

# SIA 380/4 Elektrische Energie im Hochbau

## Energiebedarf von Aufzugsanlagen

Die energetischen Vorgänge während der Fahrt eines Aufzugs können am einfachsten mit den Begriffen der potentiellen und der kinetischen Energie beschrieben werden. Als positiv betrachten wir in der Folge Energie, die vom Aufzug aufgenommen wird.

### 1 Traktionsaufzug

Betrachten wir zuerst den Fall eines Traktionsaufzugs mit Gegengewicht. Das Kabinengewicht beträgt das Ein- bis Dreieinhalbfache der maximalen Nutzlast. Das Gegengewicht  $M_{Gg}$  wird im allgemeinen gleich dem Kabinengewicht  $M_K$  plus die Hälfte der maximalen Nutzlast  $M_{mNL}$  dimensioniert.<sup>1</sup>

$$M_K = x * M_{mNL}$$

$$x = 1.5 \div 2 \quad \text{für Personenaufzüge}$$

$$x = 1 \div 1.5 \quad \text{für Transportaufzüge}$$

$$x = 2 \div 3.5 \quad \text{für Hochgeschwindigkeitsaufzüge}$$

$$M_G = M_K + 0.5 * M_{mNL} = (x + 0.5) * M_{mNL}$$

#### 1.1 Kinetische Energie:

Für die kinetische Energie  $E_k$  ist die gesamte bewegte Masse  $M$  massgebend, das ist die Masse der Kabine  $M_K$ , des Gegengewichts  $M_{Gg}$  und der effektiven Nutzlast  $M_{eNL}$ .

$$M = M_K + M_{Gg} + M_{eNL} = (2*x + 0.5) * M_{mNL} + M_{eNL}$$

$$E_k = M * v^2 / 2 = [(2*x + 0.5) * M_{mNL} + M_{eNL}] * v^2 / 2$$

$v$  Geschwindigkeit des Aufzugs.

Die kinetische Energie muss beim Anfahrvorgang in den Aufzug hineingesteckt werden. Beim Abbremsvorgang wird sie wieder frei.

#### 1.2 Potentielle Energie:

Bei der potentiellen Energie  $E_p$  ist das Gewicht der bewegten Masse massgebend. Das Gewicht ist gleich dem Kabinengewicht  $M_K * g$  und dem Gewicht der effektiven Nutzlast  $M_{eNL} * g$  abzüglich dem Gegengewicht  $M_{Gg} * g$ .

$$\text{Erdbeschleunigung } g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

Damit ergibt sich für das Gewicht:

$$G = - (M_K + M_{eNL} - M_{Gg}) * g = - (M_{eNL} - 0.5 * M_{mNL}) * g$$

Das System ist bei einer Kabinenbeladung  $M_{eNL}/M_{mNL} = 0.5$  im Gleichgewicht; das Gewicht ist gleich Null. Bei leerer Kabine ist das Gewicht negativ (abwärtsgerichtete Kraft), bei voller Kabine positiv (aufwärtsgerichtete Kraft).

$$E_p = - G * h_{eff} = (M_{eNL} - 0.5 * M_{mNL}) * g * h_{eff}$$

$h_{eff}$  effektive Förderhöhe (positiv für Aufwärtsfahrt, negativ für Abwärtsfahrt)

Die potentielle Energie ist bei einem stark beladenen Aufzug für die Aufwärtsfahrt positiv; es muss Energie in den Aufzug hineingesteckt werden. Bei wenig beladenem Aufzug ist die potentielle Energie für die Aufwärtsfahrt negativ; es wird Energie frei. Bei Abwärtsfahrt ist es umgekehrt.

#### 1.3 Verhältnis der kinetischen zur potentiellen Energie

$$E_k / E_p = [(2*x + 0.5) * M_{mNL} + M_{eNL}] * v^2 / [2 * (M_{eNL} - 0.5 * M_{mNL}) * g * h_{eff}]$$

<sup>1</sup> Damit wird die Leistung optimiert. Für eine energetische Optimierung müsste das Gegengewicht gleich dem Kabinengewicht plus die mittlere Nutzlast, die im allgemeinen wesentlich kleiner als die Hälfte der Nutzlast ist, dimensioniert werden, wie weiter unten gezeigt wird.

Für die am häufigsten vorkommende Leerfahrt ( $M_{eNL} = 0$ ), einer effektiven Förderhöhe von 10 m,  $x = 2$  und einer Geschwindigkeit von 1 m/s ergibt sich:

$$E_k / E_p = 4.5 \cdot v^2 / (g \cdot h_{eff}) = 0.055.$$

Die kinetische Energie ist für eine Leerfahrt also wesentlich kleiner als die potentielle Energie. Das gilt nicht für eine Fahrt mit halber Beladung, da für diese Fahrt die potentielle Energie gleich null und die kinetische Energie leicht grösser als bei der Leerfahrt ist.

## 2 Hydraulikaufzug

Bei Hydraulikaufzügen entfällt das Gegengewicht. Für die potentielle und die kinetische Energie sind daher dieselben Massen massgebend, nämlich die Masse der Kabine plus diejenige der effektiven Nutzlast.

$$x = 1 \div 1.5$$

$$E_k = (M \cdot v^2) / 2 = [(M_K + M_{eNL}) \cdot v^2] / 2 = [(x \cdot M_{mNL} + M_{eNL}) \cdot v^2] / 2$$

$$E_p = -G \cdot h_{eff} = (M_K + M_{eNL}) \cdot g \cdot h_{eff} = (x \cdot M_{mNL} + M_{eNL}) \cdot g \cdot h_{eff}$$

Das Gewicht ist immer negativ (abwärtsgerichtete Kraft). Für eine Aufwärtsfahrt ist die potentielle Energie immer positiv, für die Abwärtsfahrt immer negativ. Bei gleichem Kabinengewicht und gleicher Geschwindigkeit ist die kinetische Energie eines Hydraulikaufzugs immer kleiner als diejenige eines Traktionsaufzugs, die potentielle Energie ist immer grösser.

Für eine effektive Förderhöhe von 10 m und eine Geschwindigkeit von 1 m/s gilt unabhängig von der Kabinenbeladung:

$$E_k / E_p = v^2 / (2 \cdot g \cdot h_{eff}) = 0.005$$

Beim Hydraulikaufzug ist die kinetische Energie daher bei normal vorkommenden Geschwindigkeiten vernachlässigbar.

## 3 Aufnahme und Abgabe von Energie

Die positiven und negativen Beiträge der potentiellen und kinetischen Energie heben sich bei einer Rundfahrt des Aufzuges auf. Der Energiebedarf einer Aufzugsanlage ist daher – neben dem nicht idealen Wirkungsgrad des Antriebssystems – darauf zurückzuführen, dass die im System frei werdenden Energien – negative potentielle und kinetische Energien – nicht oder nicht vollumfänglich zurückgewonnen werden können. Bei der Frage nach der Rückgewinnung ist zu unterscheiden zwischen Phasen, in denen die Summe der potentiellen und kinetischen Energie negativ ist und das System als Ganzes Energie frei gibt, und Phasen, in welchen die Summe positiv, aber die potentielle oder die kinetische Energie negativ ist.

Wenn die Summe von potentieller und kinetischer Energie negativ ist, kann diese Energie nur durch Umwandlung in elektrische Energie und Rückspeisung ins Netz zurückgewonnen werden. Das ist Rekuperation im eigentlichen Sinn. Sie hat einen beschränkten Wirkungsgrad  $\eta_R < 1$ .

Solange die Summe positiv ist, ist eine vollständige Umwandlung von potentieller in kinetischer Energie und umgekehrt möglich. Bei einer Fahrt mit positiver potentieller Energie muss am Anfang neben der potentiellen Energie auch die kinetische Energie aufgebracht werden. Am Schluss der Fahrt wird die letzte Wegstrecke bei reduzierter Traktion mit dem Schwung der Masse  $M$  zurückgelegt; die kinetische Energie wird in potentielle Energie umgewandelt. Der Energieaufwand ist gleich der potentiellen Energie; die kinetische Energie verursacht keinen Energieaufwand. Voraussetzung dafür ist, dass beim Abbremsvorgang die gesamte Leistung immer positiv bleibt.

Bei einer Fahrt mit negativer potentieller Energie – das Gewicht zeigt in der Richtung der Fahrt – erfolgt beim Anfahren die Beschleunigung bei reduzierter Traktion teilweise durch das Gewicht. Die kinetische Energie am Beginn der Fahrt wird durch potentielle Energie gedeckt; diesmal unter der Voraussetzung, dass die gesamte Leistung immer negativ bleibt. Das heisst, die Kraft am Motor darf beim Abbremsvorgang resp. beim Anfahrvorgang das Vorzeichen nicht wechseln. Sonst kann nur ein Teil der Energie oder gar keine Energie umgewandelt werden.

Die Kraft, welche für die potentielle Energie aufgebracht werden muss, ist gleich dem Gewicht  $G$ . Die Kraft, die für die kinetische Energie aufgebracht werden muss, ist bei einer angenommenen konstanten Beschleunigung  $a$  gleich  $M \cdot a$ . Aus Komfortgründen muss diese Beschleunigung immer wesentlich kleiner sein als die

Erdbeschleunigung  $g$ . Andernfalls würden die Liftbenützer beim Abbremsen einer Fahrt nach oben resp. beim Anfahren einer Fahrt nach unten in der Kabine schweben! Ein typischer Wert für  $a$  ist  $1.1 \text{ m/s}^2$ .

Man kann die Vorgänge auch mit dem Verlauf der Kräfte beschreiben. Bei einer Fahrt mit positiver potentieller Energie muss während der Beschleunigungsphase eine Kraft aufgebracht werden, welche gleich dem Gewicht plus der Beschleunigungskraft  $M \cdot a$  ist. Bei Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit ist die Kraft gleich dem Gewicht. Bei der Verzögerung am Schluss der Fahrt ist die Kraft gleich dem Gewicht minus die Beschleunigungskraft. Wenn das Gewicht grösser ist als die Beschleunigungskraft, ist die Kraft immer aufwärtsgerichtet. Wenn das Gewicht kleiner ist als die Beschleunigungskraft, ändert sich die Richtung der Kraft; sie ist entgegengesetzt zur Richtung der Fahrt; die Leistung wird negativ.

Massgebend für die Rückgewinnung der kinetischen Energie ist daher das Kraftverhältnis  $k = |G| / |M \cdot a|$ . Wenn  $k > 1$ , d.h. wenn das Gewicht absolut immer grösser als die Kraft zur Beschleunigung oder Verzögerung, zeigt die Kraft während der ganzen Fahrt in Richtung des Gewicht. Es gibt keinen Vorzeichenwechsel; die kinetische Energie wird vollumfänglich in potentielle Energie verwandelt. Wenn  $k < 1$ , kann die kinetische Energie am Ende der Fahrt (Fahrt mit positiver potentieller Energie) nur zu einem Anteil von  $k$  in kinetische Energie umgewandelt werden. Der Anteil von  $(1 - k)$  muss zusätzlich zur potentiellen Energie durch das Antriebssystem aufgebracht werden.

Bei einer Fahrt mit negativer potentieller Energie und  $k > 1$ , wird die kinetische Energie am Anfang der Fahrt aus der potentiellen Energie gewonnen. Bei  $k < 1$ , muss sie zu einem Anteil von  $(1 - k)$  durch das Antriebssystem aufgebracht werden.

### 3.1 Hydraulikaufzug

$$k = G / (M \cdot a) = g \cdot (M_K + M_{eNL}) / a \cdot (M_K + M_{eNL}) = g / a.$$

$k$  ist immer wesentlich grösser als 1. Beim Hydraulikaufzug ist daher nur die potentielle Energie massgebend

### 3.2 Traktionsaufzug

$$k = G / (M \cdot a) = (M_{eNL} - 0.5 \cdot M_{mNL}) \cdot g / [(2 \cdot x + 0.5) \cdot M_{mNL} + M_{eNL}] \cdot a$$

Für eine halb beladene Kabine ist das Gewicht und damit  $k = 0$ . Damit ist die potentielle Energie Null; die ganze kinetische Energie muss durch das Antriebssystem aufgebracht werden. Bei voller oder leerer Kabine ist das Gewicht am grössten. Je nach Gewichtsverhältnissen kann  $k$  kleiner oder grösser als 1 sein. Beim Traktionsaufzug spielt also die kinetische Energie je nach Kabinenbeladung eine Rolle.

## 4 Berechnung des Elektrizitätsbedarfs pro Fahrt

### 4.1 Kabinenbelegung

Zur Berechnung des mittleren Elektrizitätsbedarfs pro Fahrt müssen Annahmen über die Kabinenbelegung getroffen werden:

Tabelle 2 Anteil der Fahrten mit einer bestimmten Kabinenbelegung  $P_{eff} / P_{NL}$

Kabinenbelegung	Fahrtrichtung	Anteil der Fahrten	
1.00	Auf	0 %	0 %
	Ab	0 %	
0.75	Auf	5 %	10 %
	Ab	5 %	
0.50	Auf	5 %	10 %
	Ab	5 %	
0.25	Auf	15 %	30 %
	Ab	15 %	
0.00	Auf	25 %	50 %
	Ab	25 %	

$P_{eff}$  und  $P_{NL}$  effektive resp. maximale Nutzlast in Personen à 75 kg

Daraus ergibt sich eine durchschnittliche Kabinenbelegung von  $0.2 \cdot P_{NL}$ .

## 4.2 Hydraulikaufzug

Massgebend ist nur die potentielle Energie. Die freiwerdende kinetische Energie wird in potentielle Energie umgewandelt.

$$E_F = E_p = (M_K + M_{eNL}) * g * h_{eff} = (x * M_{mNL} + M_{eNL}) * g * h_{eff}$$

Diese muss für alle Aufwärtsfahrten aufgebracht werden. Eine Rekuperation der bei den Abwärtsfahrten frei werdenden Energie ist nicht möglich.

Bei einer mittleren Kabinenbelegung von 0.2 ergibt sich ein Elektrizitätsbedarf pro Fahrt (als Durchschnitt einer Aufwärts- und Abwärtsfahrt) von:

$$E_F = M_{mNL} * g * (x + 0.2) * h_{eff} / 2 = P_{NL} * 75 \text{ kg} * (x + 0.2) * g * h_{eff} / 2$$

Für  $x = 1,2$  gilt:

$$E_F = P_{NL} * 75 \text{ kg} * 0,7 * g * h_{eff}$$

## 4.3 Traktionsaufzug

Wir berechnen in Tabelle 3 die potentielle Energie gewichtet mit den Annahmen für die Häufigkeit der Kabinenbeladung. Negative potentielle Energie wird vernachlässigt, da keine Rekuperation angenommen wird.

Tabelle 3 Berechnung der mittleren potentiellen Energie pro Fahrt

Kabinenbelegung = $P_{eff} / P_{NL}$	Fahrtrichtung	Anteil der Fahrten	$(M_{eNL} - 0.5 * M_{mNL}) / M_{mNL}$	$(M_{eNL} - 0.5 * M_{mNL}) / M_{mNL}$ gewichtet mit Anteil Fahrten
1.00	Auf	0 %	0.5	0
	Ab	0 %	0	0
0.75	Auf	5 %	0.25	0.0125
	Ab	5 %	0	0
0.50	Auf	5 %	0	0
	Ab	5 %	0	0
0.25	Auf	15 %	0	0
	Ab	15 %	0.25	0.0375
0.00	Auf	25 %	0	0
	Ab	25 %	0.5	0.125

Im gewichteten Durchschnitt ergibt sich eine gewichtete Kabinenbelegung von 0.175 (Summe der hintersten Kolonne).

$$E_p = 0.175 * M_{mNL} * g * h_{eff} = 0.175 * P_{NL} * 75 \text{ kg} * g * h_{eff}$$

Eine ähnliche Rechnung kann für die kinetische Energie gemacht werden. Angenommen wird ein Verhältnis Kabinengewicht zu Nutzlast  $x = 1.5$ .

Kabinenbelegung = $P_{eff} / P_{NL}$	Fahrtrichtung	Anteil der Fahrten	Masse: $(M_{eNL} + 3.5 * M_{mNL})$ geteilt durch $M_{mNL}$	k	wirks. Masse: Masse * $(1 - k)$ 0 für $k < 1$	wirksame Masse gewichtet mit Anteil Fahrten
1.00	Auf	0 %	4.5	0.99	0.04	0
	Ab	0 %	4.5	0.99	0.04	0
0.75	Auf	5 %	4.25	0.52	2.02	0.1
	Ab	5 %	4.25	0.52	2.02	0.1
0.50	Auf	5 %	4.0	0	4.0	0.2
	Ab	5 %	4.0	0	4.0	0.2
0.25	Auf	15 %	3.75	0.59	1.52	0.23
	Ab	15 %	3.75	0.59	1.52	0.23
0.00	Auf	25 %	3.5	1.27	0	0
	Ab	25 %	3.5	1.27	0	0

Für die kinetische Energie ergibt sich eine wirksame Kabinenbelegung von 1.06. Wenn diese Berechnung für verschiedene Werte von  $x$  durchgeführt wird, ergibt sich für die wirksame Kabinenbelegung angenähert ein Wert von  $(x - 0.4)$ .

$$E_k = P_{NL} * 75 \text{ kg} * (x - 0.4) * v^2 / 2$$

Für die Energie pro Fahrt – ohne Berücksichtigung des Wirkungsgrads des Antriebssystems und der Regelung, sowie ohne Rekuperation - ergibt sich:

$$E_F = P_{NL} * 75 \text{ kg} * [ \{0.175 * g * h_{eff}\} + \{(x - 0.4) * v^2 / 2\} ]$$

Unter denselben Voraussetzungen für  $x$ ,  $h_{eff}$  und  $v$  wie in 1.3 ergibt sich für die angenommene Verteilung der Kabinenbelegung ein Verhältnis von kinetischer Energie zu potentieller Energie von

$$E_k / E_p = (x - 0.4) * v^2 / 0.35 * g * h_{eff} = 0.046.$$

Ausser bei sehr hohen Geschwindigkeiten ist daher der Beitrag der kinetischen Energie zur Energie pro Fahrt vernachlässigbar. Daher ist die Energie pro Fahrt näherungsweise gleich:

$$E_F = P_{NL} * 75 \text{ kg} * 0.175 * g * h_{eff}$$

#### 4.2.3 Wirkungsgrad des Antriebs

Wegen des Wirkungsgrad des Antriebs  $\eta_A$  erhöht sich die Energie pro Fahrt um  $1/\eta_A$

#### 4.2.4 Rückspeisung überschüssiger Energie ins Netz

Der Elektrizitätsbedarf pro Fahrt reduziert sich gegenüber dem Fall mit konstanter Beschleunigung um den Faktor  $(1 - \eta_R)$ , wobei  $\eta_R$  der Rekuperationswirkungsgrad ist.

### 5 Anzahl Fahrten pro Aufzugsanlage

Die Anzahl Fahrten pro Aufzugsanlage  $F$  ergibt sich aus der Anzahl der Benutzer  $B$ , der Anzahl der Fahrten pro Benutzer und Jahr  $F_B$  und der durchschnittlichen Kabinenbeladung  $0,2 * P_{NL}$ .

Anzahl Fahrten pro Benutzer  $F_B * B$  dividiert durch die durchschnittliche Kabinenbeladung  $0,2 * P_{NL}$ .

$$F = B * F_B / (0,2 * P_{NL})$$

### 6 Elektrizitätsbedarfs pro Aufzugsanlage

Der Elektrizitätsbedarf pro Aufzugsanlage  $E_A$  ist gleich der Anzahl Fahrten  $F$  mal der Energie pro Fahrt  $E_F$  plus den Elektrizitätsbedarf für die Hilfsbetriebe  $E_{AH}$ .

$$E_A = F * E_F + E_{AH}$$

Da die Energie pro Fahrt  $E_F$  proportional  $P_{NL}$  und die Anzahl Aufzugsfahrten umgekehrt proportional zu  $P_{NL}$  ist, ist der Elektrizitätsbedarf pro Aufzugsanlage unabhängig von der Nutzlast  $P_{NL}$ .

#### 5.1 Für den Hydraulikaufzug

$$\begin{aligned} E_A &= \{B * F_B / (0,2 * P_{NL})\} * \{P_{NL} * 75 \text{ kg} * 0,7 * g * h_{eff} / \eta_A\} + E_{AH} \\ &= [F_B * B * 75 \text{ kg} * 3,5 * g * h_{eff} / \eta_A] + E_{AH} \end{aligned}$$

#### 5.2 Für den Traktionsaufzug

$$\begin{aligned} E_A &= \{B * F_B / (0,2 * P_{NL})\} * \{P_{NL} * 75 \text{ kg} * 0.175 * g * h_{eff} * (1 - \eta_{Rk}) / \eta_A\} + E_{AH} \\ &= [F_B * B * 75 \text{ kg} * 0,9 * g * h_{eff} * (1 - \eta_{Rk}) / \eta_A] + E_{AH} \end{aligned}$$