v1.9 - Fahrstuhl

Durchgeführt von dn am 18.04.2013, Version vom 15.05.2013

Contents

Durchführung

- Ausgerüstet mit einer Personenwaage, einer Stoppuhr und einem Meterband wird das Beschleunigungs-Zeit-Verhalten eines Fahrstuhls der THM bestimmt. Dazu werden die Zeitintervalle der Beschleunigung, der konstanten Geschwindigkeit und des Abbremsvorgangs ermittelt. Ziel ist es, aus diesem Diagramm die vom Fahrstuhl durchfahrene Strecke zu ermitteln und somit die mittlere Stockwerkshöhe des Gebäudes zu bestimmen. Mit dem Meterband wird der genaue Abstand der Stockwerke zur Kontrolle bestimmt.
- Ein Smartphone ist ein Multifunktionsgerät mit diversen eingebauten Sensoren. Zum Auslesen dieser Sensoren existieren kleine Programme (sog. Apps). Mit wenig Aufwand lässt sich somit der Beschleunigungssensor eines Smartphones auslesen und die aufgenommenen Daten in einer Datei abspeichern. In diesem Versuch wird die vom Smartphone aufgezeichnete $a-t$-Messkurve ausgewertet und mit den Messungen der "analogen" Methode (Waage + Stoppuhr) verglichen.

```
% Initialisierungsoptionen für MATLAB
clear all;                      % Löschen alter Variablen
close all;                      % Schliessen der Fenster
clc;                            % Löschen der Ausgaben im Kommandofenster
```

Das Beschleunigungsverhalten eines Fahrstuhls

Die Anwendung der Newtonschen Gesetze lässt sich anhand eines Fahrstuhls gut demonstrieren. Aus der Vorlesung ist sicherlich bekannt, dass die Geschwindigkeit die Ableitung des Weges s nach der Zeit und die Beschleunigung a die Ableitung der Geschwindigkeit v nach der Zeit ist, also:

$$v = \dot{s}, \quad a = \dot{v}, \quad a = \ddot{s}$$

Andersherum lässt sich über das Integrieren dieser Ausdrücke die Ableitung umkehren, man erhält dann über die Beschleunigung die Geschwindigkeit bzw. den Weg

$$v = \int a\mathrm{d}t \qquad \Rightarrow \qquad v = a \cdot t + v_0$$

$$s = \int v\mathrm{d}t$$

$$s = \int a \cdot t + v_0\mathrm{d}t$$

$$s = \frac{1}{2}a \cdot t^2 + v_0 \cdot t + s_0$$

Dies ist die sogenannte Bewegungsgleichung, die man mittels Integral- und Differentialrechnung ermitteln kann. Es ist also möglich, über die Kenntnis der Beschleunigungen und der Zeit(intervalle) die Geschwindigkeiten bzw. zurückgelegte Strecken zu berechnen. Den qualitativen Verlauf der einzelnen Anteile sieht man im folgenden Diagramm:

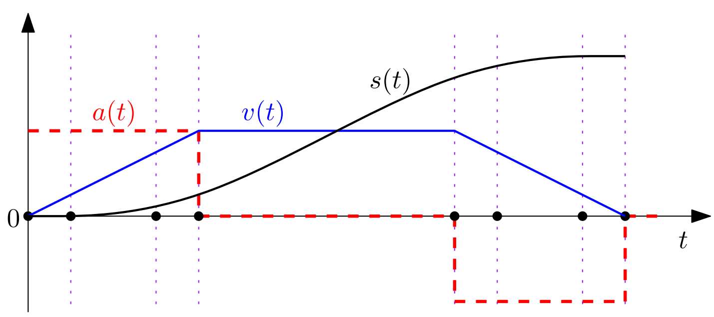
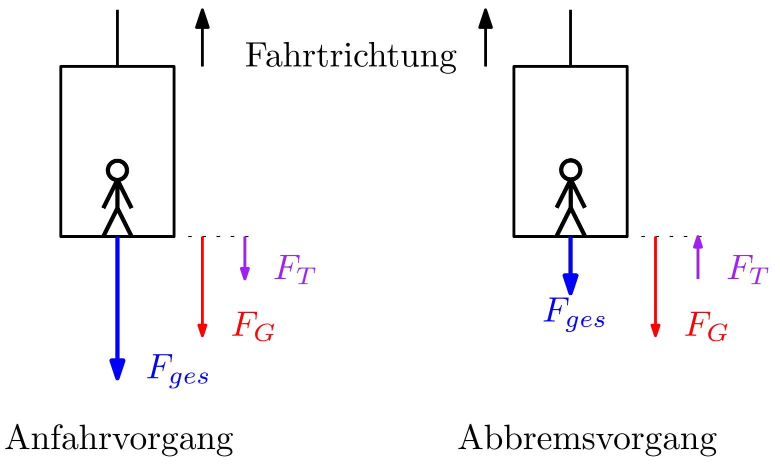


Abbildung 1: Qualitativer Verlauf der Beschleunigung, Geschwindigkeit und der Strecke in Abhängigkeit der Zeit

Wie können wir nun diese Kenntnis auf unseren Fahrstuhl übertragen? Zunächst einmal eine Skizze, die die auftretenden Kräfte verdeutlicht.



Wie man sieht, wirken hierbei verschiedene Kräfte, die sich bei Anfahrt bzw. beim Abbremsen des Aufzuges addieren oder subtrahieren. Wir haben einmal die Schwerkraft $F_G = m \cdot g$ und die Trägheitskraft $F_T = m \cdot a$.

Die Kräfte addieren (oder subtrahieren) sich also zu

$$F_{ges} = F_G + F_T$$

Stellt man diese Gleichung nach der Trägheitskraft um, erhält man

$$F_T = F_{ges} - F_G$$

Nun wird in die obige Gleichung der Ausdruck $F = m \cdot a$ eingesetzt. Die Gesamtkraft F_{ges} ändert sich je nach Beschleunigungsrichtung. Da die Waage zum Betrieb unter dem alleinigen Einfluss der Erdbeschleunigung kalibriert ist, wird eine scheinbare Massenzunahme von Δm angezeigt. D.h. man erhält die folgende Gleichung

$$m \cdot a = (m + \Delta m) \cdot g - m \cdot g$$

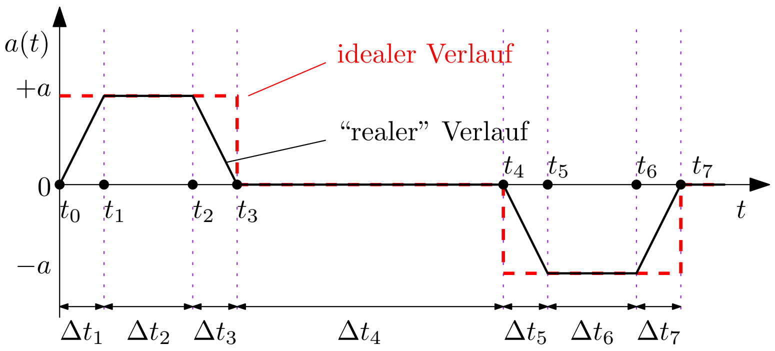
und nach dem Ausmultiplizieren und anschließender Subtraktion von $m \cdot g$ bleibt folgendes übrig:

$$m \cdot a = \Delta m \cdot g \quad \Rightarrow \quad a = \frac{\Delta m}{m} \cdot g$$

Die Differenz Δm Ruhenden Gewicht ist positiv beim Beschleunigen und negativ beim Abbremsen. Bei m handelt es sich um die Masse der Person (bzw. des Gegenstandes auf der Waage) und g die lokale Erdbeschleunigung (Normfallbeschleunigung $g = 9.80665 m/s^2 \approx 9.81 m/s^2$).

Betrachtet man den Anfahrvorgang (z.B. aus dem untersten Stockwerk in das oberste), so weiss man aus eigener Erfahrung, dass man beim Losfahren scheinbar "schwerer" wird. Man geht für einige Sekunden "in die Knie", wobei sich der Zustand nach wenigen Sekunden wieder normalisiert. Beim Abbremsen des Aufzugs wird man scheinbar leichter, nämlich solange, bis der Aufzug zum Stillstand gekommen ist.

In einem Beschleunigungs-Zeit-Diagramm hätte dieses Verhalten ungefähr diese Form, wie in der folgenden Abbildung dargestellt.



Ziel dieses Versuches ist die Berechnung der Kurve $s(t)$ über die Integration von $a(t)$, um z.B. die mittlere Stockwerkshöhe zu berechnen. Die mittlere Beschleunigungen bzw. Geschwindigkeiten und Strecken in den jeweiligen Zeitintervallen $\Delta t_n = t_n - t_{n-1}$ mit $n = 1, 2, \ldots, 7$ sind nach [Fromme]:

Zeitintervall Δt_n	Mittlere Beschleunigung $\overline{a}$	Zeitpunkt t_n	Geschwindigkeit $v(t_n)$	Strecke $s(t_n)$
Δt_1	$\frac{a}{2}$	t_1	$\frac{a}{2}t_1$	$\frac{a}{6}t_1^2$
Δt_2	a	t_2	$at_2 - \frac{a}{2}t_1$	$\frac{a}{6}t_1^2 + \frac{a}{2}(t_2 - t_1)t_2$
Δt_3	$\frac{a}{2}$	t_3	at_2	$s(t_3) = \frac{a}{2}t_2(t_2 + t_1)$
Δt_4	0	t_4	at_2	$s(t_3) + at_2(t_4 - t_3)$
Δt_5	$-\frac{a}{2}$	t_5	$at_2 - \frac{a}{2}t_1$	$s(t_3) + at_2(t_4 - t_3) + at_2t_1 - \frac{a}{6}t_1^2$
Δt_6	$-a$	t_6	$\frac{a}{2}t_1$	$2s(t_3) + at_2(t_4 - t_3) - \frac{a}{6}t_1^2$
Δt_7	$-\frac{a}{2}$	t_7	0	$2s(t_3) + at_2(t_4 - t_3)$

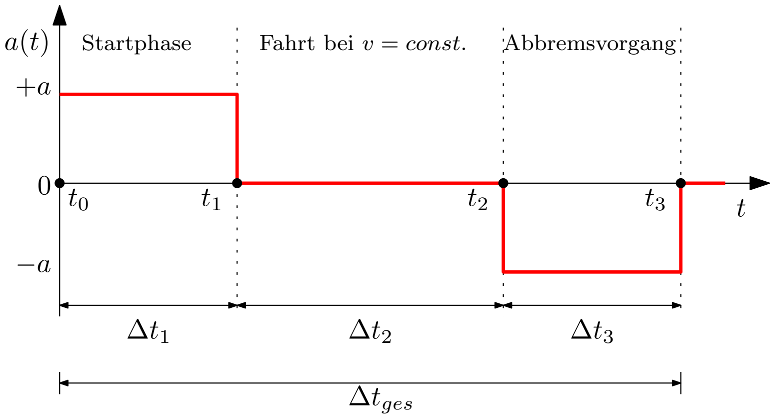
Literaturquelle zum Abschnitt: [Fromme] Bärbel Fromme, Physik im Aufzug, MNU 62/5 (15.07.2009) `http://www.physik.uni-bielefeld.de/didaktik/Lehrerinnen/Workshops/TI.Voyage/Veroeffentlichungen/AufzugMNU.pdf` Internetquelle, abgerufen am 18.04.2013

Teil 1: Die analoge Methode

Wie bereits angedeutet, wird eine Personenwaage genutzt, um die scheinbare Gewichtszunahme beim Anfahren und die Gewichtsabnahme beim Abbremsen bestimmen zu können. Zusätzlich wird mit einer Stoppuhr die Dauer der einzelnen Zeitintervalle bestimmt, um ein Beschleunigungs-Zeit-Diagramm konstruieren zu können. Das erste Szenario (Aufwärts-Fahrt) läuft folgendermaßen ab:

- Fahrstuhl wird ins unterste Geschoss gefahren
- Eine Person stellt sich auf die Waage und notiert das Gewicht
- Der Fahrstuhl fährt los (Ziel: oberste Etage) und man stoppt die Zeit der Dauer der Änderung des Gewichts beim Anfahren und Abbremsen, sowie die Gesamtdauer der Fahrt.

Die Intervalle Δt_1 und Δt_2 können aufgrund der sehr kurzen Zeitdauern nicht erfasst werden. Deshalb vereinfachen wir hier die Auswertung und berechnen nur die mittlere Beschleunigung nach dem "idealen Verlauf" (siehe Abbildung). Der "reale Verlauf" wird im Teil 2 dieses Experiments betrachtet.



Die Fahrt mit dem Fahrstuhl wurde mehrmals von der untersten bis in die oberste Etage durchgeführt, also von 1. OG $\rightarrow$ 2. UG. Es wurden effektiv $N = 3$ Etagen durchfahren wobei es sich bei der scheinbaren 4. Etage (Ausgang $\rightarrow$ 2. UG) um eine Rampe für Rollstuhlfahrer handelt. Deren Höhe beträgt etwa $(22 \pm 3)cm$, d.h. die durchfahrene Gesamtstrecke beträgt nach Messung mit einem Meterband $s_{ges} = (1010 \pm 4)cm$.

```
N = 3;                          % Anzahl der Etagen/Stockwerke: 3
g = 9.81;                       % Erdbeschleunigung in m/s^2
m = 0.200;                      % Masse des Probekörpers in kg
h = 10.1;                       % Höhe der 3 Stockwerke in Meter
err_h = 0.04;                   % Messunsicherheit von h +/- 0.04m

% Messwerte der Zeitintervalle
mess_dt1 = [3.65 3.45 4.1 3.5 4.5 3.65];            % beim Start
mess_dt3 = [3.0 2.7 3.2 3.0 3.3 3.1];               % beim Abbremsen
mess_dtges = [14.0 14.0 14.1 13.95 13.95 14.0];     % Gesamtdauer der Fahrt

% Messwerte der scheinbaren Massenänderungen
mess_m1 = [0.210 0.201 0.2102 0.2101 0.2103 0.210];     % beim Anfahren
mess_m3 = [0.185 0.1847 0.1847 0.1849 0.1849 0.1846];   % beim Abbremsen
```

Aus den gemessenen Größen werden nun die Beschleunigungen, die Geschwindigkeiten und zurückgelegte Strecken in den jeweiligen Zeitintervallen berechnet.

Die Beschleunigungen a_n in den Intervallen $n = 1 \ldots 3$ werden gemäß

$$\Delta a_n = \frac{\Delta m_n}{m} \cdot g, \qquad (n = 1 \ldots 3)$$

berechnet.

```
% Dauer der jeweiligen Zeitintervalle dt
dtges = mean(mess_dtges);       % Mittelwert der Gesamtzeit
dt1 = mean(mess_dt1);           % Mittelwert der Beschleunigungsphase
```

```
dt3 = mean(mess_dt3);            % Mittelwert der Abbremsphase
dt2 = dtges - dt1 - dt3;         % Fahrtdauer bei konstanter Geschw.

% Daraus folgen dann die Zeitpunkte tn
t0 = 0;
t1 = dt1;                        % Zeitpunkt t1
t2 = dt1 + dt2;                  % Zeitpunkt t2
t3 = dt1 + dt2 + dt3;            % Zeitpunkt t3

% Maximalauschläge der Gewichtsänderung
m1 = mean(mess_m1);              % Mittelwert der Beschleunigungsphase
m2 = m;                          % Gewicht konstant in der mittleren Phase
m3 = mean(mess_m3);              % Mittelwert der Abbremsphase

% Mittlere Beschleunigungen a während der Zeitintervalle
a1 = (m1 - m)/m * g;
a2 = (m2 - m)/m * g;             % a2 = 0 (m2 = m, d.h. keine Beschleunigung)
a3 = (m3 - m)/m * g;
```

Die Geschwindigkeit v erhält man durch die Integration der Beschleunigung, also

$$v = \int a \mathrm{d}t \qquad \Rightarrow \qquad v = a \cdot t + v_0$$

wenn $a = const.$ ist. Der Term v_0 ist die sogenannte Anfangsgeschwindigkeit (bzw. eine Integrationskonstante).

```
% Berechnung der mittleren Geschwindigkeit v
v1 = a1*dt1;                      % Anfangsgeschwindigkeit v0 = 0
v2 = a2*dt2 + v1;                 % Anfangsgeschwindigkeit hier: v1
v3 = a3*dt3 + v1;                 % Auch hier ist die Anf.geschw. gleich v1
```

Die zurückgelegte Strecke erhält man durch die Integration der Geschwindigkeit nach der Zeit, also

$$s = \int v \mathrm{d}t \qquad \Rightarrow \qquad s = \frac{1}{2} a \cdot t^2 + v_0 \cdot t + s_0$$

Die Strecke s_1 im Zeitintervall Δt_1 wird mit

$$s_1 = \frac{1}{2} a_1 \cdot \Delta t_1^2$$

berechnet.

Da hierbei aus dem Ruhezustand beschleunigt wird, gibt es keine Anfangsgeschwindigkeit und keine Anfangsstrecke s_0, da das unterste Stockwerk quasi als Startort festgelegt wird.

Im zweiten Zeitintervall Δt_2 ist die Beschleunigung $a_2 = 0$, d.h. der Weg nimmt linear mit der Zeit zu. Die Strecke s_2 setzt sich zusammen aus dem zurückgelegten Weg im 1. Zeitintervall plus dem Weg im Zeitintervall

2, also ist

$$s_2 = \frac{1}{2}a_2 \cdot \Delta t_2^2 + v_2 \cdot \Delta t_2,$$

wobei $a_2 = 0$ ist.

Im dritten Zeitintervall Δt_3 wird der Abbremsvorgang, die Anfangsgeschwindigkeit v_2 und die vorher durchfahrene Strecke s_2 berücksichtigt. Die Strecke in diesem Abschnitt wird also aus der folgenden Summe heraus berechnet

$$s_3 = \frac{1}{2}a_3 \cdot \Delta t_3^2 + v_2 \cdot \Delta t_3$$

```
% Zurückgelegte Strecken s
s1 = 1/2 * a1 * dt1^2;
s2 = 1/2 * a2 * dt2^2 + v2*dt2;
s3 = 1/2 * a3 * dt3^2 + v2*dt3;

% Gesamtstrecke als Summe aller Teilstrecken
s_ges = s1 + s2 + s3;

% Mittlere Stockwerkshöhe in Meter
h_ist = s_ges/N;

% Mit dem Meterband gemessene mittlere Stockwerkshöhe
h_soll = h/N;
```

Fehlerrechnung zum Abschnitt

Neben der Wägung zur Bestimmung der Beschleunigung hat man ebenfalls die Zeitmessung, die zur Gesamtunsicherheit beiträgt. Die Wägung bereitet weniger Schwierigkeiten, denn man muss nur den Maximalwert der Gewichtsdifferenz von einer Digitalanzeige ablesen. Im Gegensatz ist die Zeitmessung wesentlich schwieriger durchzuführen, weil die Waage anhand von Vibrationen des Fahrstuhls laufend schwankende Werte liefert. Man kann sehr schwer den genauen Zeitpunkt finden, in dem die Beschleunigung des Fahrstuhls einsetzt/aufhört. Deshalb ist die Zeitmessung in diesem Versuch extrem fehlerbehaftet.

```
err_dt = 0.3;                  % Messunsicherheit der Zeitmessung +/- 0.3s
err_m = 1e-4;                  % Messunsicherheit der Wägung +/- 0.1g
t95 = 2.57;                    % Faktor für stat. Sicherheit von 95% (n=6)
```

Die Gesamtstrecke ist die Summe der zurückgelegten Einzelstrecken

$$s_{ges} = s_1 + s_2 + s_3$$

d.h. unter Berücksichtigung der Anfangsgeschwindigkeiten und $a_2 = 0$ erhält man

$$s_{ges} = \underbrace{\frac{1}{2}a_1 \cdot \Delta t_1^2}_{s_1} + \underbrace{\frac{1}{2}a_2 \cdot \Delta t_2^2 + v_2 \cdot \Delta t_2}_{s_2} + \underbrace{\frac{1}{2}a_3 \cdot \Delta t_3^2 + v_2 \cdot \Delta t_3}_{s_3}$$

bzw. diese Gleichung anders geschrieben

$$s_{ges} = \frac{1}{2}(a_1 \cdot \Delta t_1^2 + a_2 \cdot \Delta t_2^2 + a_3 \cdot \Delta t_3^2) + (a_2 \cdot \Delta t_2 + a_1 \cdot \Delta t_1) \cdot (\Delta t_2 + \Delta t_3)$$

Die partiellen Ableitungen für diese Gleichung sind ($a_2 = 0$, entfällt daher):

$$\frac{\partial s_{ges}}{\partial a_1} = \frac{\Delta t_1{}^2}{2} + (\Delta t_2 + \Delta t_3)\ \Delta t_1$$

$$\frac{\partial s_{ges}}{\partial a_3} = \frac{\Delta t_3{}^2}{2}$$

$$\frac{\partial s_{ges}}{\partial \Delta t_1} = a_1\,\Delta t_1 + a_1\ (\Delta t_2 + \Delta t_3)$$

$$\frac{\partial s_{ges}}{\partial \Delta t_2} = a_1\,\Delta t_1 + 2\,a_2\,\Delta t_2 + a_2\ (\Delta t_2 + \Delta t_3)$$

$$\frac{\partial s_{ges}}{\partial \Delta t_3} = a_1\,\Delta t_1 + a_2\,\Delta t_2 + a_3\,\Delta t_3$$

Die partielle Ableitung nach von s_{ges} nach a_2 wurde nicht berücksichtigt, da $a_2 = 0$ ist.

```
% Messunsicherheiten in der Zeitmessung
err_dt1 = t95 * std(mess_dt1)/sqrt(length(mess_dt1)) + err_dt;
err_dt3 = t95 * std(dt3)/sqrt(length(mess_dt3)) + err_dt;
err_dtges = t95 * std(mess_dtges)/sqrt(length(mess_dtges)) + err_dt;
% Unsicherheiten addieren sich hier zu
err_dt2 = err_dt1 + err_dt3 + err_dtges;

% Messunsicherheiten der Wägungen
err_m1 = t95 * std(mess_m1)/sqrt(length(mess_m1)) + err_m;
err_m3 = t95 * std(mess_m3)/sqrt(length(mess_m3)) + err_m;
```

Im nächsten Schritt wird die Fehlerfortpflanzung angewandt, um die Unsicherheiten der Beschleunigungen, der Geschwindigkeiten und der Strecken zu bestimmen.

```
% Unsicherheiten der Beschleunigungen
err_a1 = abs(g/m)*err_m1 + abs((g*(m - m1))/m^2 - g/m)*err_m;
err_a3 = abs(g/m)*err_m3 + abs((g*(m - m3))/m^2 - g/m)*err_m;

% Unsicherheiten der Geschwindigkeiten
err_v1 = abs(a1)*err_dt1 + abs(dt1)*err_a1;
err_v2 = err_v1;
err_v3 = abs(a3)*err_dt3 + err_v1;

% Unsicherheiten der zurückgelegten Strecken  (a2 = 0)
err_s1 = abs(1/2*dt1^2)*err_a1 + ...
    abs(a1*dt1)*err_dt1;
err_s2 = abs(dt1*dt2)*err_a1 + ...
    abs(a1*dt2)*err_dt1 + ...
    abs(a1*dt1 + 3*a2*dt2)*err_dt2;
```

```
err_s3 = abs(dt1*dt3)*err_a1 + ...
    abs(dt3^2/2)*err_a3 + ...
    abs(a1*dt3)*err_dt1 + ...
    abs(a2*dt3)*err_dt2 + ...
    abs(a1*dt1 + a2*dt2 + ...
    a3*dt3)*err_dt3;

% Unsicherheit der Gesamtstrecke
err_s_ges = abs(dt1^2/2 + (dt2 + dt3)*dt1)*err_a1 + ...
    abs(dt3^2/2)*err_a3 + ...
    abs(a1*dt1 + a1*(dt2 + dt3))*err_dt1 + ...
    abs(a1*dt1 + 2*a2*dt2 + a2*(dt2 + dt3))*err_dt2 + ...
    abs(a1*dt1 + a2*dt2 + a3*dt3)*err_dt3;

% Unsicherheiten der mittleren Stockwerkshöhe
err_h_soll = err_h/N;
err_h_ist = err_s_ges/N;

% Ergebnisse
fprintf('--- Mittlere Beschleunigungen in den Zeitpunkten t1 ... t3 \n');
fprintf('a1 = (%g +/- %g)m/s^2 \n',a1,err_a1);
fprintf('a3 = (%g +/- %g)m/s^2 \n',a3,err_a3);
fprintf('--- Mittlere Geschwindigkeiten in den Zeitpunkten t1 ... t3 \n');
fprintf('v(t1) = (%g +/- %g)m/s \n',v1,err_v1);
fprintf('v(t2) = (%g +/- %g)m/s \n',v2,err_v2);
fprintf('v(t3) = (%g +/- %g)m/s \n',v3,err_v3);
fprintf('--- Zurückgelegte Strecken in den Zeitintervallen dt1 ... dt3 \n');
fprintf('s1 = (%g +/- %g)m \n',s1,err_s1);
fprintf('s2 = (%g +/- %g)m \n',s2,err_s2);
fprintf('s3 = (%g +/- %g)m \n',s3,err_s3);
fprintf('--- Durchfahrene Gesamtstrecke und mittlere Stockwerkshöhen \n');
fprintf('s_ges = (%g +/- %g)m \n',s_ges,err_s_ges);
fprintf('h_soll = (%g +/- %g)m \n',h_soll,err_h_soll);
fprintf('h_ist = (%g +/- %g)m \n',h_ist,err_h_ist);
```

```
--- Mittlere Beschleunigungen in den Zeitpunkten t1 ... t3
a1 = (0.42183 +/- 0.201724)m/s^2
a3 = (-0.74556 +/- 0.0174099)m/s^2
--- Mittlere Geschwindigkeiten in den Zeitpunkten t1 ... t3
v(t1) = (1.60647 +/- 1.07587)m/s
v(t2) = (1.60647 +/- 1.07587)m/s
v(t3) = (-0.667489 +/- 1.29954)m/s
--- Zurückgelegte Strecken in den Zeitintervallen dt1 ... dt3
s1 = (3.05899 +/- 2.63443)m
s2 = (11.4729 +/- 9.9113)m
s3 = (1.43195 +/- 3.56263)m
--- Durchfahrene Gesamtstrecke und mittlere Stockwerkshöhen
s_ges = (15.9638 +/- 16.1084)m
h_soll = (3.36667 +/- 0.0133333)m
h_ist = (5.32127 +/- 5.36945)m
```

Konstruktion des $a-t$-, $v-t$- und $s-t$-Diagramms in MATLAB

Da nun die Beschleunigungen und die Zeitintervalle bekannt sind, müssen noch die Weg-Zeit-, Geschwindigkeits-Zeit- und Beschleunigungs-Zeit-Diagramme gezeichnet werden. Hierzu wird dem Programm MATLAB mitgeteilt, dass die Werte (in Form von Vektoren) generiert und daraus dann anhand dessen eine Grafik erstellt werden soll.

Im ersten Schritt wird die Zeit-Achse erstellt. Da man es in diesem Versuch mit verschiedenen Phasen bzw. Zeitintervallen zu tun hat, wird der Zeitachsenvektor `ti` aus drei verschiedenen zusammengesetzt werden. Diese Intervalle reichen von den Zeitpunkten t_0 bis t_1, t_1 bis t_2 und t_2 bis t_3. Die Schrittweite beträgt $\Delta t_n/100$.

```
t1i = linspace(0,t1,100);       % Generieren der t-Werte von 0 bis t1
t2i = linspace(t1,t2,100);      % fürs Intervall t1 bis t2
t3i = linspace(t2,t3,100);      % Intervall t2 bis t3
ti = [t1i t2i t3i];             % Erstellen der t-Achse

clear t1i t2i t3i               % Freigabe der Variablen
```

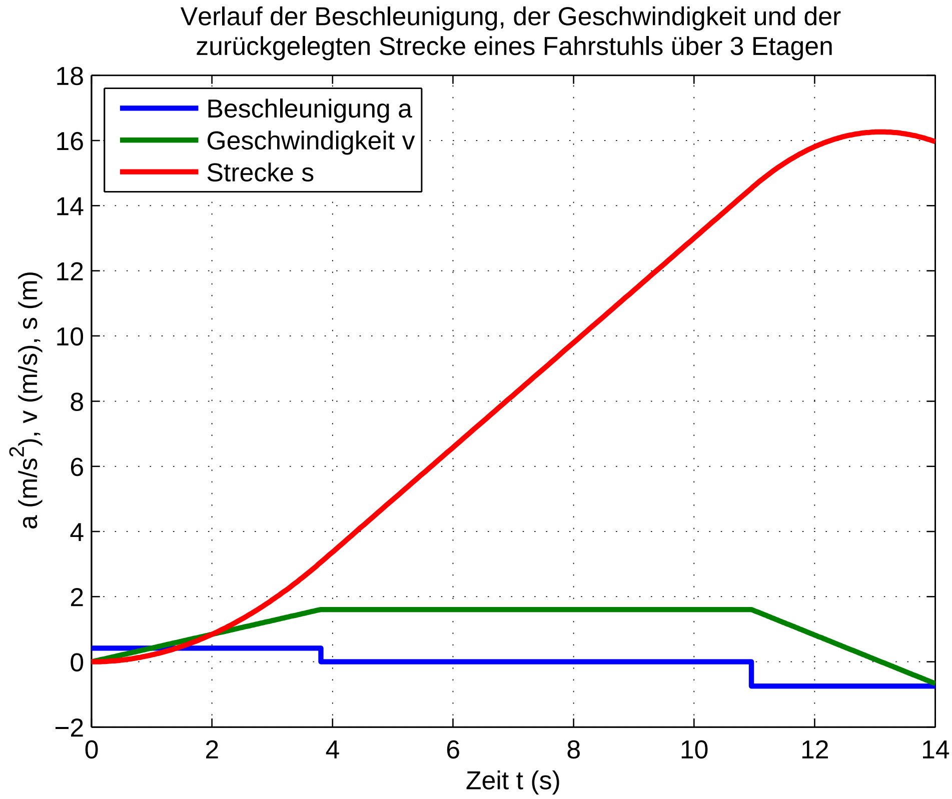
Als nächstes werden die Zeitintervalle für die Berechnung der Beschleunigung, Geschwindigkeit und der Strecke erstellt. Diese sind bezogen auf $0 \rightarrow \Delta t_n$. Die Schrittweite beträgt auch hier $\Delta t_n/100$.

```
t1i = linspace(0,dt1,100);      % Generieren der Zeitintervalle ti
t2i = linspace(0,dt2,100);      % mit n = 1, 2, 3.
t3i = linspace(0,dt3,100);      % Zeitintervall dt_3
```

Nun können alle relevanten Kurven in Form von Vektoren generiert werden. Im Anschluss wird ein Diagramm erstellt, in dem alle Kurven enthalten sind. Details zur MATLAB-Syntax werden hierbei nicht weiter beschrieben.

```
a1i = a1.*ones(1,length(t1i));  % Erstellen der a-Werte im 1. Intervall
a2i = a2.*ones(1,length(t2i));  % 2. Intervall
a3i = a3.*ones(1,length(t3i));  % 3. Intervall
ai = [a1i a2i a3i];             % Zusammenfassung der Vektoren zu ai

v1i = a1i.*t1i;                 % Erstellen der v-Werte im 1. Intervall
v2i = a2i.*t2i + a1i.*t1;
v3i = a3i.*t3i + a1i.*t1;
vi = [v1i v2i v3i];             % Zusammenfassung der v-Vektoren zu vi

s1i = 0.5 .* a1.*t1i.^2;        % Erstellen der s-Werte im 1. Intervall
s2i = 0.5 .* a2.*t2i.^2 + v2.*t2i + s1i(length(s1i));
s3i = 0.5 .* a3.*t3i.^2 + v2.*t3i + s2i(length(s2i));
si = [s1i s2i s3i];             % Zusammenfassung der s-Vektoren für den Plot

% Plotten der a-t-, v-t- und s-t-Diagramme
hDiagramme = plot(ti,ai,ti,vi,ti,si);
grid on;

% Titel, Legende und Achsenbeschriftungen
```

```
txt = {sprintf('Verlauf der Beschleunigung, der Geschwindigkeit und der '), ...
    sprintf('zurückgelegten Strecke eines Fahrstuhls über 3 Etagen')};

title(txt); xlabel('Zeit t (s)'); ylabel('a (m/s^2), v (m/s), s (m)');
legend('Beschleunigung a','Geschwindigkeit v','Strecke s','Location','NorthWest')

% Weitere Parameter wie Teilstriche und Linienbreiten
set(hDiagramme, ...
    'LineWidth',2);
```



Wie man im obigen Diagramm sieht, ist die Dauer des Abbremsvorgangs etwas kürzer als die des Beschleunigungsvorgangs. Ebenso sieht man, dass etwa eine Sekunde vor Ende der Zeitmessung der Fahrstuhl den den Rückwärtsgang einlegt, was natürlich in der Realität nicht vorkam. Diese Unstimmigkeit resultiert aus der schwierig durchführbaren Messung der einzelnen Zeitintervalle. Man muss deshalb eine Fehlerrechnung durchführen um zu sehen, ob die Fehlergrenzen dieser Methode mit den präziseren Messmethoden (Meterband) überlappen.

Teil 2: Beschleunigungsmessung mit dem Smartphone

Für die Ermittlung der Beschleunigungs-Zeit-Kurve wurde ein Smartphone vom Typ "Alcatel one touch 918D" verwendet. Die verwendete App namens "Accelerometer Monitor" konnte kostenlos aus dem Google Play Store heruntergeladen werden.

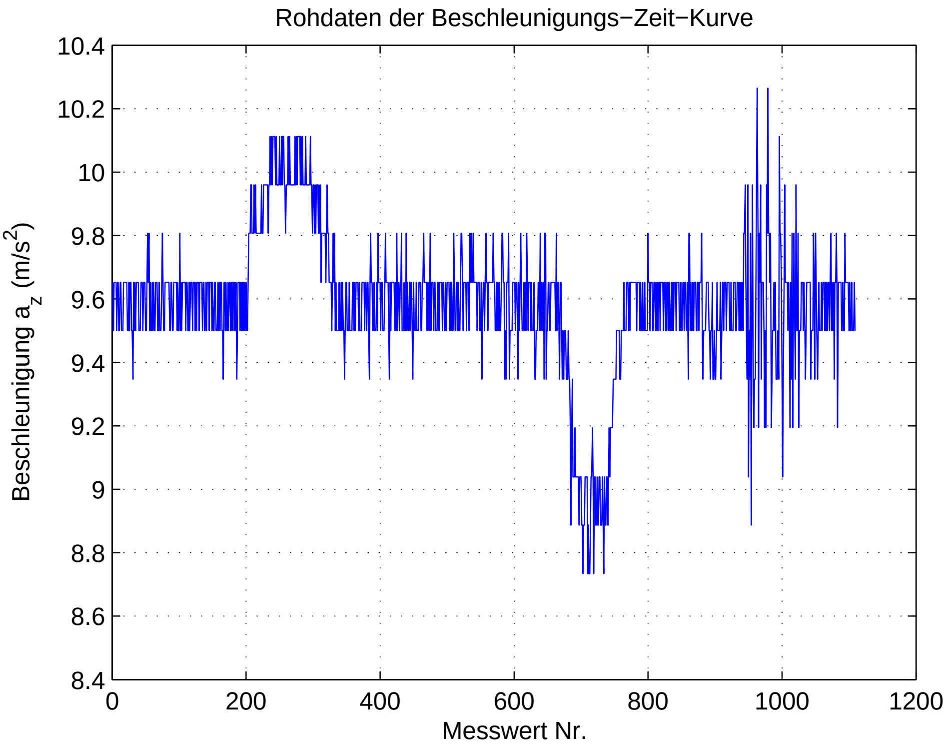
Der Sensor besitzt eine Auflösung von $0.004 m/s^2$, nimmt Beschleunigungen in drei Achsen (x, y, und z) auf und die eingestellte Zeitauflösung beträgt 20 bis 60 ms.

Die aufgenommenen Daten werden in einer Textdatei abgespeichert und können via USB-Kabel leicht auf einen PC übertragen werden. Zur Auswertung wird das Computeralgebra-Programm MATLAB verwendet.

Auslesen und Darstellen der Daten

Die Daten wurden bei einer Fahrt mit dem Fahrstuhl aus dem -2. Stockwerk ins 1. Stockwerk aufgenommen. Zunächst werden die Rohdaten ausgelesen und grafisch in einem $a_z - t$-Diagramm dargestellt.

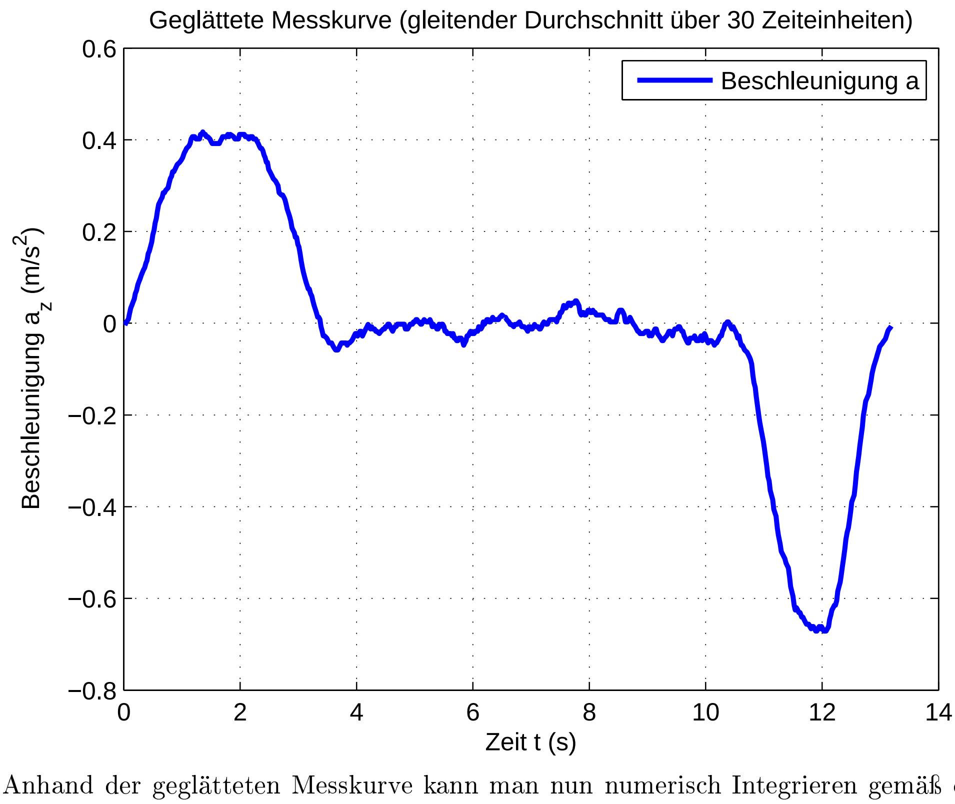
```
rohdaten = load('messung_neubau_20130430.txt');       % Laden der Rohdaten
z_roh = rohdaten(:,3);          % 3. Spalte = Beschleunigungswerte z-Achse
dt = rohdaten(:,4);             % 4. Spalte = Zeitintervalle dt

plot(z_roh); grid on            % Plotten der Kurve
title('Rohdaten der Beschleunigungs-Zeit-Kurve');
xlabel('Messwert Nr.'); ylabel('Beschleunigung a_z (m/s^2)');
```



Wie man im obigen Diagramm sieht, sind die Rohdaten in dieser form nicht auswertbar. Man sieht lauter "Stufen", die aufgrund der Diskretisierung entstehen und einige Spitzen, die durch Wackler bzw. Störungen verursacht wurden. Ausserdem haben wir einen Offset von ca. $9.6 m/s^2$ gegenüber dem Nullpunkt.

Diese Kurve wird nun etwas aufgepeppt. Die nicht benötigten Messwerte (Ruhezustand vor dem Losfahren bzw. nach dem Stoppen) werden entfernt und es wird ein sog. gleitender Mittelwert gebildet, um die Streuung der Werte zu verringern. Ebenfalls wird der Offset von ca. $9.6 m/s^2$ abgezogen.

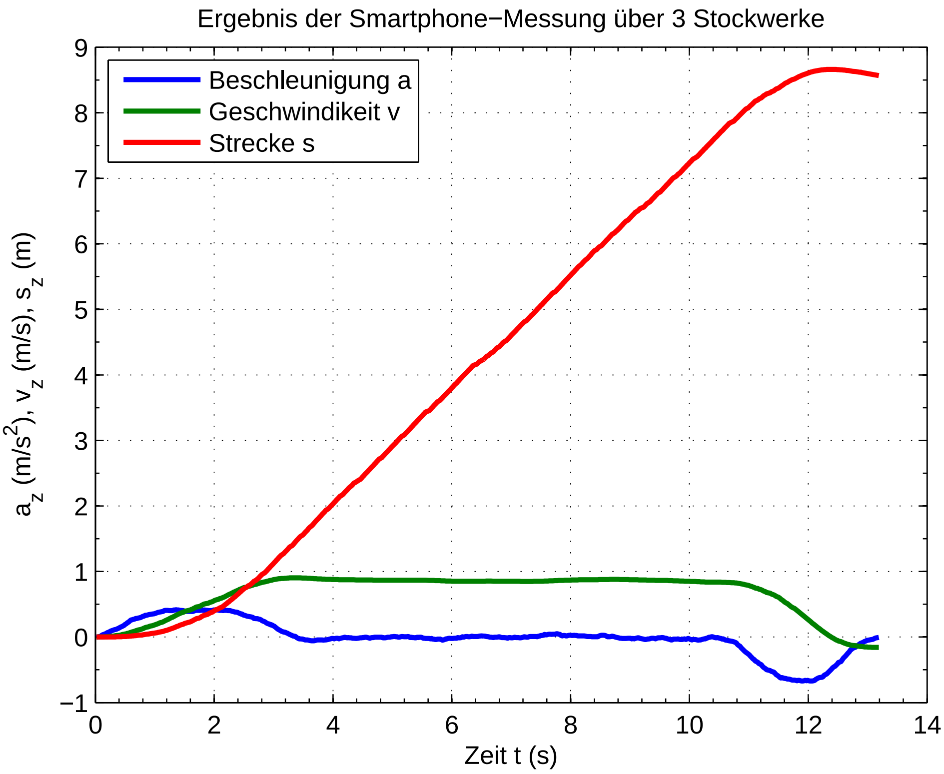
```
g = mean(z_roh(400:600));       % Gemitteltes g zur Berechnung des Offsets

z_roh = z_roh(189:777) - g;     % Die nicht benötigten Messwerte werden
dt = dt(189:777)/1000;          % weggelassen, Offset wird subtrahiert
t = zeros(length(dt),1);        % Erstellen des Zeilenvektors t

% Aufsummieren der Zeitintervalle zu einem Zeitvektor t
n = length(dt);
    t(1) = dt(1);
for i = 2:n
    t(i) = t(i-1) + dt(i);
end

% Bildung des gleitenden Durchschnitts mit einer Spanne von 30 Zeiteinheiten
span = 30;
window = ones(span,1)/span;
az = convn(z_roh,window,'same');

plot(t,az,'LineWidth',2); grid on
title('Geglättete Messkurve (gleitender Durchschnitt über 30 Zeiteinheiten)');
xlabel('Zeit t (s)'); ylabel('Beschleunigung a_z (m/s^2)');
legend('Beschleunigung a');
```



Anhand der geglätteten Messkurve kann man nun numerisch Integrieren gemäß der Trapezregel. Die hierfür benötigte MATLAB-Funktion heisst `cumtrapz()`. Der Vorfaktor von 0.0224 entspricht der mittleren Zeitdifferenz zwischen den Messwerten. Leider speichert das Handy nicht alle Messwerte in gleichmäßigen

Zeitabständen (diese schwanken zwischen 20 und 60ms), vermutlich aufgrund des hohen Rechenaufwandes während der Messung.

```
vz = 0.0224.*cumtrapz(az);      % Numerische Integration der Beschleunigung
sz = 0.0224.*cumtrapz(vz);      % Numerische Integration der Geschwindigkeit

plot(t,az,t,vz,t,sz,'LineWidth',2); grid on
title('Ergebnis der Smartphone-Messung über 3 Stockwerke');
xlabel('Zeit t (s)'); ylabel('a_z (m/s^2), v_z (m/s), s_z (m)');
legend('Beschleunigung a','Geschwindikeit v','Strecke s','Location','NorthWest');

set(gca, ...
    'XMinorTick','on',...
    'YMinorTick','on',...
    'Box','on');
```



Das Ergebnis der Smartphone-Messung lässt sich sehen. Aufgrund der Zeitmessung im Millisekundenbereich lassen sich die Zeitintervalle genauer konstruieren und die zurückgelegte Strecke von $s_{ges} = 8.6m$ weicht nur um 15% vom genau bestimmten Wert von $h = 10.1m$ ab. Allerdings sind die Messunsicherheiten dieser Messung unbekannt

Fazit

Betrachtet man die Ergebnisse der analogen Methode, so liegt die Unsicherheit der bestimmten Strecke in der Größenordnung des Messwerts. Ein Messwert mit einer relativen Unsicherheit von 100% ist nicht aussagekräftig genug. Man müsste also die Zeitmessung verbessern, um die Unsicherheiten der Strecke zu minimieren.

Die Messung mit dem Smartphone lässt sich leider nicht ohne weitere Schritte auswerten. Man muss die stark verrauschte Kurve glätten, anschliessend numerisch integrieren. Die Methode scheint dennoch wesentlich genauer zu sein als die analoge Methode mit der Stoppuhr und der Personenwaage!

Copyright