

Mechatronik für Aufzugsmonteure und Antriebstechniker, Teil 3

Von Dipl. Ing. Holger Schwedt, Dipl. Ing. Götz Benczek und Jürgen Grau
(Dietz-electronic GmbH)

1 Einführung

Zur Auslegung und Planung werden möglichst alle mechanischen und elektrischen Daten der Aufzugsanlage benötigt. Je genauer diese Daten während der Planung ermittelt werden, um so besser und preiswerter kann die Anlage ausgeführt werden. Außerdem wird der Inbetriebnahme-Aufwand reduziert, da die relevanten Parameter bereits vor Auslieferung der Frequenzumrichter durch den Hersteller eingestellt werden können. Der Techniker vor Ort kann dann von einem funktionierenden Antrieb ausgehen, so dass nur noch Feinabstimmungen notwendig sind.

Viele Anlagendaten (z.B. Gewichte Treibscheibendurchmesser, Getriebeübersetzung usw.) lassen sich sehr genau ermitteln, andere (z. B. Wirkungsgrade, Fahrzyklen usw.) können praktisch kaum exakt ermittelt werden; hier helfen nur Erfahrungen und geschätzte Zugaben für das erforderliche Drehmoment. In den folgenden Beispielrechnungen wird auf geschätzte Annahmen ausdrücklich hingewiesen. Wenn Sie Serienanlagen mit gleicher Spezifikation planen und ausführen, sollten Sie Ihre Annahmen durch Messungen vor Ort verifizieren. Mit wenig Aufwand kann oft Geld eingespart und/oder der Komfort der Lift-Anlage verbessert werden.

In der folgenden Beispielrechnung vernachlässigen wir auf Grund der Übersichtlichkeit und Nachvollziehbarkeit die Seilgewichte (es seien z. B. Aramid-Seile angenommen) und setzen in guter Näherung einige Größen als Konstanten an.

2 Anlagendaten mechanisch, elektrisch

Eine kurze Darstellung der wichtigen elektrischen und mechanischen Bezeichnungen und Definitionen der physikalischen Größen und Einheiten finden Sie in der folgenden Tabelle. Zur Kontrolle der Rechnung können die Einheiten mitgeführt werden. Wir empfehlen die Verwendung der genormten SI Einheiten; daher werden z. B. der Durchmesser der Treibscheibe in Meter und eventuelle Drehzahlen in Umdrehungen/Sek. umgerechnet.

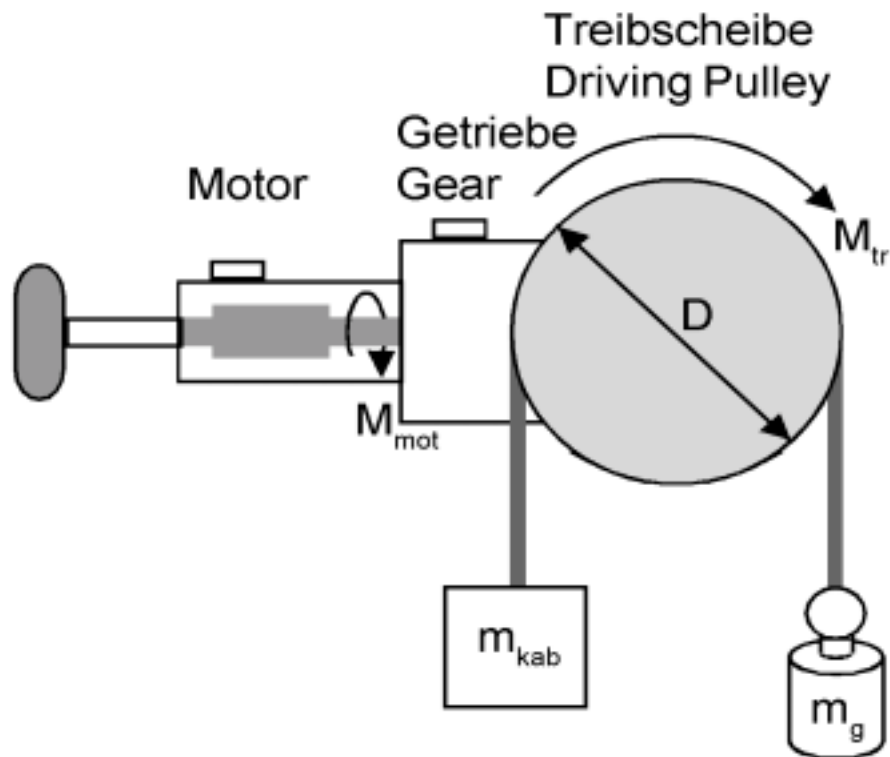
Bezeichnung	Formelzeichen	Bemerkungen
Gewichte, Masse	m, Q, \dots	Gewichte in [kg] z. B. Kabine, Gegengewicht, Nutzlast
Geschwindigkeit	v	Geschwindigkeit in [$m \cdot s^{-1}$] Meter/Sekunde
Beschleunigung	a, g	Beschleunigung in [$m \cdot s^{-2}$], g Erdbeschleunigung $9,81 m/s^2$
Kraft	F	Kraft $F=m \cdot a$, Masse mal Beschleunigung, in [N] Newton
Drehmoment	M	Drehmoment $M=F \cdot r$, Kraft mal Radius, in [Nm] Newtonmeter
Drehzahl	n	Drehzahl Umdrehungen/min; $n/60$ =Umdrehungen/Sekunde
Leistung	P	Leistung elektrisch [VA, W, kW...], mechanisch [$kg \cdot m^2 \cdot s^{-3}$]
Getriebeübersetzung	i	der Faktor "i" beinhaltet Zähler und Nenner der Übersetzung z. B. 57:2 und hier auch die Aufhängung 1:1
Treibscheibendurchmesser	D	Durchmesser in [mm, m], Radius $r=D/2$, Umfang $U= \pi \cdot D$
Spannung	U	Spannung in [V] Volt
Strom	I	Strom in [A] Ampere
Trägheitsmoment	J	Massenträgheitsmoment in [$m \cdot r^2$]

3 Rechenbeispiel

Die Auslegung, Berechnung und den Umgang mit o. g. mechanischen und elektrischen Größen werden wir Ihnen nun an einer Aufzugsanlage mit folgenden Daten vorführen.

Nutzlast m_n :	1000 kg	Geschwindigkeit v :	1,6 m/s
Kabinengewicht m_{kab} :	500 kg	Getriebeübersetzung i :	57:2
Gegengewicht m_g :	1000 kg	Treibeischedurchmesser D :	600 mm, 0,6 m
Aufhängung:	1:1	Massenträgheitsmoment J_g :	0,3 kg*m ²
max. Beschleunigung a :	1,4 m/s ²	(Getriebe, Treibeischedurchmesser bezogen auf Motorwelle)	

Unser Beispiel im Bild:




(Bild 8)

Mit o.g. Daten und der Formel für die Geschwindigkeit können wir nun einen Motor aussuchen:

$$v = \frac{n_n * D * \pi [m]}{60 * i [s]}$$

Die Nenndrehzahl des Motors ergibt sich $n = 1450/\text{min}$. Somit kann hier eine normale 4-poligen Asynchronmaschine mit 50Hz Nennfrequenz gewählt werden. Da die Maschine bei Nenndrehzahl und Nennfrequenz auch mit Nenngeschwindigkeit betrieben wird, ist die Leistungsabschätzung mit folgender Formel einfach:

$$P_{mot} = \frac{m_h * g * v [kg * m^2 * s^{-3}]}{\eta}$$

	Technische Kundeninformation	KI0102d0
	Elektrische Auslegung von drehzahlgeregelten Aufzugsantrieben	25.01.01
		Seite 3 von 7

Wir erinnern uns an o. g. Tabelle und sehen, dass die Einheit "[kg*m²*s⁻³]" auch dem gewünschten [W] Watt entspricht, m_h bezeichnen wir als Hublast; es ist die Differenz zwischen Kabinengewicht, leer oder voll. Wählen Sie für diese Betrachtung immer den schlechtesten Fall aus. Die o. g. Daten ergeben m_h = 500 kg. Den Wirkungsgrad "η" schätzen wir zu 0,7; er beinhaltet Getriebe und Schacht. Falls Sie bereits genauere Wirkungsgrade von Getriebe und Schacht kennen, setzen Sie bitte diese ein!

$$P_{\text{mot}} = 11,2 \text{ kW}$$

Nun wählen wir einen, passend zur vorhandenen Mechanik, geeigneten Motor aus und finden im Datenblatt des Motoren-Herstellers z. B. folgende Angaben:

Nennleistung	P _n : 15 kW	Nenndrehzahl	n _n : 1450/min
Nennmoment	M _n : 98 Nm	Nennstrom	I _n : 33 A
cosφ	0,83	Wirkungsgrad	η _{mot} : 0,9
Nennfrequenz	f _n : 50 Hz	Nennspannung	U _n : 360 V
Trägheitsmoment	J _{mot} : 0,1 kg*m ²		

Hierzu noch einige Hinweise:

- Die Nennleistung des Motors kann ohne weiteres etwas von der benötigten Hubleistung abweichen. Ein zu großer Motor braucht mehr Blindstrom zur Magnetisierung und kann somit die Leistung bzw. Baugröße des erforderlichen Frequenzumrichters unnötig vergrößern. Ein zu klein gewählter Motor, der insbesondere während der Beschleunigungen überfahren wird, kann wiederum lautere Geräusche verursachen (sogenanntes Drehmoment-Jaulen). Im normalen Aufzugsbetrieb wird der Motor im Aussetzbetrieb gefahren. (Einschaltdauer "ED" ist typisch 40%, maximal 65%), daher ist eine thermische Motorüberlastung nahezu ausgeschlossen.
- Die Nennspannung der Maschine sollte möglichst etwas kleiner als die Netzspannung ausgewählt werden, damit der Frequenzumrichter genügend Regelreserve hat. Im Normalfall reicht bei einer feldorientierten Regelung der Asynchron-Maschine eine Spannungsdifferenz zur Netzspannung von 20V (also bei 400V-Netzspannung sollte die Maschine für 380V im Nennpunkt gewickelt sein). Höhere Differenzen sind bei geschlossener Regelung (also mit Drehgeber am Motor) keinesfalls notwendig und führen nur zu unnötiger Erhöhung der Motorphasenströme (Strombelastung des Umrichters). In der Regel führt eine leichte Feldschwächung (Motorspannung und Netzspannung beide 400V) noch nicht zu ernsthaften Problemen. Bei den immer häufiger anzutreffenden Synchronmotoren sollte die Spannungsdifferenz bei 40V liegen (bei einer Netzspannung von 400V hat der passende Synchronmotor eine Wicklung für 360V im Nennpunkt). Die Differenz ist hier aus Sicherheitsgründen höher gewählt, da der Betrieb von Synchronmotoren oberhalb der "Gegen-EMK" kritisch werden kann (schädlicher Blindstromanteil bzw. Motor-Abkipppgefahr).
- Für die feldorientierte Regelung sind prinzipiell "harte" Maschinen geeignet. Diese erkennen Sie an einer hohen Nenndrehzahl; d. h. an einem kleiner Schlupf, großer Rotorzeitkonstante, und guten Wirkungsgrad. Die "sehr harten" Industriemotoren haben sich allerdings im Aufzugsbereich wegen Ihrer Drehmomentgeräusche nicht bewährt, daher arbeitet man hier gerne mit ganz leicht "untererregten" Maschinen.

Auslegung des Frequenzumrichters (feldorientierte Drehzahlregelung)

Zuerst stellen wir Ihnen folgende erprobte Faustformel zur Abschätzung des maximal benötigten Motorstroms vor. Mit diesem Ergebnis kann der Frequenzumrichter an Hand seiner Spezifikation ausgewählt werden. Die Formel ist sehr einfach und erstaunlich genau.

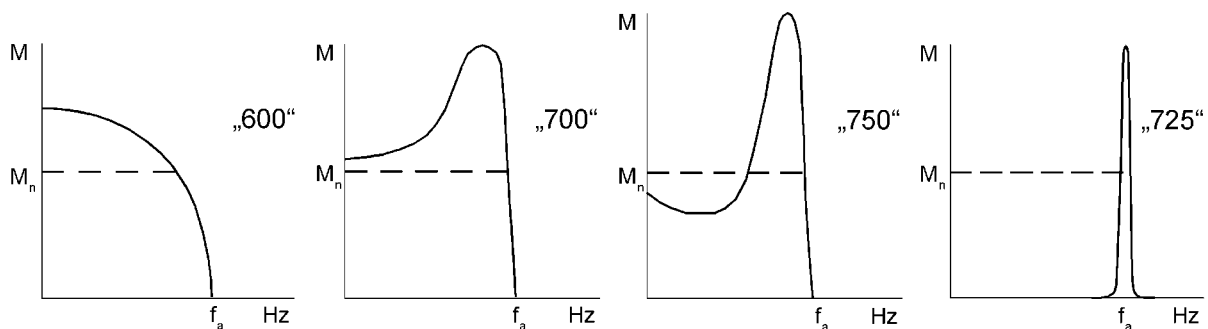
$$I_{\max} = \frac{m_n \text{ [kg]} * V_{\max} \text{ [m/s]} * 16As}{\eta \text{ (Getriebe-Seilrollen-Wirkungsgrad)} * \text{Kennfaktor} * 1kgm}$$

Mit $m_n = 1000 \text{ kg}$, $V_{\max} = 1,6 \text{ m/s}$, $\eta = 0,7$ und Kennfaktor = 700 ergeben sich:

$$I_{\max} = 52,2 \text{ A}$$

D. h. es wird ein z. B. ein 40A-Frequenzumrichter mit 1,5-facher Dynamik ($I_{\max} = 60 \text{ A}$) benötigt, wobei $I_{\max} = 52,2 \text{ A}$ in der Beschleunigungsphase bei 1m/s^2 spezifiziert ist. Die Formel geht dabei von sogenannten Kennfaktoren aus, die vom verwendeten Motortyp abhängen (siehe dazu Bild 9). In den Kennfaktoren steckt der Wirkungsgrad des Motors und seine maximale Spannungsdifferenz zum Netz (0V...40V, je nach Motorentypus). Derzeit sollten sie sich die 5 wichtigsten Kennfaktoren für die obige Formel merken:

Kennzahl	Motorart, Beschreibung
600	Silumin-Motor auch Hochimpedanz-Motor genannt. Dieser Motor kann in Altanlagen direkt am Netz gestartet werden. Der Cos-Phi ist meist unter 0,75.
700	Aufzugsmotor geeignet für Frequenzumrichterbetrieb und Asynchron-Gearless
750	Industrie-, Norm- oder Servomotor. Diese Motoren sind naturgemäß nicht geräuschoptimiert und daher selten im Personen-Aufzugsbereich zu finden
725	Aufzugs-Synchon-Motoren (mit Planetengetr.) und Synchron-Gearless-Winde
800	DC-Motoren (bürstenbehaftet) ohne Leonard-Umformer und DC-Gearless.



(Bild 9) Motorkennlinien als Funktion Drehfrequenz über Drehmoment inkl. Kennzahlen.

Auslegung der feldorientierten Drehzahlregelung mittels Drehmoment

Der Wirkstrom in einem Synchron- oder Asynchron - Motor ist proportional zum Drehmoment. Weil der Erreger bzw. Feldstrom in der Nähe des Nennmomentes vernachlässigbar wird, kann für den Bereich 60%-200% des Motornennmoments folgende Formel in guter Näherung angewendet werden

$$I_{\text{mot}} = I_{\text{nmot}} * \frac{M_{\text{ges}}}{M_n}$$

Diese Formel bedeutet, dass wir zur Berechnung des maximal möglichen Motorstroms das Drehmoment bezogen auf die Motorwelle im ungünstigsten Lastfall errechnen müssen. Das gesamte Drehmoment läßt sich zur Vereinfachung in Teilmomente zerlegen:

- | | | |
|---------------------------------------|-----------|--|
| 1. Hubmoment | M_h | (Halten der Last) |
| 2. Verlustmoment | M_v | (Reibungsverlust Wirkungsgrad η) |
| 3. Beschleunigungsmoment | M_b | (Beschleunigung der Kabine + Nutzlast) |
| 4. Moment rotatorische Beschleunigung | M_{rot} | (Massenträgheitsmoment) |

Hubmoment

$$M_h = (m_n + m_{kab} - m_g) * g * D/2 \quad (\text{das Moment an der Treibscheibe})$$

$$M_h = 1471,5 \text{ Nm}$$

$$M_{hmot} = M_h / i \quad (\text{auf Motorwelle bezogen Division durch } i)$$

$$M_{hmot} = 51,6 \text{ Nm}$$

Verlustmoment

$$M_{vmot} = M_{hmot} * (1/\eta - 1) \quad (\text{Verlustmoment bezogen auf Motorwelle})$$

$$M_{vmot} = 22,1 \text{ Nm}$$

Beschleunigungsmoment

$$M_b = (m_n + m_{kab}) * a * D/2 \quad (\text{Beschleunigungsmoment an der Treibscheibe})$$

$$M_b = 630 \text{ Nm}$$

$$M_{bmot} = M_b / i \quad (\text{bezogen auf Motorwelle})$$

$$M_{bmot} = 22,1 \text{ Nm}$$

Moment für rotatorische Beschleunigung

$$M_{rotmot} = 2 J_{ges} * \frac{\Delta n}{t_a}$$

t_a ist die Beschleunigungszeit in der die Drehzahldifferenz Δn überwunden wird;
 J_{ges} ist das gesamte Massenträgheitsmoment auf die Motorwelle bezogen. Unter der Vernachlässigung der Verrundungszeiten (wir wollen nur den ungünstigsten Fall untersuchen) und mit einer Drehzahldifferenz (0-1450/min) ergibt sich im Beispiel:

$$t_a = \frac{v}{a}$$

$$t_a = 1,14 \text{ sec}$$

$$M_{rotmot} = 2 J_{ges} * 0,4 \text{ kgm}^2 * \frac{1450/60 \text{ s}^{-1}}{1,14 \text{ s}}$$

$$M_{rotmot} = 53,3 \text{ Nm} \quad (\text{Hinweis } [kgm^2 \text{ s}^{-2}] F=m*a, M=m*a*r)$$

Gesamtmoment bezogen auf die Motorwelle im ungünstigsten Fall ergibt sich als Summe:

$$M_{gesmot} = M_{hmot} + M_{vmot} + M_{bmot} + M_{rotmot}$$


$$M_{gesmot} = 149,1 \text{ Nm}$$

Jetzt können wir mit der schon o. g. Formel den maximalen kurzzeitigen Motorstrom bestimmen:

$$I_{motmax} = I_{nmot} * \frac{M_{gesmot}}{M_{nmot}}$$

$$I_{motmax} = 50,2 \text{ A}$$

Durch die gewählten Anlagendaten verifizieren wir natürlich unsere erprobte Faustformel. Ohne Zweifel haben wir für unser Beispiel eine sehr hohe Beschleunigung gewählt, die aber auch den Einfluß der Massenträgheit des Motors und Getriebes zeigt. Das Moment

	Technische Kundeninformation	KI0102d0
	Elektrische Auslegung von drehzahlgeregelten Aufzugsantrieben	25.01.01
		Seite 6 von 7

zur Überwindung der Massenträgheit ist hier größer als das Hubmoment. Die Faustformel muss selbstverständlich genug Reserve beinhalten, so dass Sie nicht während der Inbetriebnahme mit einer zu schwach ausgelegten Anlage Probleme bekommen.

Auslegung des Bremswiderstandes

Zu o. g. Frequenzumrichter wird normalerweise ein Bremswiderstand mit folgenden Daten angeboten, an Hand dieses Beispiels werden wir dessen Auslegung prüfen:

Widerstand R: 18,8 Ω Nenndauerleistung P_d : 2,0 kW

Solche Hochlastwiderstände können kurzzeitig um das 10-15-fache überlastet werden. Normalerweise wird der Lastzyklus auf eine Zeit von 120s spezifiziert (z.B. 12s mit 20 kW und 108s Abkühl-Zeit). Ohne Berücksichtigung aller Wirkungsgrade schätzen wir zuerst ab, ob das System Motor + Wechselrichter + Bremswiderstand überhaupt das maximale Bremsmoment M_{gesmot} aufbringen kann. Der Bremswiderstand wird bei einer typischen Gleichspannung im Zwischenkreis von $U = 700V$ geschaltet, daraus ergibt sich P_{brmax} :

$$P_{brmax} = \frac{U^2}{R}$$

$$P_{brmax} = 26 \text{ kW}$$

Aus dieser Leistung kann mit der bekannten Formel das maximal mögliche Bremsmoment errechnet werden:

$$P = \frac{M * n}{9550}$$

$$M_{brmax} = 172 \text{ Nm}$$

Da M_{brmax} größer als M_{gesmot} ist, können wir unsere Beispielrechnung fortsetzen.

Nun müssen wir zur Abschätzung der möglichen Fahrzyklen die Bremsleistung im ungünstigsten Fall bestimmen. Wir erinnern uns dafür an das bereits errechnete Hubmoment M_{hmot} und das Verlustmoment M_{vmot} und setzen es mit Nenn Drehzahl n_n unter Berücksichtigung des Motorwirkungsgrad in folgende Formel ein:


$$P_{brhub} = \frac{(M_{hmot} - M_{vmot}) * n_n * \eta_{mot}}{9550}$$

$$P_{brhub} = 4,0 \text{ kW}$$

In o. g. Berechnung haben wir die Beschleunigung und das Massenträgheitsmoment vernachlässigt, da die zusätzliche Bremsleistung nur sehr kurz ($t=1,14 \text{ sec}$) im Verhältnis zur Fahrdauer anfällt.

Mit $P_{brhub} = 4,0 \text{ kW}$, der Zykluszeit 120s und der Nenndauerleistung 2,0 kW lassen sich viele Fahrzyklen genauer untersuchen; wir wollen uns auf die Grenzfälle beschränken:

- maximale Fahrstrecke 96m ($v=1,6 \text{ m/s}$, 60s Fahrzeit) danach darf der gewählte Bremswiderstand 60s nicht in Betrieb sein.
- Fahrten zwischen den Stockwerken werden durch die Türöffnungszeiten ohne Einschränkung möglich sein.
- Der ungünstigste Fall ist folgender Betrieb: Vollbeladen nach unten und Leerfahrt aufwärts.

	Technische Kundeninformation	KI0102d0
	Elektrische Auslegung von drehzahlgeregelten Aufzugsantrieben	25.01.01
		Seite 7 von 7

Zusammenfassung

Die Berechnung der Mechanik ergibt über die Drehmomente ein sehr gutes Abbild der elektrischen Spezifikation der Antriebsmaschine und des Frequenzumrichters. Die elektrischen Spezifikationen sollten bei Serienanlagen in jedem Fall vor Ort verifiziert werden. Unser Beispiel zeigt außerdem, dass durch kleine Einbußen bei der Beschleunigung Drehmoment gespart wird. Weiterhin wurde gezeigt, dass sich der dynamische Strom, den ein Frequenzumrichter zur Verfügung stellen muß, leicht mit der erwähnten "Faustformel" abzuschätzen läßt.

Wichtig: Das Rechenbeispiel beschreibt eine Auslegung für eine echte feldorientierte Drehzahlregelung. Sie kann bei "geberlosen Systemen" oder rein frequenzgesteuerten Umrichtern (U/f - Kennlinie und überlagerter Drehzahlregelung) fehlschlagen, da diese Systeme entweder den Motorschlupf ganicht oder nur in einer Näherung erfassen und auch nicht über die Möglichkeit einer Vektorentrennung (über die Parameter für den Rotorfluß und die Rotorzeitkonstante) verfügen.