreislauf zu führen. Nicht mehr verwertbare (z.B. kontaminierte) Abfälle müssen im Sinne des Vorsorgeprinzips ohne Gefährdung für Mensch, Tier und Umwelt entsorgt (z.B. thermisch behandelt und deponiert) werden. Der Abfallwirtschaft spielt hierbei eine wesentliche Rolle zur Erreichung mehrerer SDGs. Die von der EU vorgegebene Abfallmaßnahmenhierarchie regelt die logische Abfolge von Maßnahmen zur sicheren und ressourcenschonenden Abfallbehandlung. Oberste Priorität hat hierbei die Vermeidung von Abfällen.

Kunststoffmaterialien werden in vielen und v.a. in kurzlebigen Alltagsgegenständen eingesetzt (z.B. in Kunststoffverpackungen). Der nachlässige und unsachgemäße Umgang damit führt zu ernsthaften Umweltauswirkungen (Mikroplastik in Böden und Gewässern, Müllteppich in den Meeren, Ressourcenverbrauch). Der Abfallwirtschaft kann darin eine Schlüsselrolle zukommen, durch gezielte abfallwirtschaftliche Maßnahmen diesen negativen umwelt- und gesellschaftsrelevanten Entwicklungen entgegenzuwirken. Kunststoffprodukte sind am Ende des Produktlebenszyklus einer sicheren und ressourcenschonenden Verwertung zuzuführen. Diese kann in Form von Re-use (Produktrecycling, 2. Ebene), werkstofflich (3. Maßnahmenebene), rohstofflich oder energetisch (4. Maßnahmenebene) erfolgen. Eine wesentliche Voraussetzung für die zielgerichtete Verwertung ist die Kenntnis der chemischen Zusammensetzung und thermomechanischen Eigenschaften der Kunststoffe. Welche Art der Verwertung für bestimmte Kunststoffabfälle ökologisch sinnvoll ist, kann mithilfe der Methode der Ökobilanzierung (Life-Cycle-Assessment) umfassend untersucht und bewertet werden. Derzeit sind es aber vorwiegend wirtschaftliche Überlegungen, die für die Wahl des Verwertungs- oder Behandlungsweges ausschlaggebend sind. Zielgerichtete gesetzliche Rahmenbedingungen und konkrete Vorgaben, wie z.T. im Kreislaufwirtschaftspaket der EU gefordert, unterstützen das Etablieren einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft und tragen auch zur Erreichung der SDGs bei.

## Literatur

- Abfallrahmenrichtlinie (2008): Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien. Abl L 312/2008, 3. Verfügbar in: <http://data.europa.eu/eli/dir/2008/98/oj> [Abfrage am 13.5.2019].
- Austrian Standards International (2008): ÖNORM EN 13432. Verpackung – Anforderungen an die Verwertung von Verpackungen durch Kompostierung und biologischen Abbau. Prüfschema und Bewertungskriterien für die Einstufung von Verpackungen (konsolidierte Fassung). Wien.

- AWG (2002): Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft (Abfallwirtschaftsgesetz 2002). BGBl. I Nr. 102/2002, i.d.F. Juli 2019, zuletzt geändert mit BGBl. I Nr. 71/2019. Verfügbar in: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20002086> [Abfrage am 30.7.2019].
- Bertling, J., Bertling, R. und Hamann, L. (2018): Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik. Ursachen, Mengen, Umweltschicksale, Wirkungen, Lösungsansätze, Empfehlungen. Kurzfassung der Konsortialstudie. Oberhausen: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT. <http://dx.doi.org/10.24406/UMSICHT-N-497117>.
- DVO (1996): Verordnung des Bundesministers für Umwelt über die Ablagerung von Abfällen (Deponieverordnung). BGBl. Nr. 164/1996. Verfügbar in: [https://www.ris.bka.gv.at/Dokumente/BgblPdf/1996\\_164\\_0/1996\\_164\\_0.pdf](https://www.ris.bka.gv.at/Dokumente/BgblPdf/1996_164_0/1996_164_0.pdf) [Abfrage am 20.7.2019].
- DVO (2008): Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Deponien (Deponieverordnung 2008 – DVO 2008). i.d.F. Okt. 2016, zuletzt geändert mit BGBl. II Nr. 291/2016. Verfügbar in: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20005653> [Abfrage am 13.5.2019].
- Ellen MacArthur Foundation and McKinsey & Company (2016): The New Plastics Economy – Rethinking the Future of Plastics. Available at: <http://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications> [accessed 1.4.2019].
- EU COM (European Commission) (2018a): Circular Economy Package – Implementation of the Circular Economy Action Plan. Available at: [http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/index_en.htm) [accessed 1.4.2019].
- EU COM (Europäische Kommission) (2018b): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen „Eine europäische Strategie für Kunststoffe in der Kreislaufwirtschaft“. COM(2018) 28 final. Brüssel. Verfügbar in: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX%3A52018DC0028> [Abfrage am 1.4.2019].
- Fankhauser-Noti, A. and Grob, K. (2006): Migration of plasticizers from PVC gaskets of lids for glass jars into oily foods: Amount of gasket material in food contact, proportion of plasticizer migrating into food and compliance testing by simulation. Trends in Food Science & Technology, 17, 3, 105–112. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2005.10.013>.
- Gigault, J., Ter Halle, A., Baudrimont, M., Pascal, P.-Y., Gauffre, F., Phi, T.-L., El Hadri, H., Grassl, B., and Reynaud, S. (2018): Current opinion: What is a nanoplastic? Environmental Pollution, 235, 1030–1034. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.024>.
- PlasticsEurope (2017): Plastics – the facts: An analysis of European plastics production, demand and waste data. Available at: <https://www.plasticseurope.org/en/resources/publications/274-plastics-facts-2017> [accessed 1.4.2019].
- Richtlinie über Einwegkunststoffe (2019): Richtlinie (EU) 2019/904 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. Juni 2019 über die Verringerung der Auswirkungen bestimmter Kunststoffprodukte auf die Umwelt. Abl L 155/2019, 1. Verfügbar in: <http://data.europa.eu/eli/dir/2019/904/oj> [Abfrage am 20.7.2019].
- Thompson, R. C., Moore, C. J., vom Saal, F. S., and Swan, S. H. (2009): Plastics, the environment and human health: current consensus and future trends. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 364, 1526, 2153–2166. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0053>.
- Van Eygen, E., Laner, D., and Fellner, J. (2018): Circular economy of plastic packaging: current practice and perspectives in Austria. Waste Management, 72, 55–64. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.11.040>.
- Veolia (Veolia Umweltservice PET Recycling GmbH) (s.a.): PET-Kreislauf – URRC-Verfahren. Verfügbar in: <http://www.recypet.ch/urrc/> [Abfrage am 1.4.2019].
- Weithmann, N., Möller, J. N., Löder, M. G. J., Piehl, S., Laforsch, C., and Freitag, R. (2018): Organic fertilizer as a vehicle for the entry of microplastic into the environment. Science Advances, 4, eaap8060. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aap8060>.

## 5.4 Verkehr und Mobilität im Wandel

*Astrid Gühnemann*

*Institut für Verkehrswesen,*

*Department für Raum, Landschaft und Infrastruktur (RALI)*

*[astrid.guehnemann@boku.ac.at](mailto:astrid.guehnemann@boku.ac.at)*

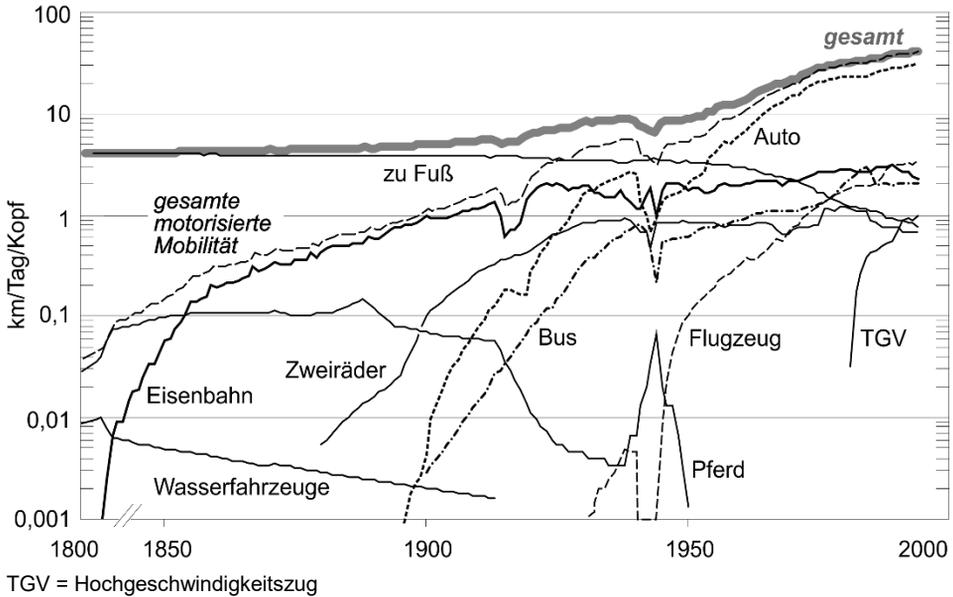
### 5.4.1 Historische Entwicklung der Verkehrssysteme

Um die Grundbedürfnisse der Menschen – wie die Versorgung mit Nahrung oder sozialer Kontakt – erfüllen zu können, müssen Menschen bewegt oder Waren ausgetauscht werden. Die Geschichte des Verkehrs ist daher so alt wie die der Menschheit. Größere Mengen an Waren wurden zuerst mit Schiffen über lange Distanzen v.a. an den Küsten und später auch auf Flüssen befördert. Die ersten großen, internationalen Handelswege, die Tee- und Seidenstraßen, führten von China bis zum Schwarzen Meer. Mit der Erfindung des Rades wurde der Bau von Straßen mit festen Belägen unerlässlich. Erste Straßenbauten sind aus dem alten China bekannt (ca. 2700 v. Chr.). Zentralistische Staaten des Altertums wie Griechenland und das Römische Reich verfügten über ein ausgedehntes Straßennetz, das die Entfaltung ihrer Reiche überhaupt erst ermöglichte. Die industrielle Revolution führte durch technologische Innovationen innerhalb kurzer Zeit zu tiefgreifenden Veränderungen, die bis heute unsere Mobilität<sup>1</sup> und auch die Verkehrsplanung prägen. Bedeutend waren die Erfindung der Dampfmaschine und die Eröffnung der ersten Dampfeisenbahnstrecken in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts sowie die Erfindung des Automobils Ende des 19. Jahrhunderts und erster Motorflugzeuge Anfang des 20. Jahrhunderts (Schmitz 2013).

Die flächendeckende Verkehrserschließung und die unmittelbare Verfügbarkeit des Automobils revolutionierten die Fortbewegungsmöglichkeiten und infolgedessen auch die Stadt- und Verkehrsplanung. Das Verkehrssystem der westlichen Länder ist durch eine stark wachsende Motorisierung im letzten Jahrhundert geprägt. Diese erlaubte es, in immer kürzerer Zeit immer weitere Distanzen zu überwinden (siehe Abbildung 5.4.1).

---

<sup>1</sup> Der Begriff Mobilität wird hier im Sinne der Möglichkeit der Bewegung von Personen und Gütern (Beweglichkeit) und der Begriff Verkehr als realisierte Ortsveränderung verwendet (siehe auch Holz-Rau 2009, S. 797).



**Abbildung 5.4.1:** Entwicklung von Verkehrsmitteln und Reisedistanzen in Frankreich von 1800 bis 2000 (Grübler 1990, S. 232, modifiziert; aus Grübler 1998, S. 318, übersetzt)

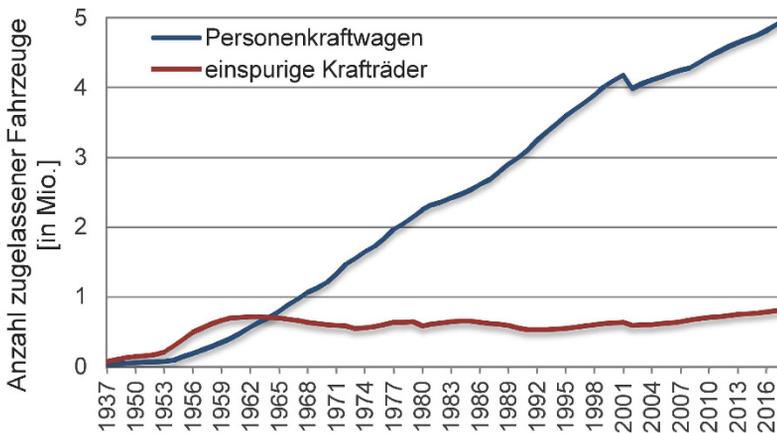
### 5.4.2 Verkehrsnetze und -entwicklung in Österreich

Historisch betrachtet, wurde die Verkehrsinfrastruktur in Österreich ausgebaut, um Agglomerationsräume und größere Siedlungsgebiete besser zu verbinden. Zur Stärkung des Wirtschaftsstandorts Österreich sollten v.a. die Erreichbarkeiten im Pendler-, Berufs- und Güterverkehr verbessert werden (vgl. Herry et al. 2012). Aufgrund der Topographie Österreichs sind die Verkehrswege großteils in wenigen Tälern und Pässen gebündelt. Die Raumstruktur kann so als „Modell der zentralen Peripherie“ beschrieben werden (Lichtenberger 2001), in dem das Zentrum des Landes deutlich schlechter über hochrangige Infrastrukturen (d.s. Autobahnen, Schnellstraßen oder Fernbahnen) erreichbar ist als die peripheren, grenznahen Gebiete.

Die Gesamtnetzlänge des österreichischen Straßennetzes betrug 2018 über 130.000 km, wovon weniger als 2% auf das hochrangige Straßennetz, ca. 26% auf Landesstraßen und 72% auf Gemeindestraßen entfallen (BMVIT 2019). Österreich verfügt mit durchschnittlich 1,7 km Straße/km<sup>2</sup> über eines der dichtesten Straßennetze weltweit (Meijer et al. 2018). Demgegenüber betrug die Gesamtlänge des Schienennetzes (ohne Straßen- und U-Bahnen) im Jahr 2018 ca. 5.650 km (Statistik Austria 2018a). Vergleicht man Österreich und die Schweiz (zwei Länder mit ähnlicher Topographie), so weist die Schweiz im Jahr 2005 ein um ca. 25% dichteres Straßennetz und ein um

ca. 65% dichteres Schienennetz pro km<sup>2</sup> aus als Österreich (Moidl 2007). In Österreich wurde die Länge des hochrangigen Straßenverkehrsnetzes zwischen 1970 und 2011 von knapp 450 auf 2.185 km vervierfacht, während die Länge des Schienennetzes, trotz Ausbauten des Hochleistungsnetzes, um ca. 13% reduziert wurde (Herry et al. 2012).

Auch in Österreich stieg die Anzahl zugelassener Kraftfahrzeuge seit dem Ende des Zweiten Weltkriegs stetig an (siehe Abbildung 5.4.2). Wie in vielen Ländern begann die Massenmotorisierung mit einspurigen Krafträdern, die bei steigendem Wohlstand durch Personenkraftwagen (Pkw) ersetzt oder ergänzt wurden. Von 1995 bis 2014 nahm die Pkw-Verfügbarkeit in Österreich durchschnittlich von ca. 1 auf 1,24 Pkw pro Haushalt zu (Tomschy et al. 2016).



Der Rückgang in 2002 ist auf eine Umstellung der Statistik zurückzuführen.

**Abbildung 5.4.2: Entwicklung des Fahrzeugbestandes in Österreich von 1937 bis 2018** (Datenquelle: Statistik Austria 2019)

Mit zunehmender Motorisierung stieg auch die Verkehrsleistung<sup>2</sup> (inklusive Ziel- und Durchgangsverkehr) in Österreich zwischen 1990 und 2014 um ein Drittel von ca. 80 Mrd. Pkm auf ca. 110 Mrd. Pkm pro Jahr an (Umweltbundesamt 2016). Treiber dieses Verkehrswachstums waren neben der Motorisierung auch die gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und technologischen Entwicklungen, wie z.B. Bevölkerungswachstum, steigender Wohlstand, veränderte Arbeitsstrukturen, flexiblere und kürzere Arbeitszeiten, höhere Frauenerwerbstätigkeit, mehr und kleinere Haushalte, veränderte Raumstrukturen und Suburbanisierung sowie engere internationale Vernetzung u.a. durch Informations- und Kommunikationstechnologien (Verron et al.

<sup>2</sup> Verkehrsleistung (oder gelegentlich Verkehrsaufwand) bezeichnet im Verkehrswesen die pro Zeiteinheit von allen Personen, Waren oder Fahrzeugen zurückgelegten Distanzen. Sie wird in Personenkilometern (Pkm), Tonnenkilometern (tkm) oder Fahrzeugkilometern (Fz-km) pro Zeiteinheit, üblicherweise pro Jahr, gemessen.

2005). Gleichzeitig wurden viele dieser Entwicklungen durch die Massenverfügbarkeit des Pkw, geringere Transportkosten und verbesserte Infrastrukturnetze ermöglicht oder verstärkt, sodass hier starke Wechselwirkungen bestehen (siehe Fallbeispiel 5.4.1).

**Fallbeispiel 5.4.1: Treiber des Verkehrswachstums – Wechselwirkung zwischen Verkehrs- und Siedlungsentwicklung**

Die Zunahme des motorisierten Personenverkehrs ist eng an die Siedlungsentwicklung gekoppelt. Diese ist spätestens seit der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts stark durch Ein- und Zweifamilienhäuser geprägt, in denen die Wünsche moderner Gesellschaften nach großflächigem Wohnraum, eigenem Garten, ruhiger Wohnlage und nach Rückzugsmöglichkeit von der (teils selbst verursachten) Hektik des städtischen Lebens verwirklicht werden können (Kurath 2006). Gleichzeitig soll aber eine möglichst gute Erreichbarkeit der Arbeitsstätte sowie von Versorgungs- und Freizeiteinrichtungen sichergestellt werden. So sind Einfamilienhaussiedlungen für ihre Bewohnerinnen und Bewohner Ausgangspunkt für vielfältige Aktivitäten. Jedoch werden diese gerade aufgrund der massenhaften Verfügbarkeit von privaten Pkw auch weit entfernt ausgeübt bzw. es werden größere Distanzen in Kauf genommen.

Diese Entwicklung wurde durch gesellschaftliche und wirtschaftliche Entwicklungen wie steigende Konsumbedürfnisse, zunehmende Anzahl an Ein- bis Zweipersonenhaushalten, niedrige Benzinpreise, stärkere Arbeitsteilung und steigende Wohnkosten in Innenstädten sowie gleichzeitige steuerliche und raum- bzw. stadtplanerische Maßnahmen forciert (Hesse 1996). So wurde günstiger Baugrund v.a. in stadtnahen Randlagen auch zur Erzielung von Steuereinnahmen ausgewiesen und die Autonutzung z.B. durch Pendlerpauschalen und frei zur Verfügung gestellten Parkraum finanziell begünstigt. Noch zwischen 2010 und 2017 war ca. ein Drittel der neubewilligten Wohngebäude in Österreich Ein- bis Zweifamilienhäuser (Statistik Austria 2018b). Durch Bevölkerungswachstum, zunehmende Urbanisierung und höhere Ansprüche an die Qualität und Quantität von Wohnraum steigt zudem auch die Nachfrage nach Wohnraum in Städten und Stadt-Umland-Gemeinden (Umweltbundesamt 2016). Es ist daher davon auszugehen, dass das Einfamilienhaus auch in Zukunft eine beliebte Wohnform und für viele die Erfüllung eines Traums bleibt.

Eine Versorgung dieser Siedlungen mit öffentlichem Verkehr ist wegen der geringen Bevölkerungsdichte kostspielig, und Rad- und Fußverkehr sind meist aufgrund der großen Distanzen zu Versorgungseinrichtungen, der fehlenden sicheren Infrastrukturen und der eintönigen Umgebung wenig attraktiv (Schiller und Kenworthy 2018). Infolgedessen weisen Einfamilienhaussiedlungen eine sehr hohe Pkw-Abhängigkeit auf. Beispielsweise wird in den dicht besiedelten Innenstadtgebieten Wiens mehr als ein Drittel der Wege zu Fuß zurückgelegt, während der Fußwegeanteil in Einfamilienhausgebieten in städtischen Randlagen nur noch 21% beträgt (Heller und Schreiner 2015). Auch die motorisierte Verkehrsleistung pro Aktivität von Einwohnerinnen und Einwohnern in peripheren Lagen ist ca. 2–3 Mal so hoch wie jene von Einwohnerinnen und Einwohnern in verdichteten Kernbezirken (Tapeiner et al. 2002).

Der Anteil des mit öffentlichen oder nichtmotorisierten Verkehrsmitteln zurückgelegten Verkehrs an den Verkehrsleistungen Österreichs lag im Jahr 2014 bei etwa 29% (Umweltbundesamt 2016). Hierbei sind allerdings starke räumliche Unterschiede zu verzeichnen: So ist beispielsweise der Anteil der mit öffentlichen Verkehrsmitteln oder zu Fuß zurückgelegten werktäglichen Wege der Wienerinnen und Wiener mit

38% bzw. 25% deutlich höher als im Landesdurchschnitt (17% bzw. 18%) (Tomschy et al. 2016). Grund hierfür ist neben unterschiedlichen geographischen Gegebenheiten eine verkehrspolitische Mischung aus Anreiz- und Restriktionsmaßnahmen Wiens, wie der Ausbau und die günstige Tarifgestaltung des öffentlichen Verkehrs einerseits und die Parkraumbewirtschaftung durch Verknappung und Verteuerung andererseits (Klementsitz und Roider 2019). In anderen Großstädten Österreichs wurden dagegen günstigere Bedingungen für den Radverkehr geschaffen, sodass dort der Anteil an der Personenverkehrsleistung mit 5% höher liegt als im Landesdurchschnitt (Tomschy et al. 2016).

Im Jahr 2018 wurde im Luftverkehr Österreichs aufkommensstärkster Flughafen Wien-Schwechat von 27 Mio. Passagieren genutzt, und er bediente ca. 205 Destinationen in 71 Ländern. Im Zeitraum 2001 bis 2016 nahm die Zahl der Landungen und Abflüge um 22% zu (Statistik Austria 2018c). Der Flughafen Wien-Schwechat dient auch als West-Ost-Knotenpunkt v.a. für Flüge nach Osteuropa und in den Nahen Osten. Die sitzplatzstärksten Angebote sind auf den Verbindungen nach Deutschland, Zürich, Paris, Amsterdam und Istanbul zu finden, und mehr als 85% der Streckenziele liegen innerhalb Europas. Neben dem Flughafen Wien-Schwechat gewinnen zunehmend auch die Flughäfen Salzburg, Graz, Linz, Klagenfurt und Innsbruck v.a. im Tourismus an Bedeutung.

Noch stärkere Zuwächse als im Personenverkehr waren in Österreich in der Verkehrsleistung im Güterverkehr zu verzeichnen. Zwischen 1990 und 2014 hat sich diese von etwas über 30 Mrd. tkm auf über 70 Mrd. tkm mehr als verdoppelt (Umweltbundesamt 2016). Die Zunahme der Gütermobilität ist getrieben durch wirtschaftliches Wachstum, gleichzeitig steigende internationale Verflechtung und durch moderne, auf flexible und *just in time* ausgerichtete Logistikkonzepte (Sammer et al. 2009). Der auf der Bahn zurückgelegte – vergleichsweise geringe – Anteil der Güterverkehrsleistung betrug 2014 ca. 29% und ist neben marktstrukturellen Ursachen auch auf eine fehlende Kostenwahrheit im Verkehr und auf eine teilweise ineffiziente Abwicklung internationaler Bahnverkehre zurückzuführen (Umweltbundesamt 2016).

### 5.4.3 Nachhaltigkeit der Mobilitäts- und Verkehrsentwicklung

Die stark zunehmende Motorisierung und das Verkehrswachstum haben negative Folgen für Umwelt und Gesellschaft. Auswirkungen wie Luftverschmutzung, Flächeninanspruchnahme, Lärm und Treibhausgasemissionen, aber auch ein ungleicher Zugang zu grundlegenden Dienstleistungen oder ungleiche Umweltbelastungen durch den Verkehr überschreiten häufig Grenzen, die mit umwelt- und sozialverträglichen Lebensstandards nicht vereinbar sind (siehe Fallbeispiel 5.4.2).

**Fallbeispiel 5.4.2: Beispiele für negative Auswirkungen des Verkehrswachstums auf Umwelt und Gesellschaft**

Der globale Energieverbrauch im Verkehr hat sich von Anfang der 1970er-Jahre bis 2016 mehr als verdoppelt, wobei der Straßenverkehr allein knapp die Hälfte des weltweiten Ölkonsums verursacht (IEA 2018).

Mit anteilig 29% ist der Verkehrssektor – nach Energie und Industrie – Österreichs zweitgrößter Verursacher von Treibhausgasemissionen (THG). Während in den anderen Sektoren Minderungen oder nur geringe Anstiege erreicht werden konnten, nahmen die vom Verkehr innerhalb Österreichs verursachten THG-Emissionen zwischen 1990 und 2017 um 74% zu (Umweltbundesamt s.a.). So gefährdet v.a. die Entwicklung im Verkehrssektor die Erreichung internationaler Klimaziele wie die des Pariser Klimaabkommens. Auch die derzeit in der Verkehrspolitik vorgesehenen Maßnahmen werden nicht dazu führen, dass die THG-Ziele des österreichischen Klimaschutzgesetzes für den Verkehr erreicht werden (Heinfellner et al. 2019).

Im Jahr 2016 starben weltweit 1,35 Mio. Menschen an den Folgen von Verkehrsunfällen (WHO 2018). Im Jahr 2013 waren ca. 30% der in Europa im Verkehr getöteten Menschen Fußgängerinnen und Fußgänger sowie Radfahrerinnen und Radfahrer. Dieser Anteil hat jedoch aufgrund des gestiegenen Pkw-Besitzes und der sich daraus ergebenden Abhängigkeit vom Pkw seit den 1960er-Jahren stark abgenommen (WHO 2017).

Obwohl der Ausstoß zahlreicher verkehrsbedingter Luftschadstoffe reduziert wurde, werden in vielen Städten Europas weiterhin regelmäßig gesundheitsschützende Grenzwerte für die Luftqualität überschritten (EEA 2018). Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) schätzt, dass bei Erwachsenen jährlich ca. 500.000 vorzeitige Todesfälle auf Schadstoffemissionen zurückzuführen sind, zu denen der Verkehr maßgeblich beiträgt (WHO 2017).

Um diese negativen Entwicklungen zu stoppen, braucht es eine Vision für ein "nachhaltiges Verkehrssystem", welches die Bedürfnisse aller Menschen in der Gesellschaft befriedigt, Personen und Güter zur Ausübung sozialer und wirtschaftlicher Aktivitäten befördert, und gleichzeitig die Umwelt nicht oder wenig belastet. Während über die generellen Elemente eines solchen nachhaltigen Verkehrssystems Einigkeit herrscht, gibt es bis dato keine allgemein akzeptierte Konzeptualisierung (Gudmundsson et al. 2016). Verkehr war zunächst in allgemeinen Texten und Erklärungen für nachhaltige Entwicklung eingeschlossen, z.B. in der Rio-Erklärung über Umwelt und Entwicklung (UN 1992). Erst Mitte der 1990er-Jahre wurden grundlegende Definitionen für ökologisch nachhaltigen Verkehr entwickelt, z.B. im EST-Projekt der OECD (1996). Diese Teildefinitionen wurden später um soziale und ökonomische Aspekte erweitert und als "Vancouver Principles of Sustainable Transportation" (OECD 1997) veröffentlicht. Eine weitverbreitete Definition stammt vom kanadischen Centre for Sustainable Transportation (CST 1997, zitiert in Gudmundsson et al. 2016), die auch von den Verkehrsministerinnen und Verkehrsministern der EU (EU COM 2001, S. 15f.) weitgehend übernommen wurde. Letztere statuiert ein nachhaltiges Verkehrssystem als eines, das

- „ermöglicht, dass die Grundbedürfnisse von Einzelpersonen, Unternehmen und der Gesellschaft sicher und in einer Weise befriedigt werden, die mit der Gesundheit von Mensch und Ökosystem im Einklang steht, und Gerechtigkeit innerhalb und zwischen nachfolgenden Generationen fördert;
- erschwinglich ist, gerecht und effizient arbeitet, eine Auswahl an Verkehrsmitteln bietet und eine wettbewerbsfähige Wirtschaft sowie eine ausgeglichene regionale Entwicklung unterstützt;
- Emissionen und Abfälle innerhalb der Fähigkeit des Planeten, sie zu absorbieren, begrenzt, erneuerbare Ressourcen innerhalb oder unterhalb ihrer Regenerationsraten verwendet, nichterneuerbare Ressourcen innerhalb oder unterhalb der Entwicklungsraten von erneuerbaren Substituten verbraucht, währenddessen die Nutzung von Land und die Produktion von Lärm minimiert wird“ (EU COM 2001, eigene Übersetzung).

Die hohe politische Relevanz der Erreichung eines nachhaltigen Verkehrssystems zeigt sich auch darin, dass in vier der siebzehn SDGs explizit Verkehrsziele festgelegt wurden (SDGs 3, 9, 11, 12) und Verkehr in mindestens vier weiteren direkt oder indirekt zur Zielerreichung beiträgt (SDGs 2, 6, 7, 13) (UN 2015).

### 5.4.4 *Planung eines nachhaltigen Mobilitäts- und Verkehrssystems der Zukunft*

Nachhaltige Mobilitätslösungen müssen somit auch sozial- und umweltgerecht sicherstellen, dass Ziele wie Produktions-, Arbeits- und Ausbildungsstätten, Freizeit- und Gesundheitseinrichtungen, Geschäfte etc. für alle erreichbar sind. Hierfür werden – in der Reihung ihrer Priorität – Strategien der Verkehrsvermeidung, der Verkehrsverlagerung und der Verbesserung der Verkehrsabläufe eingesetzt (Holz-Rau 2009):

- Durch *Verkehrsvermeidung* soll die Notwendigkeit für Verkehre erst gar nicht entstehen, einerseits durch die Vermeidung von Fahrten (z.B. durch verbesserte Organisation und weniger Leerfahrten im Güterverkehr oder durch Videokonferenzen anstelle von Dienstreisen), andererseits durch kürzere Wege (z.B. durch die Mischung von Wohn- und Gewerbefunktionen).
- Durch *Verkehrsverlagerung* sollen Verkehre vom motorisierten Individualverkehr auf umweltverträglichere Verkehrsmittel umgestellt werden, insbesondere auf den öffentlichen und nichtmotorisierten Verkehr.
- Schließlich kann eine effiziente, umwelt- und sozialverträgliche Abwicklung zur *Verbesserung der Verkehrsabläufe* in Richtung Nachhaltigkeit beitragen, wenn die spezifischen Energieverbräuche verringert und die Auslastungen erhöht werden.

Zur Umsetzung dieser Strategien können Instrumente der Infrastruktur-, Technologie-, Finanz-, Rechts- und Ordnungspolitik sowie Organisation und Information einge-

setzt werden (siehe z.B. Holz-Rau und Jansen 2006). Die Verkehrsplanung stellt Entscheidungsträgerinnen und -trägern Informationen zur Verfügung, um diese Strategien und Instrumente für die Gestaltung der Verkehrssysteme sinnvoll einsetzen und miteinander kombinieren zu können. Das erfolgt im Allgemeinen in einem Planungszyklus (siehe Abbildung 5.4.3) (FSV 2013).



**Abbildung 5.4.3: Prozess der Verkehrsplanung**  
(vereinfachte Darstellung nach FSV 2013)

Im Zuge der Verkehrsplanung kommen verschiedene Methoden und Werkzeuge zum Einsatz:

- *Datenerhebung und -analyse:* Für die Problemanalyse, Maßnahmenuntersuchung und zur Wirkungskontrolle werden hochwertige Daten benötigt. Diese geben Auskunft zu den Mobilitätsbedürfnissen unterschiedlicher gesellschaftlicher Gruppen, beispielsweise von Touristen (Juschten et al. 2019) oder Kindern (Stark et al. 2019), zur Entwicklung der Verkehrsnachfrage allgemein (z.B. die landesweite Erhebung „Österreich Unterwegs“, Tomschy et al. 2016) und zu den Auswirkungen des Verkehrs (siehe Fallbeispiel 5.4.3). Gerade bei der Erhebung von Mobilitätsdaten können unterschiedliche Methoden erheblichen Einfluss auf die Qualität der gewonnenen Daten haben (siehe z.B. Aschauer et al. 2018), und die Digitalisierung eröffnet neue Datenquellen (z.B. Smartphonedaten für Mobilitätsanalysen). Verkehrsplanerinnen und Verkehrsplaner müssen somit über entsprechende Kenntnisse der Methoden, der Erhebung, der Verarbeitung und räumlichen Darstellung großer Datenmengen verfügen.
- *Gestaltung der Verkehrssysteme:* Im Bereich der baulichen und technischen Planung spielt der Verkehrswegeentwurf bei der Maßnahmenuntersuchung eine wesentliche Rolle, um Verkehrswege sicher (siehe z.B. Berger 2019), effizient und möglichst umweltschonend zu gestalten (siehe z.B. Meschik 2018). Auch Fähigkeiten zur Gestaltung von Preis- und Regulierungsmaßnahmen sowie sogenannte „weiche“ Maßnahmen des Mobilitätsmanagements (Information, Kommunikation, Koor-

dination und Organisation) werden benötigt, beispielsweise um durch stärkeres Gesundheitsbewusstsein die Bereitschaft zur Nutzung aktiver Mobilitätsformen zu erhöhen (Wegener et al. 2017).

- *Verkehrsmodellierung*: Verkehrsmodelle werden als Analyse- und Prognosewerkzeuge benötigt, um zukünftige Verkehrsentwicklungen einschätzen und bewerten zu können. Sie werden daher v.a. in der Maßnahmenuntersuchung und Wirkungskontrolle eingesetzt. Die Bandbreite reicht von der Modellierung des individuellen Mobilitätsverhaltens (wie Reaktionen auf Benzinpreisänderungen; Hössinger et al. 2017) bis hin zu hochaggregierten strategischen Modellen zur Untersuchung der langfristigen Wechselwirkungen zwischen Verkehrsnachfrage, Infrastrukturen, Raum und Wirtschaft (z.B. Pfaffenbichler 2011).
- *Bewertungsverfahren*: Zur Abwägung der vielfältigen Wirkungen von Verkehrsmaßnahmen in der Maßnahmenuntersuchung und Wirkungskontrolle werden Bewertungsverfahren benötigt, wie z.B. Kosten-Nutzen-Analysen, multikriterielle Analysemethoden oder hybride Ansätze (siehe z.B. Gühnmann et al. 2012).
- *Partizipative Planung*: Eine frühzeitige und kontinuierliche Einbindung relevanter Akteurinnen und Akteure, wie z.B. Verwaltungen, Verbände, Verkehrsbetriebe, Interessensgruppen und von den Planungen betroffene Personen, unterstützt die Umsetzung anspruchsvoller und oft kontrovers diskutierter Maßnahmen und ermöglicht die Einbindung von lokalem Wissen.

### Fallbeispiel 5.4.3: Indikatoren der Nachhaltigkeit im Verkehr

Die Messung von Nachhaltigkeit im Verkehr ist eine Voraussetzung für die gute Planung zukünftiger Verkehrssysteme. Sie ermöglicht die Bereitstellung von Daten, mit denen Entwicklungen beobachtet, Zusammenhänge analysiert, Trends prognostiziert und Ziele verglichen werden können. Diese Messung erfolgt anhand quantitativer oder qualitativer Nachhaltigkeitsindikatoren, die ein wichtiges Instrument zur Information der Öffentlichkeit sowie der Entscheidungsträgerinnen und -träger ist. Gudmundsson und Sørensen (2013) stellen fest, dass solche Indikatoren Politikentscheidungen zwar meist nicht direkt beeinflussen, aber eine wichtige Grundlage für die Rationalisierung von Entscheidungsprozessen sind.

Indikatoren müssen die grundsätzlichen Anforderungen an eine nachhaltige Entwicklung abbilden, d.h., sie müssen sowohl die Kriterien der Nachhaltigkeit im Verkehr als auch intra- und intergenerationale Gerechtigkeit reflektieren. In der Literatur existieren bereits viele Indikatorsätze (siehe z.B. Joumard und Gudmundsson 2010). Abhängig von lokalen Gegebenheiten (wie z.B. Zielen, Datenverfügbarkeit, Art und Größe der zu messenden Eingriffe etc.) können anhand von Leitlinien passende Indikatoren ausgewählt werden, die z.B. für nachhaltige städtische Verkehrspläne in Europa (Gühnmann 2016) oder als Vorschlag für einen nationalen Indikatorensatz für Österreich (Fürst et al. 2018) existieren. Typische Beispiele für im Verkehr genutzte Nachhaltigkeitsindikatoren sind Erreichbarkeitsindikatoren (z.B. Anteil der Bevölkerung, der ein regionales Zentrum innerhalb einer vorgegebenen Zeit mit dem öffentlichen Verkehr erreichen kann), Verkehrssicherheitsindikatoren (z.B. Anzahl pro Jahr verletzter Verkehrsteilnehmerinnen und -teilnehmer) oder Umweltindikatoren (z.B. verkehrsbedingte THG-Emissionen).

Im UBRM-Studium werden neben Grundkenntnissen zum Mobilitätsverhalten und zur Verkehrsplanung auch Fertigkeiten der Anwendung verschiedener Methoden und Werkzeuge vermittelt. Studierende erhalten somit das Rüstzeug, um auf zukünftige Herausforderungen der Verkehrsplanung Antworten zu finden (z.B. die Dekarbonisierung des Verkehrs und die zunehmende Digitalisierung und Automatisierung im Verkehrssystem).

### 5.4.5 Fazit

Jede Entscheidung in der Verkehrspolitik und Verkehrsplanung – z.B. die Bestimmung verkehrsrelevanter Steuern und Subventionen, die Regulierungen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit, die Reduzierung von Umweltwirkungen, die Realisierung von Verkehrsprojekten oder die Aufstellung von Verkehrsplänen – erfordert die Abwägung potenziell konkurrierender Nachhaltigkeitsziele.

Angesichts begrenzter Ressourcen, eines steigenden Bewusstseins für die vielfältigen Wirkungen von Verkehrsmaßnahmen und gestiegener Anforderungen an transparente Planungsverfahren benötigen Entscheidungsträgerinnen und -träger zur Abwägung von Maßnahmen Informationen und Verfahren, die ihnen umfassende, verständliche und verlässliche Grundlagen liefern. Das UBRM-Studium bietet eine Spezialisierung im Bereich Verkehrswesen, um zukünftigen Verkehrsplanerinnen und Verkehrsplanern das Rüstzeug zu geben, diese gesellschaftlich wichtigen Prozesse aktiv mitgestalten zu können.

### Danksagung

Die Abschnitte 5.4.1 und 5.4.4 basieren teilweise auf Skripten des Instituts für Verkehrswesen, die im Laufe der Zeit von einer Vielzahl an Autorinnen und Autoren verfasst und redigiert wurden. Die Autorin dieses Beitrags dankt allen Beteiligten.

### Literatur

- Aschauer, F., Hössinger, R., Axhausen, K. W., Schmid, B., and Gerike, R. (2018): Implications of survey methods on travel and non-travel activities. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 18, 1, 4–35.
- Berger, W. J. (2019): Geschwindigkeitsdämpfung innerorts – Beispiele für straßengestalterische Maßnahmen. In: FSV (Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr), Hrsg., FSV Kooperationsveranstaltung – Bundeskongress kommunale Verkehrssicherheit, Wien, 7. Mai 2019.
- BMVIT (Bundesministerium Verkehr Innovation Technologie) (2019): Statistik Straße & Verkehr. Wien. Verfügbar in: [https://www.bmvit.gv.at/service/publikationen/verkehr/strasse/statistik\\_strasseverkehr.html](https://www.bmvit.gv.at/service/publikationen/verkehr/strasse/statistik_strasseverkehr.html) [Abfrage am 20.6.2019].
- CST (Centre for Sustainable Transportation) (1997): Definition and vision of sustainable transportation. Ontario: CST.

## 5 Umweltrelevante Systeme & Technologien

- EEA (European Environment Agency) (2018): Air pollution: agriculture and transport emissions continue to pose problems in meeting agreed limits. Available at: <https://www.eea.europa.eu/highlights/air-pollution-agriculture-and-transport>. [accessed 15.6.2019].
- EU COM (European Commission) (2001): 2340th Council meeting transport / telecommunications, Luxembourg, 4-5 April 2001. Press release 7587/01. Luxembourg. Available at: [http://europa.eu/rapid/press-release\\_PRES-01-131\\_en.htm?locale=en](http://europa.eu/rapid/press-release_PRES-01-131_en.htm?locale=en) [accessed 20.6.2019].
- FSV (Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr) (2013): RVS 02.01.11 Grundsätze der Verkehrsplanung; Verkehrsplanung; Grundlagen; Verkehrsuntersuchungen. Wien.
- Fürst, B., Schnützliger, P., Käfer, A., Kanatschnik, D., Sancho-Reinoso, A., Rogalli, T., Gerlich, W., Doring, E. und Brossmann, J. (2018): SAMOA – Sustainability Assessment for Mobility in Austria. Ergebnisbericht. Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. Verfügbar in: <https://www2.fgg.at/verkehr/projekte.php?id=1421&lang=de&browse=programm> [Abfrage am 15.6.2019].
- Grübler, A. (1990): The Rise and Fall of Infrastructures: Dynamics of Evolution and Technological Change in Transport. Heidelberg, New York: Physica-Verlag.
- Grübler, A. (1998): Technology and Global Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Gudmundsson, H. and Sørensen, C. H. (2013): Some use – Little influence? On the roles of indicators in European sustainable transport policy. Ecological Indicators, 35, 43–51. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.08.015>.
- Gudmundsson, H., Hall, R., Marsden, G., and Zietsman, J. (2016): Sustainable Transportation. Indicators, Frameworks and Performance Management. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Gühnemann, A. (2016): SUMP Manual on Monitoring and Evaluation: Assessing the impact of measures and evaluating mobility planning processes. Available at: [www.eltis.org](http://www.eltis.org) and [www.sump-challenges.eu/kits](http://www.sump-challenges.eu/kits) [accessed 26.6.2019].
- Gühnemann, A., Laird, J. J., and Pearman, A. D. (2012): Combining cost-benefit and multi-criteria analysis to prioritise a national road infrastructure programme. Transport Policy, 23, 15–24. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2012.05.005>.
- Heinfellner, H., Ibesich, N., Lichtblau, G., Stranner, G., Svehla-Stix, S., Vogel, J., Wedler, M. und Winter, R. (2019): Sachstandsbericht Mobilität und mögliche Zielpfade zur Erreichung der Klimaziele 2050 mit dem Zwischenziel 2030. Endbericht. Wien: Umweltbundesamt. Verfügbar in: [https://www.umweltbundesamt.at/aktuell/publikationen/publikationssuche/publikationsdetail/?pub\\_id=2280](https://www.umweltbundesamt.at/aktuell/publikationen/publikationssuche/publikationsdetail/?pub_id=2280) [Abfrage am 15.6.2019].
- Heller, J. und Schreiner, R. (2015): Zu Fuß gehen in Wien – Vertiefte Auswertung des Mobilitätsverhaltens der Wiener Bevölkerung für das zu Fuß gehen. Wien. Verfügbar in: <https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/studien/b008453.html> [Abfrage am 15.6.2019].
- Herry, M., Sedlacek, N. und Steinacher, I. (2012): Verkehr in Zahlen Österreich, Ausgabe 2011. Wien, im Auftrag des BMVIT. Verfügbar in: <https://www.bmvit.gv.at/verkehr/gesamtverkehr/statistik/viz11/index.html> [Abfrage am 26.6.2019].
- Hesse, M. (1996): Ist ökologische Mobilität planbar? Ökologisches Wirtschaften, 6, 11, 10–11.
- Holz-Rau, C. (2009): Raum, Mobilität und Erreichbarkeit – (Infra-)Strukturen umgestalten? Informationen zur Raumentwicklung, 12, 797–804.
- Holz-Rau, C. und Jansen, U. (2006): Mobilitätssicherung durch energiesparende integrierte Siedlungs- und Verkehrsplanung. Informationen zur Raumentwicklung, 8, 447–456.
- Hössinger, R., Link, C., Sonntag, A., and Stark, J. (2017): Estimating the price elasticity of fuel demand with stated preferences derived from a situational approach. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 103, 154–171. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.06.001>.
- IEA (International Energy Agency) (2018): Key world energy statistics. Paris. Available at: [www.iea.org/statistics/](http://www.iea.org/statistics/) [accessed 21.6.2019].
- Joumard, R. and Gudmundsson, H. (eds.) (2010): Indicators of environmental sustainability in transport: an interdisciplinary approach to methods. INRETS report, Recherches R282, Bron, France. Available at: <http://cost356.inrets.fr> [accessed 15.6.2019].

- Juschten, M., Brandenburg, C., Hössinger, R., Liebl, U., Offenzeller, M., Prutsch, A., Unbehaun, W., Weber, F., Jiricka-Pürner, A., Juschten, M., Brandenburg, C., Hössinger, R., Liebl, U., Offenzeller, M., Prutsch, A., Unbehaun, W., Weber, F., and Jiricka-Pürner, A. (2019): Out of the city heat—Way to less or more sustainable futures? *Sustainability*, 11, 1, 214.  
<https://doi.org/10.3390/su11010214>.
- Klemetschitz, R. and Roider, O. (2019): From traffic management towards mobility management, the case of the city of Vienna. 15th World Conference on Transport Research, 26-31 May, 2019, Mumbai, India.
- Kurath, S. (2006): Die Unschuld des Einfamilienhauses. *Tec21 – Fachzeitschrift für Architektur, Ingenieurwesen und Umwelt*, 132, 31-32, 12–16.
- Lichtenberger, E. (2001): Analysen zur Erreichbarkeit von Raum und Gesellschaft in Österreich. Wien: Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften.
- Meijer, J. R., Huijbregts, M. A., Schotten, K. C. G. J., and Schipper, A. M. (2018): Global patterns of current and future road infrastructure. *Environmental Research Letters*, 13.
- Meschik, M. (2018): Planungshandbuch Straßenraum – Lebenswerte Straßen in Niederösterreich bauen, mitgestalten und erhalten. Amt der Niederösterreichischen Landesregierung, Gruppe Straße und Gruppe Raumordnung, Umwelt und Verkehr, 270.
- Moidl, S. (2007): Vergleichsstudie der Verkehrsinfrastruktur und Mobilität von Österreich und der Schweiz. Wien. Verfügbar in:  
[https://www.global2000.at/sites/global/files/Studie%20Verkehrsinfrastruktur\\_Stefan%20Moidl.pdf](https://www.global2000.at/sites/global/files/Studie%20Verkehrsinfrastruktur_Stefan%20Moidl.pdf) [Abfrage am 15.6.2019].
- OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) (1996): Environmental Criteria for Sustainable Transport, Organisation for Economic Co-operation and Development, (OECD), Paris.
- OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) (1997): Towards Sustainable Transportation, The Vancouver Conference, 24-27 March 1996. OECD proceedings, Paris: OECD.
- Pfaffenbichler, P. (2011): Modelling with systems dynamics as a method to bridge the gap between politics, planning and science? Lessons learnt from the development of the land use and transport model MARS. *Transport Reviews*, 31, 2, 267–289.  
<https://doi.org/10.1080/01441647.2010.534570>.
- Sammer, G., Klemetschitz, R., Steininger, K., Schmid, C., Hausberger, S. und Rexeis, M. (2009): Problemanalyse und Lösungskonzepte für den Güterverkehr in Österreich aus der Sicht der Bundesländer. IVE Forschungsberichte Nr. 01/2009. Wien, Graz. Verfügbar in:  
[https://boku.ac.at/fileadmin/data/H03000/H85000/H85600/downloads/Bericht\\_2009\\_05\\_05\\_Gueterverkehr\\_in\\_OEsterreich.pdf](https://boku.ac.at/fileadmin/data/H03000/H85000/H85600/downloads/Bericht_2009_05_05_Gueterverkehr_in_OEsterreich.pdf) [Abfrage am 15.6.2019].
- Schiller, P. L. and Kenworthy, J. R. (2018): An Introduction to Sustainable Transportation: Policy, Planning and Implementation. 2nd edition, Oxon, New York: Routledge.
- Schmitz, S. (2013): Revolutionen der Erreichbarkeit. Opladen: Leske + Budrich.
- Stark, J., Singleton, P. A., and Uhlmann, T. (2019): Exploring children's school travel, psychological well-being, and travel-related attitudes: Evidence from primary and secondary school children in Vienna, Austria. *Travel Behaviour and Society*, 16, 118–130.  
<https://doi.org/10.1016/j.tbs.2019.05.001>.
- Statistik Austria (2018a): Schieneninfrastruktur in Österreich. Verfügbar in:  
[https://www.statistik.at/web\\_de/statistiken/energie\\_umwelt\\_innovation\\_mobilitaet/verkehr/schiene/schienenfahrzeuge\\_bestand/056540.html](https://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/verkehr/schiene/schienenfahrzeuge_bestand/056540.html) [Abfrage am 21.6.2019].
- Statistik Austria (2018b): Wohnen. Zahlen, Daten und Indikatoren der Wohnstatistik. Wien. Verfügbar in:  
[http://www.statistik.at/web\\_de/services/publikationen/7/index.html?includePage=detailEdView&sectionName=Wohnen&pubId=572](http://www.statistik.at/web_de/services/publikationen/7/index.html?includePage=detailEdView&sectionName=Wohnen&pubId=572) [Abfrage am 21.6.2019].
- Statistik Austria (2018c): Verkehrsstatistik 2017. Wien. Verfügbar in:  
[http://www.statistik.at/web\\_de/services/publikationen/14/index.html?includePage=detailEdView&sectionName=Verkehr&pubId=676](http://www.statistik.at/web_de/services/publikationen/14/index.html?includePage=detailEdView&sectionName=Verkehr&pubId=676) [Abfrage am 21.6.2019].

## 5 Umweltrelevante Systeme & Technologien

- Statistik Austria (2019): Fahrzeugbestand ab 1937. STATcube – Statistische Datenbank von Statistik Austria. [https://www.statistik.at/web\\_de/services/statcube/index.html](https://www.statistik.at/web_de/services/statcube/index.html) [Abfrage am 4.7.2019].
- Tappeiner, G., Kobl Müller, M., Stafler, G. und Walch, K. (2002): Heimwert – Ökologisch-ökonomische Bewertung von Siedlungsformen. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 25/2002, Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. Verfügbar in: <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/hdz/projekte/heimwert-oekologisch-oekonomische-bewertung-von-siedlungsformen.php> [Abfrage am 2.7.2019].
- Tomschy, R., Herry, M., Sammer, G., Klementsitz, R., Riegler, S., Follmer, R., Gruschwitz, D., Josef, F., Gensasz, S., Kirnbauer, R. und Spiegel, T. (2016): Österreich unterwegs 2013/2014. Ergebnisbericht zur österreichweiten Mobilitätserhebung „Österreich unterwegs 2013/2014“. Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. Verfügbar in: [https://www.bmvit.gv.at/verkehr/gesamtverkehr/statistik/oesterreich\\_unterwegs/](https://www.bmvit.gv.at/verkehr/gesamtverkehr/statistik/oesterreich_unterwegs/) [Abfrage am 26.6.2019].
- Umweltbundesamt (s.a.): Verkehr beeinflusst das Klima. Verfügbar in: [http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/verkehr/auswirkungen\\_verkehr/verke\\_treibhausgase/](http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/verkehr/auswirkungen_verkehr/verke_treibhausgase/) [Abfrage am 22.6.2019].
- Umweltbundesamt (2016): Elfter Umweltkontrollbericht – Umweltsituation in Österreich. Wien. Verfügbar in: <https://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/umweltkontrollbericht/ukb/> [Abfrage am 23.3.2019].
- UN (United Nations) (1992): Rio-Erklärung über Umwelt und Entwicklung. Verfügbar in: [https://www.nachhaltigkeit.info/artikel/rio\\_deklaration\\_950.htm](https://www.nachhaltigkeit.info/artikel/rio_deklaration_950.htm) [Abfrage am 22.6.2019].
- UN (United Nations) (2015): Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. Available at: <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld/publication> [accessed 24.6.2019].
- Verron, H., Huckestein, B., Penn-Bressel, G., Röthke, P., Bölke, M. und Hülsmann, W. (2005): Determinanten der Verkehrsentscheidung. Dessau. Verfügbar in: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/determinanten-verkehrsentstehung> [Abfrage am 22.6.2019].
- Wegener, S., Raser, E., Gaupp-Berghausen, M., Anaya, E., de Nazelle, A., Gerike, R., Horvath, I., Iacorossi, F., Int Panis, L., Kahlmeier, S., Nieuwenhuijsen, M., Mueller, N., Rojas Rueda, D., Sanchez, J., and Rothballer, C. (2017): Active mobility – the new health trend in smart cities, or even more? In: Schrenk, M., Popovich, V. V., Zeile, P., Elisei, P., Beyer, C., eds., REAL CORP 2017 – PANTA RHEI – A World in Constant Motion. Proceedings of 22nd International Conference on Urban Planning, Regional Development and Information Society. 21–30. Available at: <https://repository.corp.at/348/> [accessed 26.6.2019].
- WHO (World Health Organization) (2017): Fact sheet 1 – Cities. Transport, health and environment. Available at: <http://www.euro.who.int/en/media-centre/fact-sheets> [accessed 26.6.2019].
- WHO (World Health Organization) (2018): Global status report on road safety. Geneva. Available at: [https://www.who.int/violence\\_injury\\_prevention/road\\_safety\\_status/2018/en/](https://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/2018/en/) [accessed 21.6.2019].

## 5.5 Siedlungswasserwirtschaft und Gewässerschutz

*Roman Neunteufel, Verena Germann und Lena Simperler*

*Institut für Siedlungswasserbau, Industrierwasserwirtschaft und Gewässerschutz,*

*Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt (WAU)*

*[roman.neunteufel@boku.ac.at](mailto:roman.neunteufel@boku.ac.at), [verena.germann@boku.ac.at](mailto:verena.germann@boku.ac.at), [lena.simperler@boku.ac.at](mailto:lana.simperler@boku.ac.at)*

### 5.5.1 Bedeutung der Siedlungswasserwirtschaft für die Gesellschaft

Der Wasserkreislauf ist einer der zentralen natürlichen Einflussfaktoren auf unser Leben. Angetrieben durch die Sonne, kommt es zur Verdunstung von Wasser aus Wasserflächen. Der Großteil davon kommt aus den Ozeanen, ein geringerer Teil vom Land. In Form von Wasserdampf wird es in der Atmosphäre transportiert, bis es als Niederschlag in Form von Regen, Schnee oder Hagel meist über Land wieder auf die Erdoberfläche niedergeht. Von dort gelangt es über Grundwasser und Oberflächen-gewässer schließlich zurück in die Ozeane. Der Wasserkreislauf schließt sich, sodass die Gesamtmasse des Wassers auf der Erde konstant bleibt, was sich ändert ist der Aggregatzustand (fest, flüssig, gasförmig).

Nur sehr geringe Mengen Wasser sind tatsächlich Teil des Wasserkreislaufs, der größte Teil bleibt in Ozeanen und Eis gespeichert. Für die Nutzung durch den Menschen ist besonders Oberflächenwasser und Grundwasser von Bedeutung. Auf globaler Ebene ist wesentlich mehr Wasser vorhanden, als verbraucht wird. Der Wasserverbrauch ist jedoch zeitlich und räumlich sehr unterschiedlich verteilt. Weltweit wird der mit Abstand größte Teil des Wassers für die Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen verbraucht, in Österreich überwiegt der industrielle Wasserverbrauch (siehe Abschnitt 5.5.4).

Der gesicherte Zugang zu Wasser ist eine Grundvoraussetzung für die Entstehung größerer Siedlungsräume. Die Siedlungswasserwirtschaft greift dabei entstehende Fragen auf und erarbeitet Lösungen für eine gesicherte Wasserversorgung unter Berücksichtigung quantitativer und qualitativer Aspekte, für eine geregelte Abwassersammlung und -reinigung und für den Umwelt- und Ressourcenschutz. Damit liefert dieser multi-disziplinäre Fachbereich viele, sich wechselseitig beeinflussende Beiträge zu den SDGs.

Mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung lebt derzeit in Städten, und dieser Anteil wird in Zukunft noch deutlich steigen. Damit ergeben sich große Herausforderungen in der Umsetzung von SDG 11 (nachhaltige Städte und Gemeinden) und einer damit einhergehenden Sicherstellung der Grundversorgung für alle Menschen.

SDG 6 (sauberes Wasser und Sanitärversorgung) soll die Verfügbarkeit und nachhaltige Bewirtschaftung von Wasser und eine Sanitärversorgung für alle Menschen gewähr-

leisten. In Österreich ist der Zugang zu einwandfreiem, bezahlbarem Trinkwasser (Zielvorgabe 6.1) und zu einer angemessenen und gerechten Sanitärversorgung und Hygiene (Zielvorgabe 6.2) weitgehend gegeben. Die Erhaltung der dafür geschaffenen Infrastruktur stellt allerdings eine wachsende Herausforderung dar (Bundeskanzleramt Österreich 2016).

Darüber hinaus gibt es viel Forschungsbedarf, um diese Infrastruktur nachhaltiger zu gestalten (SDG 9). Verbesserungspotenzial gibt es beispielsweise in Bezug auf die Ressourcenrückgewinnung (siehe Abschnitt 5.5.6.4). Neben Nährstoffen steht in der Siedlungswasserwirtschaft die Rückgewinnung von Energie aus Abwasser im Mittelpunkt, die so zur Erreichung von SDG 7 (bezahlbare und saubere Energie) beiträgt. Dies kann entweder durch Gewinnung von Biogas oder durch Nutzung der darin enthaltenen Wärmeenergie (siehe Fallbeispiel 5.5.2 und Abschnitt 5.5.6.4) erfolgen.

Trotz des Wasserreichtums in Österreich werden große Mengen an Wasser als sogenanntes „virtuelles Wasser“ importiert. Dies bezeichnet jenes Wasser, das bei der Erzeugung eines Produkts benötigt wird. Bis zu zwei Drittel des österreichischen Wasserbedarfs werden über Produkte aus dem Ausland importiert (Vanham 2012), was die Bedeutung von SDG 12 (verantwortungsvolle Konsum- und Produktionsmuster) unterstreicht. Darüber hinaus wird dadurch die Erreichung der SDGs in anderen Ländern in vielfältiger Weise beeinflusst. Solche sogenannten Spillover-Effekte beeinflussen u.a. auch SDG 14 (Leben unter Wasser) und, obwohl Österreich keinen direkten Meerzugang hat, gelangen auch Schadstoffeinträge und Verunreinigungen aus Österreich in die Meere. Über die Donau werden beispielsweise große Mengen an Plastik ins Schwarze Meer transportiert. Dies geschieht bis zu 90% über diffuse Quellen z.B. durch Abschwemmung, Windverfrachtung oder Wegwerfen (Littering) (Umweltbundesamt 2015), was die Wichtigkeit eines multidisziplinären Lösungsansatzes deutlich macht.

### 5.5.2 Wasserversorgung

Wasser ist als Lebensmittel durch nichts ersetzbar. Die Versorgung mit Wasser war deshalb seit jeher eine der vordringlichsten Aufgaben menschlicher Gesellschaften. In Europa wird heute eine gesicherte öffentliche Wasserversorgung als Selbstverständlichkeit angesehen. Die Verfahren und Systeme sind weitgehend gut etabliert. Dennoch tauchen immer wieder neue Aspekte auf, die für eine nachhaltige Wasserversorgung zu bedenken sind. Der Neubau von Versorgungsanlagen ist in Österreich, mit Ausnahme von Siedlungserweiterungen, weitgehend in den Hintergrund getreten. Thema ist vielmehr das Management, die Instandhaltung und Erneuerung der alternden Infrastruktur. Auch der globale Klimawandel hat mit seinen lokalen Ausprägungen Einfluss auf die Wasserversorgung und die Siedlungswasserwirtschaft. Neben möglichen

Schäden an der Infrastruktur durch vermehrt auftretende Hochwasser (z.B. Überschwemmung von Brunnenfeldern, Zerstörung von Leitungstrassen) erhöhen langandauernde Trockenzeiten den Wasserbedarf der Bevölkerung. Dieser muss durch die Wasserversorgung abgedeckt werden können. Durch die vermehrte Vernetzung und Nutzung unabhängiger Wasserspender soll die Versorgungssicherheit gesteigert werden.

Rund 92% der österreichischen Bevölkerung werden über zentrale Trinkwasserversorgungsanlagen versorgt, 8% sind über private Quellen und Brunnen einzelversorgt. Die zentrale Versorgung ist über rund 5.500 Wasserversorgungsunternehmen organisiert. 3.400 davon sind (kleinere) Genossenschaften, 165 Verbände und 1.900 kommunale Versorger (ÖVGW 2018). Technisch gesehen untergliedert sich die Wasserversorgung in Wassergewinnung, Wasseraufbereitung und Wasserverteilung inklusive Wasserspeicherung. Im Folgenden wird auf die Teilbereiche der Wasserversorgung näher eingegangen. Die Grundlagen der Wasserversorgungsplanung werden im Anschluss vorgestellt. Denn für den erfolgreichen Betrieb von Wasserversorgungsanlagen sind Kenntnisse über planerische, betriebswirtschaftliche, rechtliche und sozioökonomische Aspekte sowie über den Umwelt- und Ressourcenschutz von wesentlicher Bedeutung.

### 5.5.3 Teilbereiche der Wasserversorgung

Die Wassergewinnung erfolgt je nach verfügbarer Wasserressource durch unterschiedliche, an die entsprechende Umgebung und die Rohwasserqualität angepasste Bauwerke. Generell ist Grundwasser im Vergleich zu Oberflächenwasser deutlich besser vor Verunreinigungen geschützt. Es wird mittels Brunnen (in verschiedenen Bauformen) mit unterschiedlichen Pumpen gefördert. Ein wesentlicher Faktor ist dabei die Durchlässigkeit des Untergrundes. Die grundwasserhydraulischen Berechnungen erfolgen nach dem Gesetz von Darcy. Dieses Gesetz beschreibt den Zusammenhang der Grundwasserdurchflussrate mit dem Durchlässigkeitsbeiwert des Untergrundes und dem hydraulischen Gradienten, welcher das Verhältnis zwischen dem Druckhöhenunterschied und der Fließlänge ausdrückt. Quellwässer werden je nach Quelltyp mit unterschiedlichen Quellfassungen in Quellsammelschächten gesammelt.

Je nach Art der Wasserressource sind unterschiedliche Rohwasserqualitäten zu erwarten bzw. muss mit typischen (natürlichen oder anthropogenen) Belastungen oder Qualitätsbeeinträchtigungen gerechnet werden, die eine direkte Nutzung als Trinkwasser verhindern. Um diese zu beseitigen, stehen verschiedene Aufbereitungsverfahren zur Verfügung. Die benötigte Wasserqualität wird von der geplanten Nutzungsart bestimmt (z.B. gewerbliche Nutzungen bzw. öffentliche Wasserversorgung). Die Anforderungen an das Trinkwasser sind in der österreichischen Trinkwasserverordnung (TWV 2001 – Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Ge-

brauch) geregelt, sodass Wasser ohne Gesundheitsgefährdung getrunken oder verwendet werden kann. Im Anhang der TWV finden sich u.a. Grenzwerte von mikrobiologischen und chemischen Parametern (Parameterwerte), die das Trinkwasser nicht überschreiten darf (siehe Beispiele in Tabelle 5.5.1).

**Tabelle 5.5.1: Mikrobiologische und chemische Parameterwerte für nichtdesinfiziertes Wasser laut TWV 2001 (beispielhaft)**

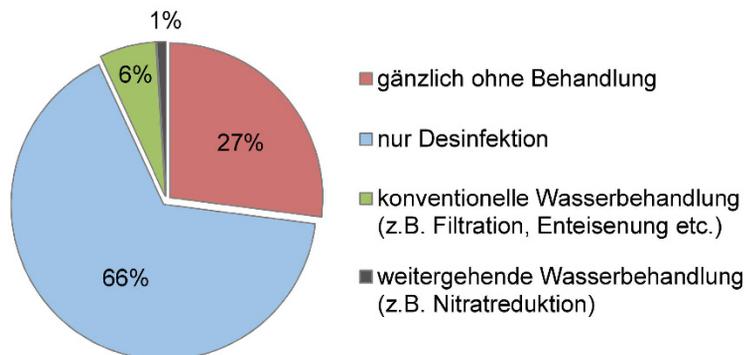
Parameter	Parameterwert	Einheit
<b>Mikrobiologische Parameter</b>		
Escherichia coli	0	Anzahl/100 ml
Enterokokken	0	Anzahl/100 ml
<b>Chemische Parameter</b>		
Arsen	10	µg/l
Blei	10	µg/l
Nitrat	50	mg/l
Nitrit	0,1	mg/l
Pestizide (einzeln)	0,10	µg/l
Pestizide (insgesamt)	0,50	µg/l
Quecksilber	1,0	µg/l

Rohwässer, die diese Grenzwerte überschreiten, müssen aufbereitet werden, bevor sie als Trinkwasser in den Verkehr gebracht werden dürfen. Die Aufbereitungsmaßnahmen sind dabei so vielfältig, wie es qualitätsbeeinträchtigende Stoffe bzw. Stoffgruppen gibt. Oftmals sind Verfahrenskombinationen nötig, um den gewünschten Aufbereitungserfolg zu erzielen. Details zu den Aufbereitungsverfahren und deren Bemessung finden sich z.B. in Rautenberg et al. (2014). Genauere Vorgaben, welche Aufbereitungsverfahren für Trinkwasser zulässig sind, finden sich im Österreichischen Lebensmittelbuch. Dieses ist ein Codex, der die allgemeine Verkehrsauffassung zur Beschaffenheit von Lebensmitteln dokumentiert, und beinhaltet u.a. Richtlinien für das Inverkehrbringen von Waren. Kapitel B1 Trinkwasser (ÖLMB 2007) lässt z.B. für die Trinkwasserdesinfektion folgende Verfahren zu:

- Chlorung mit Natrium-, Kalium-, Calcium- oder Magnesiumhypochlorit,
- Chlorung mit Chlorgas,
- Behandlung mit Chlordioxid,
- Ozonung,
- UV-Bestrahlung.

Laut einer Studie der ÖVGW (2018) muss rund ein Viertel des Trinkwassers der teilnehmenden Wasserversorgungsunternehmen derzeit nicht behandelt und zwei Drittel

nur desinfiziert werden. Das restliche Wasser bedarf weiterer Aufbereitungsmaßnahmen (Abbildung 5.5.1). Die Studie beruht auf Daten von mehr als 100 Wasserversorgungsunternehmen und erfasst etwas mehr als 50% der zentral versorgten Wassereinspeisung. Städtisch strukturierte Wasserversorger sind überproportional repräsentiert, was vermuten lässt, dass unbehandeltes Trinkwasser einen etwas höheren Anteil als den angegebenen aufweist.

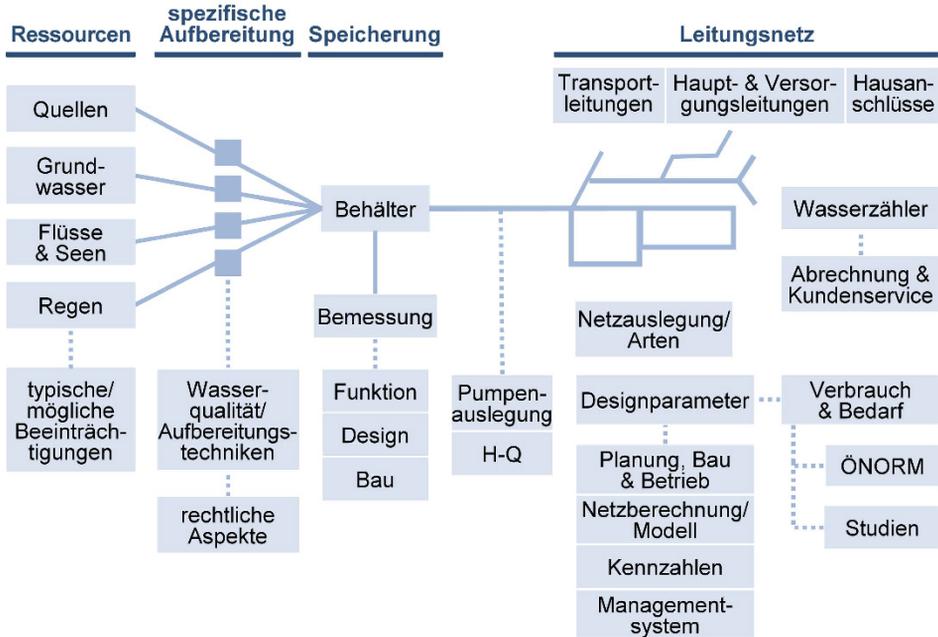


**Abbildung 5.5.1: Wasseraufbereitungsmaßnahmen und ihre mengenmäßigen Anteile**  
(Datenquelle: ÖVGW 2018)

Alle Systemteile von Wasserversorgungsanlagen werden nach hydraulischen Berechnungen dimensioniert und bemessen. Es bedarf z.B. der Bemessung von Brunnenpumpen, der Auslegung von Transportleitungen und von Filtern sowie anderer Verfahrensschritte innerhalb der Aufbereitungsanlagen. Die Wasserspeicherung soll Unterschiede zwischen dem Wasserdargebot und dem schwankenden Verbrauch ausgleichen. Bei zentraler Versorgung werden pro Einwohnerin bzw. Einwohner 400 bis 700 l Wasser gespeichert (ÖVGW 2018). Das österreichische Wasserleitungsnetz wird derzeit auf insgesamt rund 81.000 km geschätzt (ÖVGW 2018), was ca. der zweifachen Länge des Äquators entspricht.

Hydraulische Berechnungen bedienen sich u.a. der Kontinuitätsgleichung, der Druckhöhenverlustberechnung in Druckrohrleitungen, Knoten- und Maschenregeln sowie Näherungsverfahren zum Druckhöhenausgleich von vermaschten Rohrnetzen. Die Bemessungen erfolgen so, dass Wasser zu jeder Zeit, also auch zu Verbrauchsspitzen, in ausreichender Menge, in angemessener Qualität und unter ausreichendem Druck an die Konsumentinnen und Konsumenten geliefert werden kann. Abbildung 5.5.2 zeigt schematisch die Systemteile von Wasserversorgungsanlagen.

In diesem Zusammenhang ist auch die Prozessüberwachung und -steuerung aller Anlagenteile von der Wassergewinnung bis zur Lieferung an die Konsumentinnen und Konsumenten zu nennen, die über die siedlungswasserbauliche Infrastruktur weit hinausgeht.



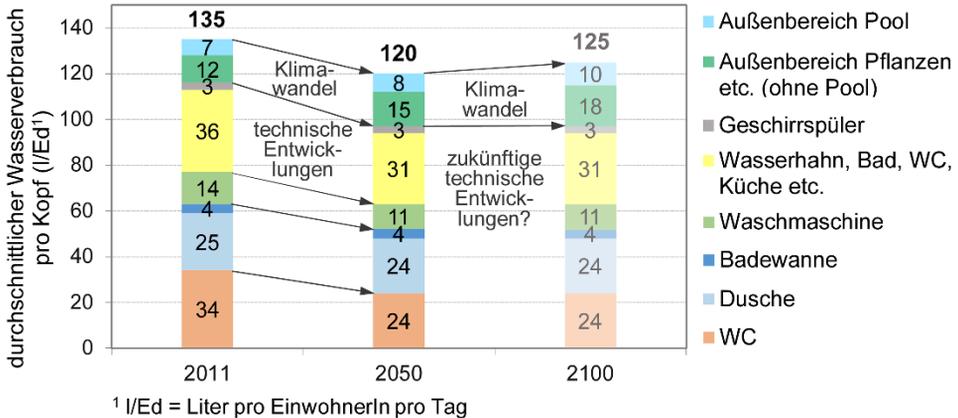
**Abbildung 5.5.2: Systemteile der Wasserversorgung**  
(Quelle: Neunteufel, eigene Abbildung, bearbeitet)

### 5.5.4 Grundlagen der Wasserversorgungsplanung

Der Wasserbedarf dient als Grundlage für alle Planungen einer öffentlichen Wasserversorgung. Er beinhaltet jene Wassermengen, die von der ansässigen Wohnbevölkerung, von Einpendlerinnen und Einpendlern, Zweitwohnsitzen, öffentlichen Einrichtungen, mitversorgten Gewerbe- und Industriebetrieben, vom Tourismus sowie von sonstigen Verbraucherinnen und Verbrauchern benötigt werden. Der Wasserbedarf unterliegt starken tageszeitlichen, saisonalen und regionalen Unterschieden und Schwankungen sowie langfristigen Trends. Aufgrund der Langlebigkeit der Infrastruktur ist somit auch eine genaue Kenntnis über die zukünftige Entwicklung des Wasserbedarfs für den Planungsprozess von großer Bedeutung (Abbildung 5.5.3).

Neben dem Wasserbedarf der öffentlich versorgten Bevölkerung ist auch der Bedarf von Eigenversorgungen, selbstversorgten Gewerbe- und Industriebetrieben und der Landwirtschaft zu berücksichtigen und mit dem nachhaltig nutzbaren Dargebot in Einklang zu halten.

Der jährliche Wasserbedarf in Österreich wird derzeit auf ca. 2,2 Mrd. m<sup>3</sup> geschätzt. Der Großteil entfällt auf die Industrie, ein geringerer Teil auf Haushalte und nur ein kleiner Teil auf die Landwirtschaft. Die Wassermenge aus dem jahresdurchschnittlichen Niederschlag und dem Zufluss aus benachbarten Ländern abzüglich der Ver-



**Abbildung 5.5.3: Entwicklung des durchschnittlichen Haushaltswasserverbrauchs pro Kopf** (Neunteufel et al. 2012, bearbeitet)

dunstung entspricht rund 76,4 Mrd. m<sup>3</sup> pro Jahr. Die theoretisch verfügbare Wassermenge übersteigt daher den Wasserbedarf deutlich (ÖVGW 2018). Diese ist jedoch nicht mit dem tatsächlich nutzbaren Dargebot gleichzusetzen, für das zusätzliche Faktoren wie der gute mengenmäßige Zustand der Grundwasserkörper und der Oberflächenabfluss berücksichtigt werden müssen. In Österreich gibt es diesbezüglich lokal große Unterschiede. Im Sinne einer nachhaltigen Nutzung ist ein Gleichgewicht des Wasserkreislaufs auf regionaler Ebene entscheidend (ÖVGW 2018).

In Österreich wird für die Versorgung der Bevölkerung beinahe ausschließlich Grund- und Quellwasser herangezogen (über Brunnen und Quelfassungen jeweils rund 50%). Im weltweiten Kontext gehört auch Oberflächenwasser aus Seen und Flüssen zu den bedeutenden Wasserressourcen. Künstlich angereichertes Grundwasser, die Sammlung von Niederschlägen, aufbereitetes Abwasser sowie zunehmend auch die Entsalzung von Meerwasser sind weitere mögliche Wasserressourcen.

In Österreich sind der Schutz und die Reinhaltung der Gewässer, in Einklang mit der europäischen Gesetzgebung, im Wasserrechtsgesetz (WRG 1959) festgelegt: „Insbesondere ist Grundwasser sowie Quellwasser so reinzuhalten, dass es als Trinkwasser verwendet werden kann“. Darüber hinaus werden im WRG auch spezielle Schutzgebiete für Wasserentnahmen geregelt.

Die für die Bemessung der Wasserversorgungsinfrastruktur wesentlichen Verbrauchsspitzen werden insbesondere durch private Haushalte ausgelöst. Diese entstehen durch gleichzeitige Wasserverbräuche. Die Spitzenstunden finden sich üblicherweise am Morgen und sind wesentlich durch WC-Spülungen und das Duschen beeinflusst. Spitzentage mit sehr hohem Wasserverbrauch gibt es in den Sommermonaten in langen Trocken- und Hitzeperioden aufgrund der Gartenbewässerung und der Befüllung privater Pools.

## 5 Umweltrelevante Systeme & Technologien

Wasserpreis und Tarifstruktur erlauben eine gewisse Steuerung des Wasserverbrauchs. Wasser gilt jedoch allgemein als wenig preiselastisch, d.h., eine Preiserhöhung führt nicht zwangsläufig zu einer gleichwertigen, relativen Mengenänderung in der Nachfrage. Fehlende Verbrauchskontrollen wie Wasserzähler oder die Wasserabgabe nach Pauschaltarifen können zu übermäßigem Wasserverbrauch führen.

Da Wasserversorgungsinfrastrukturen i.d.R. langlebig sind (50 Jahre und mehr), muss auf das Management der Versorgungsanlagen großes Augenmerk gelegt werden. Anhand der technischen und wirtschaftlichen Nachhaltigkeit werden der technische Zustand der Anlagen sowie die Kostendeckung des Betriebs und nötiger Erneuerungen ermittelt. Die Beurteilung des technischen Zustands der Leitungsnetze erfolgt mittelbar durch Kennzahlen zu Wasserverlusten und Schadensraten. Zur Einschätzung der wirtschaftlichen Nachhaltigkeit müssen die wahrscheinliche Lebensdauer der Anlagen und die Kosten der Erneuerungen bekannt sein.

Wie groß und weitläufig Wasserinfrastruktur sein kann, zeigt sich am Beispiel der Wiener Wasserversorgung (siehe Fallbeispiel 5.5.1 und Abbildung 5.5.4).

### Fallbeispiel 5.5.1: Wasserversorgung in Wien (MA 31 – Wiener Wasser 2019)



Abbildung 5.5.4: Hochquellenleitungen Wiener Wasser (MA 31 – Wiener Wasser 2019)

Die Stadt Wien wird über zwei Hochquellenleitungen mit Trinkwasser aus den niederösterreichischsteirischen Alpen versorgt. Täglich fließen im freien Gefälle rund 220 Mio. Liter Wasser über die I. Hoch-

quellenleitung aus dem Quellgebiet des Schneebergs, der Rax und der Schneealpe, und 217 Mio. Liter über die II. Hochquellenleitung aus dem Quellgebiet am Hochschwab bis in die Hochbehälter der Stadt. Die I. Hochquellenleitung wurde im Jahr 1873 eröffnet, die II. Hochquellenleitung im Jahr 1910. Sie erstrecken sich heute über eine Länge von 150 km bzw. 180 km. Etwa 95% des jährlichen Wasserverbrauchs der Stadt werden so mit Quellwasser gedeckt, 5% werden zusätzlich aus den Wasserwerken Lobau und Moosbrunn eingeleitet (z.B. bei extrem hohem Verbrauch oder bei Wartungsarbeiten an den Hochquellenleitungen).

Die 30 Hochbehälter in Wien haben ein Speichervermögen von 900 Mio. Litern. Zusätzlich gibt es zwei weitere außerhalb Wiens, welche das Gesamtspeichervolumen auf rund 1,6 Mio. m<sup>3</sup> erhöhen. Von den Hochbehältern wird das Wasser weiter über 3.000 km öffentliche Rohrstränge und mehr als 100.000 Anschlussleitungen (Verbindungsleitungen zwischen Straßenrohrstrang und dem Wasserzähler im Haus) in die Wiener Haushalte gebracht. Verantwortlich dafür ist die Magistratsabteilung 31 – Wiener Wasser.

### 5.5.5 Siedlungsentwässerung

Siedlungsgebiete benötigen neben einer Wasserversorgung auch eine adäquate Siedlungsentwässerung. Die unzureichende Ableitung häuslicher und industrieller Abwässer kann zur Umweltverschmutzung und zur Gefährdung der menschlichen Gesundheit führen. Zusätzlich kommt es im Siedlungsgebiet aufgrund der Versiegelung des Bodens zu größeren Abflüssen von Niederschlagswasser als unter natürlichen Bedingungen. Der zweite Teilbereich der Siedlungsentwässerung umfasst die Ableitung von Niederschlagswässern und den damit verbundenen Überflutungsschutz. Je nach Menge und Art des Abwassers werden unterschiedliche Anforderungen an die Ableitung sowie die anschließende Reinigung gestellt. Die Siedlungsentwässerung nutzt meist ein künstlich geschaffenes Kanalnetz zur schnellen und sicheren Ableitung des Abwassers, was gewisse Probleme löst (z.B. Siedlungshygiene, Überflutungsschutz), jedoch auch andere schafft (z.B. Störung des natürlichen Wasserkreislaufs). Die zahlreichen umweltrelevanten Herausforderungen können nicht allein von einer Disziplin gelöst werden. Es braucht sowohl ein Verständnis für den größeren Rahmen, in den die Siedlungsentwässerung eingebettet ist, als auch für die technischen Aspekte der unterschiedlichen Technologien (Butler und Davis 2010).

#### 5.5.5.1 Entwässerungssysteme

Die Siedlungsentwässerung unterscheidet die getrennte (Trennverfahren) und gemeinsame (Mischverfahren) Sammlung und Ableitung von Schmutz- bzw. Niederschlagswasser. Laut ÖNORM B 2508 (Austrian Standards International 2010) ist in Österreich für Ortschaften mit weniger als 500 Einwohnerinnen und Einwohnern eine Trennkanalisation verpflichtend. Das Trennsystem ist in Österreich vorherrschend. Etwa 62% des gesamten öffentlichen Kanalnetzes sind Schmutzwasserkanäle, 12% Regenwasserkanäle, und rund 26% sind als Mischwasserkanäle ausgeführt (ÖWAV 2015).

Neben dem Schutz der öffentlichen Gesundheit und Sicherheit dient die Siedlungs-entwässerung auch dem Umweltschutz und der nachhaltigen Entwicklung (ÖNORM EN 752, siehe Austrian Standards International 2017). Besonders in der Niederschlagswasserbewirtschaftung werden in den letzten Jahren zunehmend naturnahe Systeme verwendet, welche vermehrt auf lokale Maßnahmen zur Rückhaltung (Retention) und Versickerung (Infiltration) des Niederschlagswassers setzen. Der Abfluss aus dem urbanen Raum wird dadurch verringert bzw. verzögert. Eine naturnahe Regenwasserbewirtschaftung bietet zusätzliche Vorteile (z.B. Verbesserung des lokalen Mikroklimas, Erhöhung der Biodiversität, Steigerung der Lebensqualität).

### 5.5.5.2 Entwässerungsplanung

Das Entwässerungssystem außerhalb von Gebäuden besteht aus mehreren Komponenten (z.B. Kanalrohre, Schächte, Pumpwerke, Mischwasserentlastungsanlagen). Je nach System können diese unterschiedlich ausgeführt sein. Es gibt jedoch generelle Anforderungen. Rohrleitungen und Verbindungen müssen wasserdicht sein, um den Austritt von Abwasser in den umgebenden Boden, aber auch den Eintritt von Fremdwasser in die Kanalisation zu verhindern. In Österreich müssen Schmutzwasserleitungen in ausreichender Tiefe verlegt werden, um den Frostschutz zu gewährleisten. Die Lage der Entwässerungsleitungen ist so zu planen, dass möglichst eine Ableitung im freien Gefälle realisierbar ist. Die Materialien müssen chemisch und physikalisch beständig sein. Bei der Errichtung von Entwässerungssystemen ist auf Kosteneffizienz und Dauerhaftigkeit zu achten.

### 5.5.6 Abwasserreinigung

Die Abwasserreinigung befasst sich mit der Entfernung unerwünschter Schmutzstoffe sowie deren Aufbereitung für die Entsorgung oder Nutzung. In Österreich baut die Abwasserreinigung auf einem kombinierten Ansatz aus Emissions- und Immissionsbegrenzungen auf, die dem Gewässerschutz dienen. Sie zielt darauf ab, einen Mindestreinigungsgrad des Abwassers sicherzustellen. Gleichzeitig gibt es Qualitätsstandards für das Gewässer, in welches das gereinigte Abwasser eingeleitet wird. In Österreich sind die Entfernung von Kohlenstoffverbindungen und die Nitrifikation (Stickstoffumwandlung von Ammonium zu Nitrat) gesetzlich vorgeschrieben. Je nach Größe der Anlage müssen auch Stickstoff sowie Phosphor entfernt werden (AAEV 1996). In Zukunft ist mit Erweiterungen der bestehenden Reinigungsanforderungen zu rechnen (z.B. bei den Spurenstoffen).

### 5.5.6.1 Mechanische Abwasserreinigung

Die erste Reinigungsstufe in einer Kläranlage ist die mechanische Abwasserreinigung. Sie dient als Vorbereitung (Vorreinigung, Vorklärung) für die eigentliche Reinigung des Abwassers. Hierbei kommen ausschließlich mechanische Apparate (Rechen, Siebe) und physikalische Prozesse, wie die Ablagerung von Teilchen durch die Schwerkraft (Sedimentation) und die Entfernung von leichten Feststoffen mittels Aufschwimmen (Flotation), zum Einsatz. In der Vorreinigung entfernt man Grobstoffe, Sand und Fett aus dem Abwasser, die sich negativ auf den Betrieb der Anlage auswirken können. Die Vorklärung dient zur Abtrennung sedimentierbarer Schmutzstoffe. Dies schützt und entlastet die anderen Verfahrensstufen, u.a. da der Sauerstoffbedarf in der biologischen Stufe reduziert werden kann. Der in der Vorklärung anfallende Schlamm muss einer Schlammbehandlung zugeführt werden (Gujer 2007). Die Sedimentation bestimmter Stoffe kann durch die chemische Abwasserreinigung noch verstärkt werden. Durch die Zugabe von Chemikalien (z.B. von Metallsalzen, Polyelektrolyten) kommt es zur Fällung und Flockung unterschiedlicher Substanzen. Ein wichtiges Einsatzgebiet der chemischen Abwasserreinigung ist die Phosphatfällung zur Entfernung von Phosphor.

### 5.5.6.2 Biologische Abwasserreinigung

Die zweite Stufe stellt die biologische Abwasserreinigung dar. Dabei werden die natürlichen Selbstreinigungskräfte von Gewässern und Böden genutzt, indem in der Natur vorkommende, biologische Prozesse technisch intensiviert werden. Alle Verfahren der biologischen Reinigung nutzen den Schmutzstoffabbau durch Mikroorganismen. Die Verfahren unterscheiden sich in den Milieubedingungen (d.h., ob Sauerstoff benötigt wird (aerob) oder nicht (anaerob)), in der Lage der Biomasse (frei schwebend (suspendiert) oder festsitzend) und im Einsatz von Energie in der Reinigung (intensiv oder extensiv). Je nach Anlagengröße und Randbedingungen kommen unterschiedliche Technologien zum Einsatz (für eine detaillierte Beschreibung siehe Gujer 2007).

In Österreich werden mehr als 90% der ca. 1.800 Anlagen mit einer Ausbaupazität von mehr als 50 Einwohnerwerten (EW)<sup>1</sup> als Belebungsanlagen ausgeführt. Belebungsanlagen sind aerobe, intensive Reinigungsanlagen mit suspendierter Biomasse. Die restlichen 10% sind Festbetтанlagen mit festsitzender Biomasse (ÖWAV 2015). Bei Anlagen mit weniger als 50 EW (Kleinkläranlagen) dominieren ebenfalls Belebungsanlagen, jedoch spielen hier auch bepflanzte Bodenfilter (Pflanzenkläranlagen) eine wichtige Rolle. Diese stellen ca. 20% der Anlagen (Langergraber et al. 2018). Be-

<sup>1</sup> Der Einwohnerwert (EW) ist ein Vergleichswert für die in Abwässern enthaltenen Schmutzfrachten. Er wird genutzt, um die Belastung bzw. die Ausbaupazität von Kläranlagen auszudrücken. Ein Einwohnerwert von 1 entspricht der mittleren, täglich entstehenden Schmutzfracht des häuslichen Abwassers einer Einzelperson.

pflanzte Bodenfilter sind aerobe, extensive Verfahren mit festsitzender Biomasse. Insgesamt gibt es in Österreich ca. 27.500 Kleinkläranlagen mit einer Ausbaupkapazität von ca. 260.000 EW (Langergraber et al. 2018). In Bezug auf die österreichweite Ausbaupkapazität haben Kleinkläranlagen damit eine untergeordnete Bedeutung, sind aber in manchen Gebieten beispielsweise aus technischen bzw. finanziellen Gründen geeigneter als zentrale Anlagen.

### 5.5.6.3 Schlammbehandlung

Bei der Schlammbehandlung wird der während der mechanischen und biologischen Reinigung anfallende Klärschlamm für die weitere Nutzung oder Entsorgung aufbereitet. In den einzelnen Schritten (Eindickung, Hygienisierung, Stabilisierung, Entwässerung) werden unterschiedliche Technologien genutzt. Die Eindickung dient zur Reduktion des Wassergehalts und somit des Volumens. Die Hygienisierung ist v.a. bei der landwirtschaftlichen Nutzung wichtig. Die Übertragung von Krankheitserregern durch den Klärschlamm soll verhindert werden. Bei der Stabilisierung wird der Gehalt an organischen Substanzen reduziert, um die weitere biologische Umsetzung zu verhindern. Bei der anaeroben Stabilisierung (Faulung) wird zusätzlich Faulgas gewonnen. Die aerobe Stabilisierung findet simultan oder getrennt von der biologischen Reinigung statt. Die Entwässerung kann natürlich und mechanisch erfolgen (Gujer 2007).

In Österreich ist das gängigste Verfahren die simultan aerobe Stabilisierung des Klärschlammes. Rund 30% der Anlagen mit einer Ausbaupkapazität von mehr als 5.000 EW sind mit einer anaeroben Schlammfaulung ausgestattet. Je größer die Ausbaupkapazität, desto häufiger kommt die anaerobe Schlammfaulung zum Einsatz. In Österreich werden mehr als 50% des jährlich anfallenden Klärschlammes verbrannt, rund 15% wird in der Landwirtschaft verwertet, der Rest landet in der Kompostierung, im Landschaftsbau, im Zwischenlager oder auf der Deponie (ÖWAV 2015).

### 5.5.6.4 Ressourcenorientierte Konzepte der Abwasserreinigung

Die konventionelle Abwasserreinigung stellt aufgrund der Komplexität und des Energiebedarfs keine universelle Lösung für die Abwasserentsorgung dar. In den vergangenen Jahrzehnten wurden daher Konzepte entwickelt, die auf die nachhaltige Nutzung von Abwasser abzielen. Hierbei werden die Abwasserinhaltsstoffe, die aus dem Wasser entfernt werden müssen, nicht als Verschmutzung gesehen, sondern als Ressource für eine weitere Nutzung. Bei den ressourcenorientierten Ansätzen werden die Abwasserteilströme einzeln betrachtet. Dabei wird Abwasser je nach Verschmutzung grob in Grauwasser (ohne Abwasser aus der Toilette, z.B. von der Dusche oder Waschmaschine), Gelbwasser (mit Urin), Braunwasser (mit Fäkalien) oder Schwarzwasser

(mit Urin und Fäkalien) eingeteilt. Die Betrachtung umfasst die Erfassung, Ableitung sowie deren gezielte Aufbereitung. Durch die getrennte Behandlung sollen u.a. Nährstoffe vermehrt in die Landwirtschaft rückgeführt, Energie aus Biogas gewonnen und der Trinkwasserverbrauch durch eine effiziente Wassernutzung und die Wiederverwendung von gereinigtem Abwasser reduziert werden. Die Konzepte sollen zur Schließung von Stoff- und Wasserkreisläufen beitragen (DWA 2014).

#### **Fallbeispiel 5.5.2: Energierückgewinnung aus Abwasser**

Im Abwasser ist sowohl chemische als auch thermische Energie enthalten. Die chemische Energie tritt in Kohlenstoffverbindungen auf und kann in Form von Klärgas, welches durch anaerobe Stabilisierung entsteht, genutzt werden. Die thermische Energie stammt v.a. aus warmen Abwässern von Haushalten oder Gewerbe- und Industriebetrieben. Die Energie kann sowohl in der Kläranlage selbst als auch extern in umliegenden Gemeinden genutzt werden. Die Kläranlage kann somit als regionale Energiezelle betrachtet werden.

Eine Analyse des thermischen Energiepotenzials aus dem Abwasser der Kläranlagen mit einer Ausbaupkapazität von mehr als 2.000 EW in Österreich hat gezeigt, dass jährlich rund 3.144 GWh<sup>2</sup> auf Kläranlagen zur Verfügung stehen, die für eine externe Nutzung geeignet bzw. bedingt geeignet sind (Neugebauer et al. 2015). Das Energiepotenzial entspricht ca. 37% der Wärmeerzeugung in österreichischen Heizkraftwerken im Jahr 2012, die über keine Kraft-Wärme-Kopplung verfügen.

<sup>2</sup> 1 Gigawattstunde (GWh) = 10<sup>6</sup> Kilowattstunden (kWh) = 3,6 Terajoule (TJ)

### **5.5.7 Zusammenfassung**

In Österreich gibt es weitgehend eine gut funktionierende Wasserversorgung, was die Wassergewinnung, -aufbereitung, -verteilung und -speicherung mit einschließt. Die Qualität ist durch rechtliche Grundlagen (z.B. WRG, TWV) und eine entsprechende Aufbereitung gesichert. Planerische Grundlage ist der Wasserbedarf, wobei besonders auf dessen zukünftige Entwicklung und den Einklang mit dem nachhaltig nutzbaren Dargebot zu achten ist.

Neben der Wasserversorgung ist eine gesicherte Siedlungsentwässerung ein weiterer, wichtiger Teilbereich der Siedlungswasserwirtschaft. Sie dient der Ableitung von häuslichem und gewerblichem Abwasser sowie von Niederschlagswasser und kann im Misch- oder Trennverfahren erfolgen. Der Großteil des Abwassers wird in Kläranlagen zuerst mechanisch und anschließend biologisch gereinigt. Der dabei anfallende Klärschlamm wird weiter behandelt und entsorgt.

Die aktuellen Themen der Siedlungswasserwirtschaft gehen weit über die rein lehrbuchmäßige Bemessung und den Bau siedlungswasserwirtschaftlicher Infrastruktur hinaus. Sie umfassen u.a. die Anlageninstandhaltung, die vorausschauende Erneuerungsplanung, die Berechnung von Investitionserfordernissen, die konkurrierenden Nutzungen

und Beeinträchtigungen von Wasserressourcen (z.B. durch Düngemittel oder Pestizide), die nachhaltige Ressourcennutzung, die Entfernung von Spurenstoffen und Medikamentenrückständen in Kläranlagenabläufen und Oberflächenwässern und nicht zuletzt den globalen Klimawandel und seine lokalen Auswirkungen.

Der Fachbereich der Siedlungswasserwirtschaft nutzt u.a. verschiedene Grundlagen wie z.B. den konstruktiven Ingenieurbau, die Hydrologie, die Grundwasserwirtschaft, die Hydraulik und hydraulische Modellierung und bezieht weiterführende Themen wie Umwelt- und Ressourcenschutz, Projektplanung und strategische Planung, Betriebswirtschaft, Infrastrukturmanagement sowie nationales und internationales Recht ein.

Aufgrund der Vielfalt der notwendigen Kenntnisse und Fertigkeiten für die Dimensionierung, den Bau und den Betrieb von Wasserversorgungs- und Abwasserentsorgungsanlagen und die damit in engem Zusammenhang stehenden Verbund- und Querschnittsthemen wird im UBRM-Studium nur ein allgemeiner Überblick zu den vielfältigen Aufgaben, Zielen und Strukturen der Siedlungswasserwirtschaft und des Gewässerschutzes gegeben.

### Literatur

- AAEV (1996): Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft über die allgemeine Begrenzung von Abwasseremissionen in Fließgewässer und öffentliche Kanalisationen (AAEV). i.d.F. Mai 2019, zuletzt geändert mit BGBl. II Nr. 128/2019.
- Austrian Standards International (2010): ÖNORM B 2508. Kläranlagen – Kleine Kläranlagen für 51 bis 500 Einwohnerwerte. Wien.
- Austrian Standards International (2017): ÖNORM EN 752. Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden – Kanalmanagement. Wien.
- Bundeskanzleramt Österreich (2016): Beiträge der Bundesministerien zur Umsetzung der Agenda 2030 für eine nachhaltige Entwicklung durch Österreich – Darstellung 2016. Wien. Verfügbar in: <https://www.bundeskanzleramt.gv.at/nachhaltige-entwicklung-agenda-2030> [Abfrage am 10.5.2019].
- Butler, D. and Davis, J. W. (2010): Urban Drainage. 3rd edition. London, New York: Spon Press.
- DWA (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.) (2014): Grundsätze für die Planung und Implementierung Neuartiger Sanitärsysteme (NASS). Arbeitsblatt DWA-A 272. Hennef: DWA.
- Gujer, W. (2007): Siedlungswasserwirtschaft. 3., bearb. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- Langergraber, G., Pressl, A., Kretschmer, F. und Weissenbacher, N. (2018): Kleinkläranlagen in Österreich – Entwicklung, Bestand und Management. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 70, 11-12, 560–569. <https://doi.org/10.1007/s00506-018-0519-z>.
- MA 31 – Wiener Wasser (Magistratsabteilung 31 – Wiener Wasser) (2019): Wasserversorgung in Wien. Verfügbar in: <https://www.wien.gv.at/wienwasser/versorgung/> [Abfrage am 13.5.2019].
- Neugebauer, G., Kretschmer, F., Kollmann, R., Narodoslawsky, M., Ertl, T., and Stoeglehner, G. (2015): Mapping thermal energy resources potentials from wastewater treatment plants. Sustainability, 7, 12988–13010. <https://doi.org/10.3390/su71012988>.
- Neunteufel, R., Richard, L. und Perfler, R. (2012): Wasserverbrauch und Wasserbedarf. Auswertung empirischer Daten zum Wasserverbrauch. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Sektion VII Wasser.

- ÖLMB (2007): Österreichisches Lebensmittelbuch. IV. Auflage. Codexkapitel / B 1 / Trinkwasser. i.d.F. Juli 2019, zuletzt geändert mit BMASGK-75210/0004-IX/B/13/2019. Wien: Bundesministerium für Arbeit, Soziales, Gesundheit und Konsumentenschutz (BMASGK). Verfügbar in: <http://www.lebensmittelbuch.at/>. [Abfrage am 20.7.2019].
- ÖVGW (Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach) (2018): Die österreichische Trinkwasserwirtschaft – Branchendaten und Fakten. Ausgabe 3/2018. Wien. Verfügbar in: <https://www.ovgw.at/wasser/ressource/> [Abfrage am 13.5.2019].
- ÖWAV (Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband) (2015): Branchenbild der österreichischen Abwasserwirtschaft 2016. Wien. Verfügbar in: <https://www.oewav.at/Page.aspx?target=196960> [Abfrage am 14.5.2019].
- Rautenberg, J., Fritsch, P., Hoch, W., Merkl, G., Otilinger, F., Weiß, M. und Wricke, B. (2014): Mutschmann/Stimmelmayer – Taschenbuch der Wasserversorgung. 16., vollst. überarb. und aktual. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- TWV (2001): Verordnung des Bundesministers für soziale Sicherheit und Generationen über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung – TWV), i.d.F. Dez. 2017, zuletzt geändert mit BGBl. II Nr. 362/2017.
- Umweltbundesamt (2015): Plastik in der Donau. Wien. Verfügbar in: <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0547.pdf> [Abfrage am 10.5.2019].
- Vanham, D. (2012): Der Wasserfußabdruck Österreichs: Wie viel Wasser nützen wir tatsächlich, und woher kommt es? Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 64, 1, 267–276. <https://doi.org/10.1007/s00506-011-0370-y>.
- WRG (1959): Wasserrechtsgesetz 1959. i.d.F. Nov. 2018, zuletzt geändert mit BGBl. I Nr. 73/2018.

**OpenAccess** Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung – Nicht kommerziell 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die nicht-kommerzielle Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist auch für die oben aufgeführten nicht-kommerziellen Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

