

## Methoden Verkehrsökonomie für Master-Studierende

Winter semester 2021/22, Solutions to Tutorial No. 13

### Lösungsvorschlag zu Aufgabe 13.1: LCA-Analyse eines Benzin- und E-Fahrzeugs

- (a) Sachbilanz Benzinauto über alle drei Phasen (ersten 5 Komponenten in kg, die letzte in Liter):

$$\vec{y}^s = \vec{y}_{\text{Herst}} + \vec{y}_{\text{Betr}} + \vec{y}_{\text{Recycl}} = \begin{pmatrix} 900 \\ 100 \\ 100 \\ 30 + 20 \\ 12 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 100 \\ 0 \\ 0 \\ 3 * 4 * 5 \\ 24 \\ 200\,000 * 0.06 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -180 \\ -40 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 820 \\ 60 \\ 100 \\ 110 \\ 36 \\ 12\,000 \end{pmatrix}$$

- (b) Direkte Emissionen bei Laufleistung  $L = 200\,000$  km:

$$e_1^{\text{dir}} = 12\,000 \text{ Liter} * 2.39 \text{ kgCO}_2/\text{Liter} = 28\,680 \text{ kg}$$

- (c) Indirekte Emissionen über die Sachbilanz (in kg CO<sub>2</sub>):

$$e_1^{\text{sachb}} = (3280 + 1800 + 200 + 220 + 720 + 4800) \text{ kg} = 11\,020 \text{ kg}$$

Die ersten fünf Emissionsfaktoren  $C_{1j}$ ,  $j = 1, \dots, 5$  sind einheitenlos, da sie ein Verhältnis "kg durch kg" definieren. Der letzte Faktor beschreibt die "well-to-tank" (w2t) Emissionen in kg CO<sub>2</sub> pro Liter Benzin an der Tankstelle, Dies beinhaltet alle Emissionen durch die Förderung, Transport zu den Raffinerien, Herstellung von Benzin in den Raffinerien und der Transport des Benzins zu den Tankstellen.

Für die reinen Material- CO<sub>2</sub> Emission (ohne w2t, aber mit Reparaturmaterial) erhalten wir

$$e_1^{\text{mat}} = \sum_{j=1}^5 C_{1j} y_j = 6\,220 \text{ kg CO}_2.$$

Da auch die w2t-Emissionen an den Betrieb, nicht die Herstellung/Reparatur gekoppelt sind, erhalten wir für die Gesamtemissionen durch den Fahrbetrieb

$$e_1^{\text{driving}} = e_1^{\text{dir,driving}} + e_1^{\text{indir,driving}} = 28\,680 \text{ kg} + 12\,000 \text{ liters} * 0.4 \text{ kg/liter} = 33\,480 \text{ kg}$$

Verglichen mit den Material-Emissionen durch Herstellung und Reparatur sind die Betriebsemissionen fünf mal (!) höher.

(d) Die Gesamt-LCA-Emissionen während der Lebensdauer betragen

$$e_1 = e_1^{\text{dir,driving}} + e_1^{\text{indir}} = e_1^{\text{driving}} + e_1^{\text{mat}} = 39\,700 \text{ kgCO}_2.$$

Um die Gesamtemissionen mit der Emissionsmatrix zu berechnen, die dann auch die direkten Emissionen enthalten muss, redefinieren wir den Benzin-Emissionsfaktor, so dass er auch die w2t-Emissionen enthält:

$$\tilde{C}_{16} = C_{16}^{\text{w2t}} + C_{16}^{\text{t2w}} = (0.4 + 2.39) \text{ kg/l} = 2.79 \text{ kg/l}.$$

Mit der neuen Zeile der Emissionsfaktorenmatrix, ( $\tilde{C}_{1j} = (4, 30, 2, 2, 20, 2.79 \text{ kg/l})$ ), erhalten wir dasselbe resultat wie oben:

$$e_1^{\text{ICV}} = \sum_{j=1}^6 \tilde{C}_{1j} y_j^s = 39\,700 \text{ kgCO}_2.$$

(e) Direkte Verbrennungsemissionen, indirekte LCA-Emissionen und Gesamtemissionen pro Kilometer:

$$\begin{aligned} e_1^{\text{dir,spez}} &= \frac{e_1^{\text{dir}}}{L} = 143.5 \text{ g/km}, \\ e_1^{\text{indir,spez}} &= \frac{e_1 - e_1^{\text{dir}}}{L} = 55.0 \text{ g/km}, \\ e_1^{\text{spez}} &= \frac{e_1}{L} = 198.5 \text{ g/km}. \end{aligned}$$

Während des Autolebens fallen mehr als 70 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die direkte Verbrennung und etwas weniger als 30 % indirekt (durch die Herstellungsemissionen von Benzin und die Produktion/Entsorgung des Autos selbst) an.

Gesamtemissionen während der Lebenszeit:

$$e_1 = e_1^{\text{dir}} + e_1^{\text{sachb}} = 39\,700 \text{ kg}.$$

(f) Gemäß den Angaben ist die Sachbilanz des E-Fahrzeug (die ersten vier Komponenten sind wie beim Benzinfahrzeug) wie folgt:

$$(\bar{y}^s)_{\text{el}} = \begin{pmatrix} 820 \text{ kg Eisen/Stah} \\ 60 \text{ kg Aluminium} \\ 100 \text{ kg Kunststoff} \\ 110 \text{ kg Gummi} \\ 600 \text{ kg Li-Akkus} \\ 0 \text{ Liter Benzin} \\ 0.2 \text{ kWh/km} * 200\,000 \text{ km} = 40\,000 \text{ kWh Strom} \end{pmatrix}.$$

Da das E-Fahrzeug lokal emissionsfrei ist, sind die Emissionen sind nun natürlich komplett indirekt ( $e_1^{\text{dir}} = 0$ ):

$$e_1^{\text{sachb}} = (3280 + 1800 + 200 + 220 + 12\,000 + 0 + 22\,400) \text{ kg} = 39\,900 \text{ kg}$$

Dies entspricht kilometerbezogen

$$\frac{e_1}{L} = \frac{e_1^{\text{sachb}}}{L} = 199.5 \text{ g/km.}$$

Das E-Fahrzeug hat beim Deutschlandmix also weitgehend die gleichen CO<sub>2</sub>-Emissionen wie der Benziner!

(g) Es ändert sich nur der letzte Emissionsfaktor  $C_{71}$  auf 1000 g/kWh bzw. 100 g/kWh:

- China-Mix:  $\frac{e_1}{L} = 287.5 \text{ g/km}$ ,
- Öko-Mix:  $\frac{e_1}{L} = 107.5 \text{ g/km}$ .

Die Frage, ob ein E-Auto emissionsarm ist, hängt also wesentlich vom Energiemix ab! Mit dem Öko-Mix, der von Ländern wie Norwegen bereits erreicht bzw. weit unterboten wird, sind die *Gesamtemissionen* deutlich geringer als allein die direkten Emissionen des Benziners, mit dem China-Mix hingegen erhöhen sich die *Gesamtemissionen* um 50 %!