

Inhaltsverzeichnis

Aufgabe 1: Punktmasse.....	2
Aufgabe 2: Tempomat.....	4
Aufgabe 3: Abstandsregler.....	6
Aufgabe 4: Erweiterung um rotierende Massen.....	7
Aufgabe 5: Elektrischer Antrieb.....	8
Aufgabe 6: Elektromechanisches Fahrzeugmodell.....	12
Aufgabe 7:	16
Aufgabe 8:	16

Aufgabe 1: Punktmasse

Ein Fahrzeug soll durch eine Punktmasse auf einem Geländeprofil (schiefe Ebene) abgebildet werden, siehe folgende Abbildung. Hierbei erzeugt die Kraft F den Antrieb in Vorwärtsrichtung, die Hangabtriebskraft F_{ab} berücksichtigt den Einfluss der Schwerkraft in Abhängigkeit der Steigung im Gelände. Das Fahrzeug wird als System interpretiert, bei dem die genannten Kräfte als Stellgröße und Störgröße berücksichtigt werden. Ausgangsgröße ist die Geschwindigkeit v in Vorwärtsrichtung. Das Fahrzeug hat die Masse m .

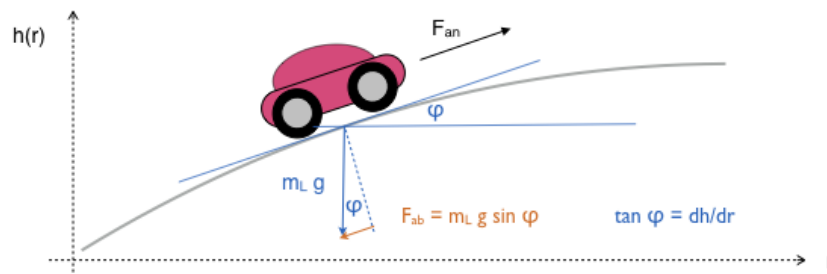


Frage 1.1: Physikalisches Modell. Erstellen Sie die Systemgleichungen.

Lösung: Es gilt hierbei in Fahrrichtung: Die Differenz der Antriebskraft und der Abtriebskraft ergibt die Beschleunigung der Fahrzeugmasse.

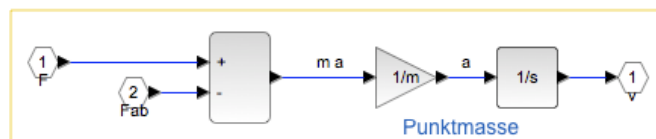
$$m a = F(t) - F_{ab}(t) = F(t) - m g \sin(\phi(t)) \quad (1.1)$$

Hierbei berechnet sich die Abtriebskraft aus dem Gradienten des Geländeprofils.



Frage 1.2: Erstellen Sie ein Fahrzeugmodell für die Simulation. Skizzieren Sie den Signalfuss.

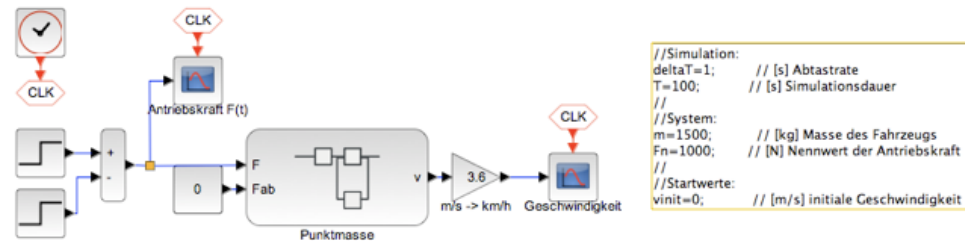
Lösung:



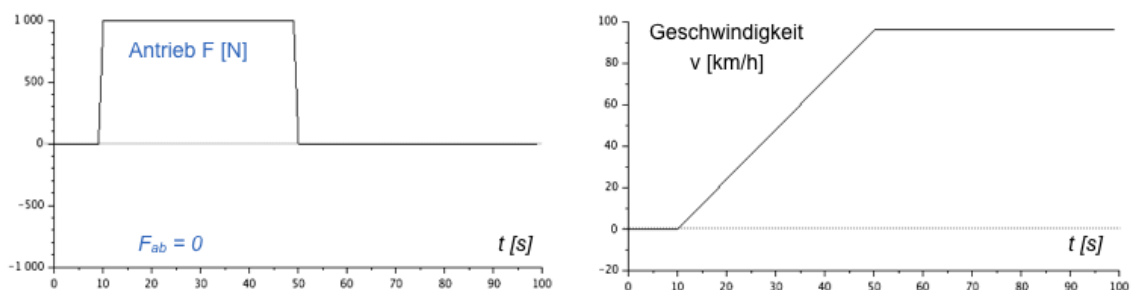
Frage 1.3: Simulation. Verwenden Sie eine realistische Größe für die Masse und für das Gelände. Simulieren Sie die Strecke. Überprüfen Sie die Ergebnisse auf Plausibilität.

Lösung: Vorgabe Masse $m = 1500 \text{ kg}$ für einen PKW. Um den Wagen auf einer Steigung mit Winkel $\varphi = 45/2 \text{ Grad} = 22,5 \text{ Grad} = \pi/8$ zu halten, wäre somit eine Kraft von $F = m g \sin(\pi/8)$ erforderlich. Mit $g \approx 10 \text{ m/s}^2$ beträgt die hierfür erforderliche Antriebskraft $F = 5740 \text{ N}$.

Aufbau der Simulation:

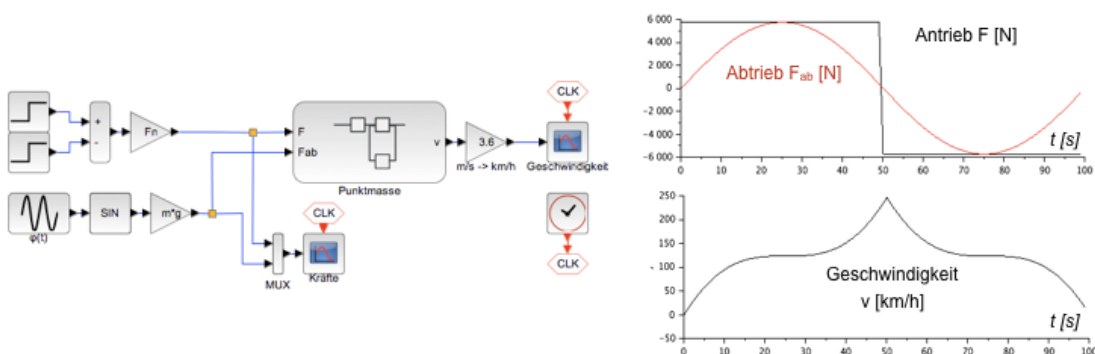


Simulationslauf mit $F = 1000 \text{ N}$ (ohne Steigung) zur Überprüfung der Plausibilität:



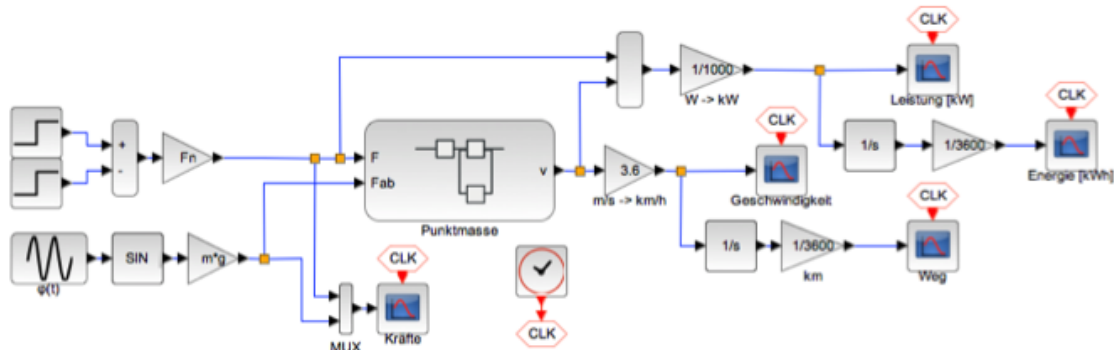
Frage 1.4: Fahrzyklus. Geben Sie ein Geländeprofil als Teststrecke für einen Fahrzyklus vor. Simulieren Sie das Fahrzeug.

Lösung: Ohne Regler kann das Fahrzeug nur schwer auf einer konstanten Geschwindigkeit gehalten werden, siehe Simulationslauf unten. Das gewählte Geländeprofil besitzt eine sinusförmige Steigung von maximal $\varphi_{\max} = 22,5 \text{ Grad}$. Das Geländeprofil ist dann negativ kosinusförmig, steigt also zunächst an. Die Abtriebskraft folgt der Steigung und ist somit sinusförmig. Die Antriebskraft wurde grob der Abtriebskraft angepasst (Verlauf als Rechteck-Signal).

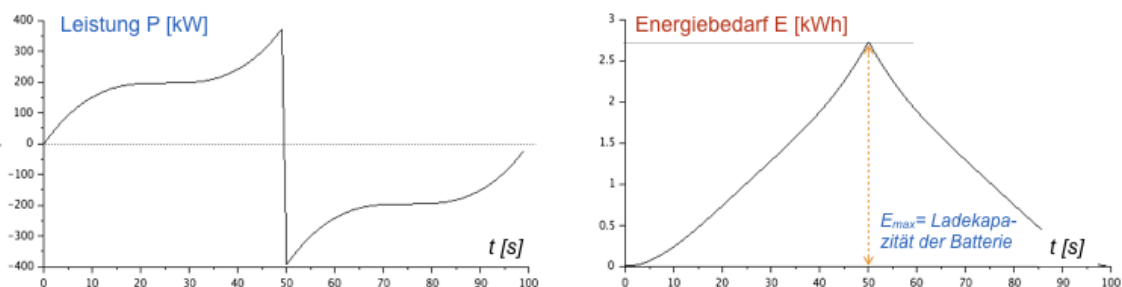


Frage 1.5: Leistung und Energie. Ermitteln Sie die benötigte Leistung und den Energiebedarf für den Fahrzyklus. Es sei hierbei angenommen, dass sich Energie beim Bremsen rückgewinnen (Rekuperation) lässt. Wie groß ist der Energiebedarf ohne Rückgewinnung der Bremsenergie?

Lösung: Bei dem gewählten extremen Fahrprofil ohne Begrenzung bzw. Regelung der Antriebskraft (bzw. Bremskraft) sind Leistung und Energiebedarf ebenfalls extrem. Die benötigte (bzw. erzeugte) Leistung ermittelt sich hierbei aus dem Produkt der Antriebskraft und der Geschwindigkeit. Die Energie aus dem Integral der Leistung. Folgende Abbildung zeigt die Strecke.



Ein Simulationslauf zeigt folgende Ergebnisse (Antrieb und Geschwindigkeit siehe Frage 1.4):



Mit dem gewählten Fahrprofil und dem Profil der Antriebskraft wäre eine Motorkraft von mehr als 400 kW sowohl zur Abgabe als auch zur Aufnahme der Leistung (im Bremsbetrieb) erforderlich. Die Energiemenge im Fahrzyklus beträgt im Beispiel ca 3 kWh. Diese Energiemenge müsste die Batterie bereitstellen bzw. aufnehmen.

Da keine Reibungsverluste berücksichtigt wurden, kann die Energie vollständig auf der gewählten Teststrecke vollständig zurück gewonnen werden. Grund hierfür ist, das Startpunkt und Endpunkt des Profils auf gleicher Höhe liegen. Diese Bedingung ist bei einer Rundfahrt immer gegeben (Startpunkt und Endpunkt der Reise sind gleich). Bei der Möglichkeit zur Rückgewinnung ist für eine Rundfahrt keine Energie erforderlich.

Frage 1.6: Reibung. Erweitern Sie Ihr Streckenmodell um Rollreibung bzw. Luftreibung.

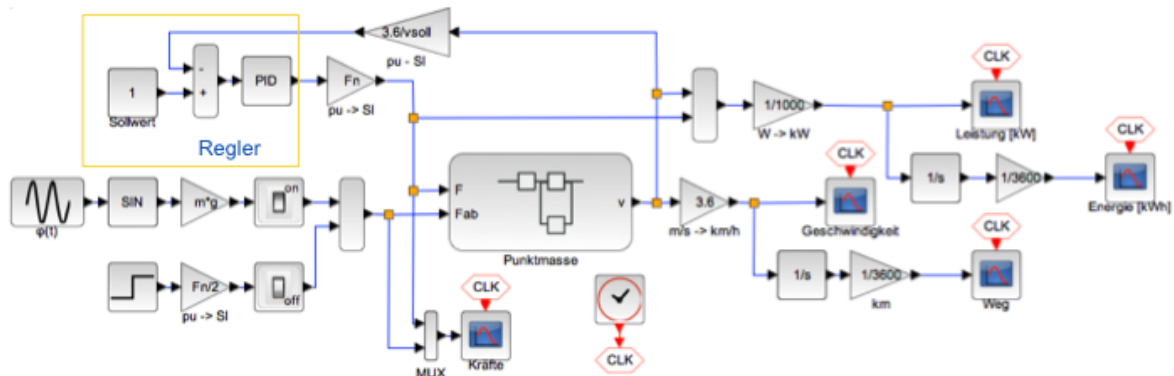
Aufgabe 2: Tempomat

Da die Geschwindigkeit des einfachen Modells ohne Regler nur schwer zu halten ist, soll ein Tempomat die Regelung der Geschwindigkeit übernehmen. Hierzu soll ein fester Sollwert für die Geschwindigkeit vorgegeben werden können. Die Aufgabe des Reglers ist es, diese Geschwindigkeit unabhängig vom Geländeprofil zu halten.

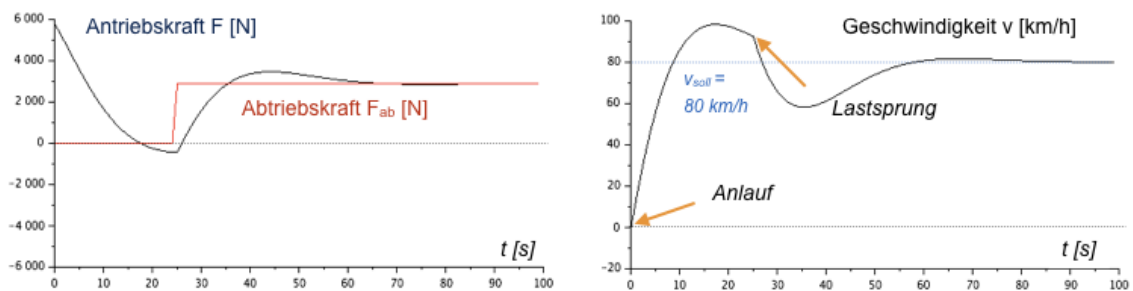
Frage 2.1: Erstellen Sie den Regler.

Lösung: Die Antriebskraft wird nun vom Regler gestellt. Der Regler erhält hierzu als Vorgabe die Differenz aus der Führungsgröße (Sollwert der Geschwindigkeit) und der Regelgröße (Istwert der Geschwindigkeit). Um den Sollwert wirklich zu treffen, ist hier ein PI-Regler erforderlich.

In folgender Abbildung wurde der Regler in pu-System realisiert (Per-Unit-System, d.h. mit normierten Signalen). Das erleichtert die Wahl der Regler-Konstanten (hier: $K_P = 1$, $K_I = 0.1$).



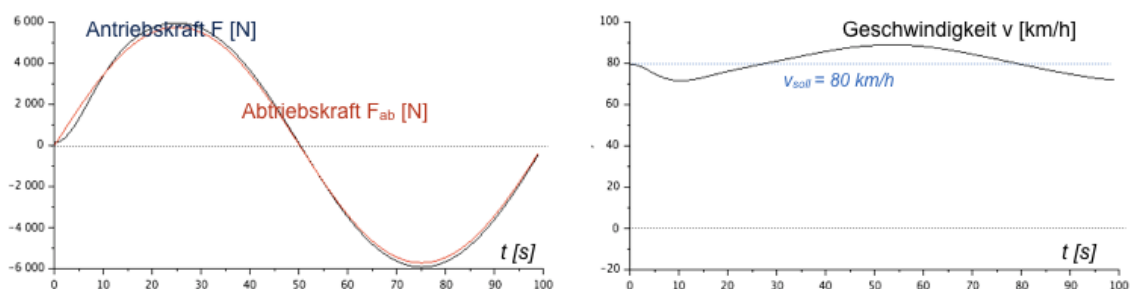
Die Funktion der Regelung wird zunächst mit Hilfe einer Sprungfunktion der Last überprüft.



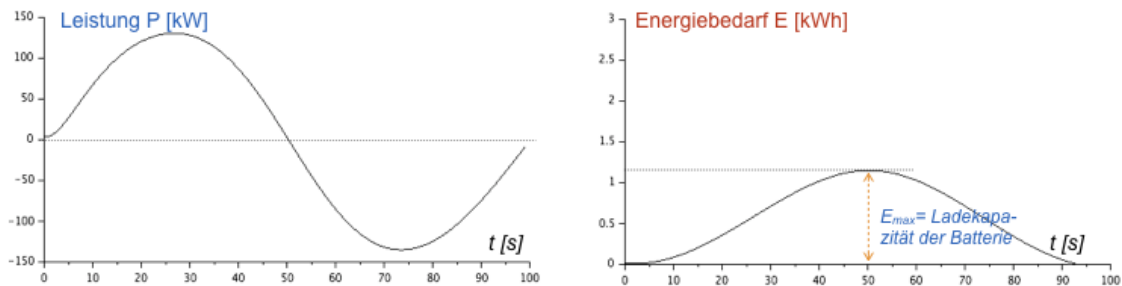
Test auf Plausibilität: Im ausgeglichenen Zustand muss die Antriebskraft der Abtriebskraft entsprechen.

Frage 2.2: Überprüfen Sie Ihr Konzept in der Simulation. Welche Unterschiede ergeben sich durch den Regler im Vergleich zum unregulierten Betrieb auf der Teststrecke? Welche Konsequenzen ergeben sich für das Fahrzeug?

Lösung: Bei geeigneter Wahl der Reglerkonstanten kann die Geschwindigkeit nun annähernd gehalten werden ((hier: $K_P = 2$, $K_I = 0.6$)).



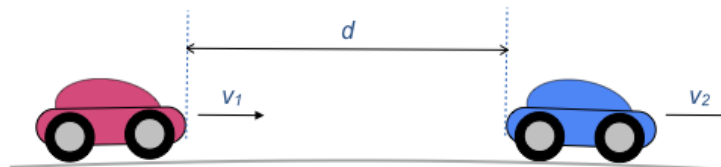
Bezüglich Leistung und Energie ergibt sich folgendes Bild: Bei annähernd konstanter Geschwindigkeit ist die Leistung proportional zur Antriebskraft. Diese wiederum folgt der Abtriebskraft. Durch die Anpassung der Antriebsleistung an die Last ist die insgesamt benötigte oder freigesetzte Leistung kleiner.



Als Konsequenz ist auch die benötigte bzw. freigesetzte Energie geringer. Ebenso fällt die benötigte Batteriekapazität nun geringer aus.

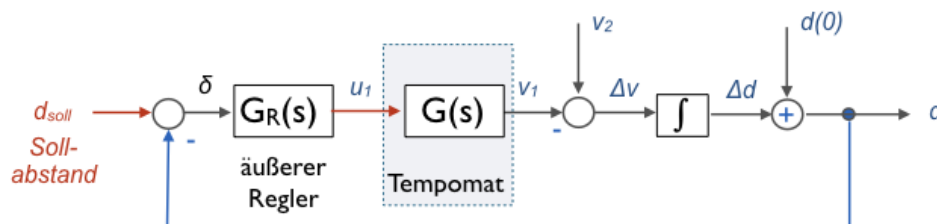
Aufgabe 3: Abstandsregler

Das Fahrzeug soll nun so geregelt werden, dass der Abstand zum voraus fahrenden Fahrzeug konstant gehalten wird. Es wird also Fahren in der Kolonne möglich. Folgende Abbildung zeigt das Prinzip.



Frage 3.1: Skizzieren Sie die Struktur der Regelung. Erläutern Sie das Funktionsprinzip.

Lösung:



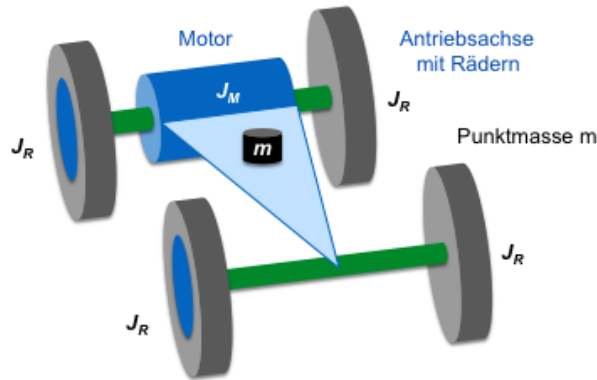
Frage 3.2: Implementieren Sie den Regler und überprüfen Sie die Funktion.

Frage 3.3: Simulieren Sie einen Fahrzyklus mit Kolonnenregler.

Frage 3.4: Welche Rolle spielt die Motorleistung beider Fahrzeuge?

Aufgabe 4: Erweiterung um rotierende Massen

Ein reales Fahrzeug besitzt Antrieb und Räder, die einerseits als rotierende Massen eine weitere Massenträgheit in das System bringen, andererseits aus dem Motormoment die Antriebskraft erzeugen. Zunächst soll das Modell des Fahrzeugs als Punktmasse um die Massenträgheit von Antrieb und Rädern erweitert werden.



Hierbei wird die Punktmasse m ergänzt um die Trägheitsmomente J_R der Räder, sowie um das Trägheitsmoment J_M des Motors.

Frage 4.1: Geben Sie realistische Abmessungen für den Rotor des Motors und die Räder vor. Schätzen Sie die Trägheitsmomente ab. Legen Sie den Radius der Räder fest.

- Lösungsbeispiel: (1) Für massive zylindrische Körper berechnet sich das Trägheitsmoment $J = m r^2 / 2$.
 (2) Für einen Motor mit Durchmesser von 28 cm und Masse 40 kg erhält man $J_M = 0,4 \text{ kg m}^2$.
 (3) Für 1 Rad der Masse 20 kg (Felge und Reifen) und 40 cm Durchmesser ergibt sich $J_{R1} = 0,4 \text{ kg m}^2$.
 (4) Insgesamt erhält man somit ein Trägheitsmoment von $J_{\text{ges}} = 2 \text{ kg m}^2$.

Frage 4.2: Welche Beziehung besteht zwischen dem Antriebsmoment des Motors, dem Lastmoment und den Drehimpulsänderungen der Schwungmassen? Erstellen Sie die Systemgleichung.

Lösung: Die Differenz aus Antriebsmoment und Lastmoment ergibt eine Drehimpulsänderung (d.h. Beschleunigung bzw. Bremsung der rotierenden Massen). Systemgleichung:

$$J_{\text{ges}} \dot{\omega} = M(t) - M_{\text{ab}}(t) \quad (4.1)$$

Die Struktur dieser Gleichung (Gleichgewicht der Drehmomente) stimmt mit der Struktur von Gleichung (1.1) überein (Gleichgewicht der Kräfte). Die Änderung der Drehzahl entspricht hierbei der Winkelbeschleunigung.

Bemerkung: Hierbei ist angenommen, dass die Drehzahl der Räder mit der Drehzahl des Motors übereinstimmt. Bei Verwendung eines Getriebes wären hier zwei unterschiedliche Drehzahlen einzuführen, die über das Übersetzungsverhältnis des Getriebes miteinander verknüpft sind.

Frage 4.3: Welche Beziehung besteht zwischen den Momenten und den Kräften? Erstellen Sie die Systemgleichungen.

Lösung: (1) Das Lastmoment entsteht durch die Abtriebskraft, die am Radius der Räder als Hebel wirkt. Es gilt somit $M_{\text{ab}} = F_{\text{ab}} r_{\text{Rad}}$.

(2) Das Motormoment ist durch die Bauart des Motors vorgegeben. Das Gleichgewicht mit der Abtriebskraft wird wiederum über die Räder als Hebel hergestellt. Bei Verwendung eines Getriebes wird

dieser Hebel wahlweise verlängert (mehr Kraft beim Anfahren) bzw. verkürzt (beim Halten einer höheren Geschwindigkeit mit weniger Kraft).

(3) Systemgleichungen: Es muss zusätzlich die Fahrzeugmasse (Punktmasse m) berücksichtigt werden. Die Erweiterung von Gleichung (4.1) ergibt:

$$J_{\text{ges}} \dot{\omega} + r_{\text{Rad}} m \dot{v} = M(t) - M_{\text{ab}}(t) = M(t) - r_{\text{Rad}} F_{\text{ab}}(t) \quad (4.2)$$

Interpretation: Eine Differenz von Antriebsmoment und Lastmoment führt zu einer Drehimpulsänderung der rotierenden Massen, sowie zu einer Änderung der Fahrzeuggeschwindigkeit. Die Trägheitsmomente bilden somit einen zusätzlichen Energiespeicher im System.

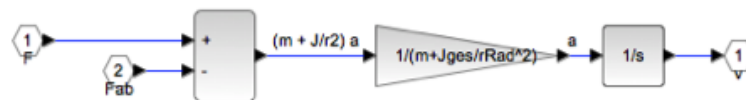
$$\frac{J_{\text{ges}} \dot{\omega}}{r_{\text{Rad}}} + m \dot{v} = F(t) - F_{\text{ab}}(t) \quad (4.2')$$

Hierbei gilt $v = \omega r_{\text{Rad}}$, und somit:

$$\left(\frac{J_{\text{ges}}}{r_{\text{Rad}}^2} + m \right) \dot{v} = F(t) - F_{\text{ab}}(t) \quad (4.2'')$$

Frage 4.4: Erstellen Sie den Signalfuss für das erweiterte Modell. Testen Sie das Modell in der Simulation. Worin bestehen die Unterschiede zum Modell mit der einfachen Punktmasse?

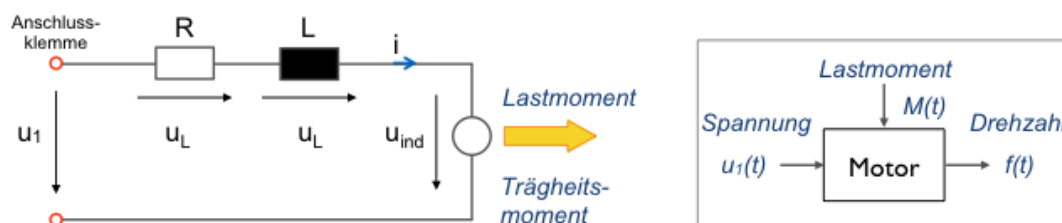
Lösung: (1) Unterschiede: Die Masse wird um die Trägheitsmomente gemäß (4.2'') erweitert.



(2) Testlauf: Es sind kaum Unterschiede zu erwarten, da die Fahrzeugmasse m nur um den Ausdruck $J_{\text{ges}}/r_{\text{Rad}}^2 \approx 50 \text{ kg}$ korrigiert wird.

Aufgabe 5: Elektrischer Antrieb

Für das Fahrzeug soll ein geeigneter elektrischer Antrieb ausgewählt werden. Im Modell soll hierfür ein Gleichstrommotor mit passender Motorleistung verwendet werden. Der Motor wird zunächst ohne Fahrzeug betrachtet. Folgende Abbildung zeigt das elektrische Ersatzschaltbild des Motors:



Frage 5.1: Elektrisches Modell. Wie lauten die elektrischen Systemgleichungen? Hinweis: Vernachlässigen Sie die Induktivität L .

Lösung:

$$u_1(t) = R i(t) + L \frac{di(t)}{dt} + u_{\text{ind}}(t) = R i(t) + L \frac{di(t)}{dt} + k_M \omega(t)$$

Da die Induktivität L nur auf Stromänderungen wirkt, ist ihr Beitrag in einem Gleichspannungssystem in aller Regel im Vergleich zur mechanischen Reaktionszeit nur eine vernachlässigbare Zeitkonstante werden. Näherungsweise gilt daher:

$$u_1(t) = R i(t) + k_M \omega(t) \quad (5.1)$$

Die induzierte Spannung u_{ind} ist proportional zur Drehzahl der Maschine. Hierbei ist k_M eine Motorkonstante (=Modellparameter).

Frage 5.2: Mechanisches Modell. Der Motor besitzt ein Trägheitsmoment (siehe Aufgabe 4). Wie lauten die mechanischen Systemgleichungen.

Lösung: siehe Gleichung (4.1)

$$J_M \dot{\omega} = M_M(t) - M_{\text{Last}}(t) \quad (5.2)$$

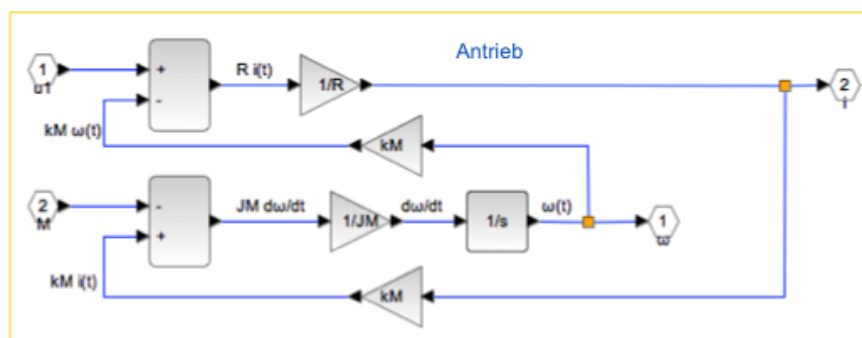
Die Differenz von Motormoment und Lastmoment bewirkt eine Drehimpulsänderung der Maschine. Das Motormoment ist proportional zum Motorstrom: $M_M(t) = k_M i(t)$:

$$J_M \dot{\omega} = k_M i(t) - M_{\text{Last}}(t) \quad (5.2')$$

Frage 5.3: Systemmodell. Fassen Sie die Systemgleichungen zu einem Signalfluss zusammen.

Lösung: Gemäß der gewählten Systembeschreibung (siehe Abbildung unter Aufgabe 5) sind die Klemmenspannung $u_1(t)$ und das Lastmoment $M(t) = M_{\text{Last}}(t)$ Eingangsgrößen. Die Drehzahl $f(t)$ ist Ausgangsgröße. Der Strom $i(t)$ ist eine interne Größe (Zustandsgröße). Beide Gleichungen sind über den Strom $i(t)$ und die Kreisfrequenz $\omega(t)$ miteinander gekoppelt.

Aus den Systemgleichungen (5.1) und (5.2') ergibt sich folgender Signalfluss:



Hierbei wurde außer der Drehzahl (bzw. Kreisfrequenz) auch der Motorstrom herausgeführt.

Frage 5.4: Modellparameter. Welches sind die Parameter (= Kenngrößen) des Antriebs im Modell?

Lösung: R , k_M , J_M

Frage 5.5: Modellparameter bestimmen. Bestimmen Sie die Modellparameter aus folgenden Vorgaben:

- Motorleistung P_n (= mechanische Leistung) = 100 kW
- Nennspannung U_n = 400 V

- Nenndrehzahl $f_n = 3000 \text{ 1/min}$ ($f_{\max} = 15000 \text{ 1/min}$)
- Wirkungsgrad $\eta = 0,95$
- Masse m_M und Durchmesser d_M des Motors: 60 kg, 0,4 m.

Lösung: (1) Es gilt $P_{\text{mech}} = P_n = M_n \omega_n$. Da P_n und ω_n gegeben sind, folgt hieraus das Nennmoment $M_n = 318 \text{ Nm}$.

(2) Im Motorbetrieb wäre die elektrische Leistung $P_{\text{el}} = P_n / \eta = U_n I_n$. Hieraus folgt der Nennstrom $I_n = 263 \text{ A}$.

(3) Aus dem Nennmoment und Nennstrom berechnet sich die Maschinenkonstante

$$k_M = M_n / I_n = 1,21 \text{ Nm/A} = 1,21 \text{ Vs/A} = 1,21 \text{ Vs.}$$

Plausibilität: Es gilt auch $u_{\text{ind}} = k_M \omega$. Auch hierfür wäre die korrekte physikalische Einheit von $[k_M] = \text{Vs}$.

(4) Der Verlustwiderstand R berechnet sich aus der Verlustleistung bei Nennstrom. Es gilt $(P_{\text{el}} - P_n) = I_n^2 R$. Hieraus folgt

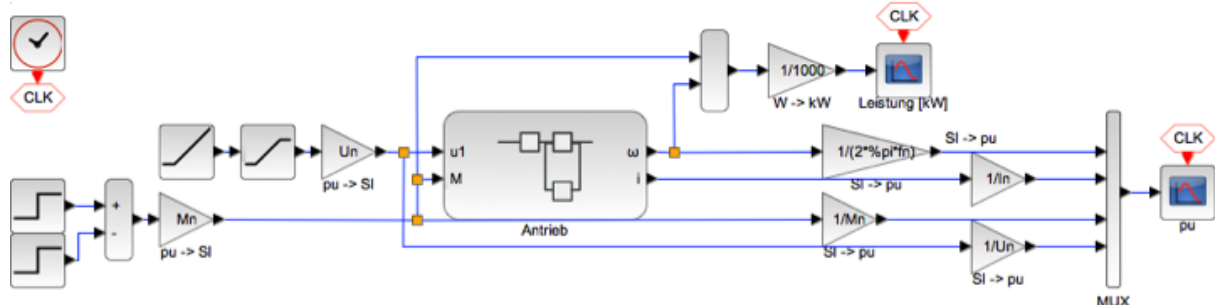
$$R = 0,076 \Omega.$$

(5) Trägheitsmoment J_M : Lässt sich grob abschätzen gemäß der Zylinderformel $J = m r^2/2$.

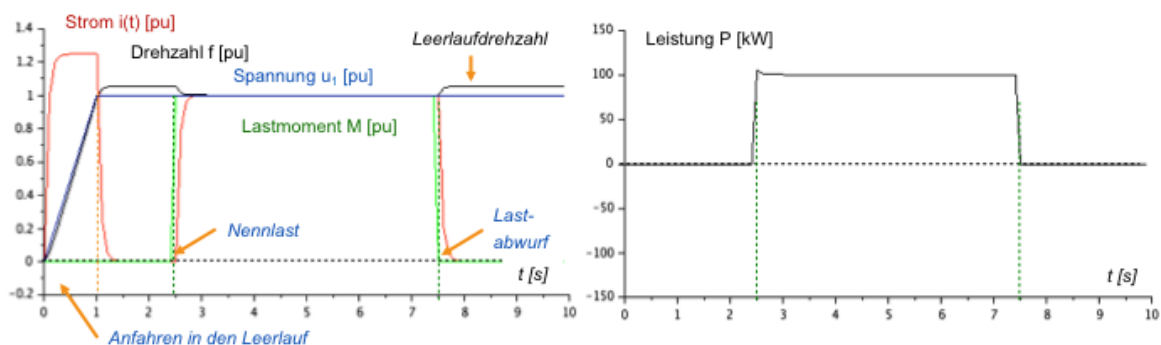
$$J_M = 1.2 \text{ kg m}^2.$$

Frage 5.6: Wählen Sie passende Modellparameter für ihr Fahrzeug aus und simulieren Sie den Antrieb. Hinweis: Es genügt eine Simulation des Antriebs ohne das Fahrzeug.

Lösungsbeispiel: Aufbau der Simulation



Am Eingang wird die Spannung mit Hilfe einer Rampe auf die Nennspannung hochgefahren. Dieser Start soll andernfalls zu hohe Einschaltströme verhindern. Zunächst ist noch keine Last vorhanden: Die Maschine sollte also die Leerlaufdrehzahl erreichen. Zu gegebener Zeit wird das Nennmoment als Lastsprung zugeschaltet, später wieder abgeschaltet. Die Maschine zeigt folgendes Verhalten.



Zur besseren Vergleichbarkeit wurden alle Signale auf die Nennwerte normiert. Zwecks Prüfung der Plausibilität wurde außerdem die mechanische Leistung in kW errechnet. Die Maschine erreicht bei Nennspannung und Nennmoment die gewünschte Leistung.

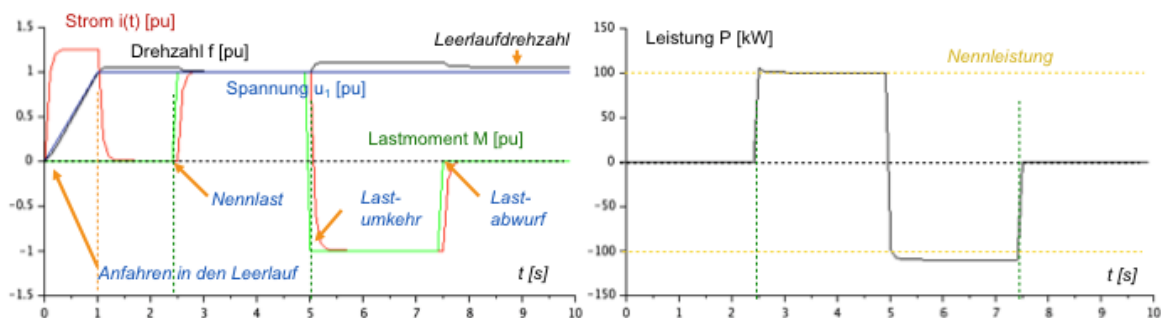
Das Zeitverhalten zeigt, dass bei Nennwerten alle Größen die gewünschte Normierung erreichen. Im Anlauf ergibt sich ein Anlaufstrom, solange die Eingangsspannung steigt. Sobald bei konstanter Eingangsspannung die Leerlaufdrehzahl erreicht ist, sinkt der Motorstrom auf annähernd Null.

Mit zugeschaltetem Lastmoment folgt der Motorstrom der Last, bis auf die Beschleunigung bzw. Abbremsung der trägen Masse des Antriebs.

Frage 5.7: Generatorbetrieb bei Gefälle. Bei negativem Lastmoment soll die Maschine dieses Lastmoment in elektrische Energie umsetzen, die in einer Batterie gespeichert werden soll. Erweitern Sie Ihre Maschine für den Betrieb bei umgekehrten Lastmoment.

Lösung: Der Generatorbetrieb wird einfach dadurch hergestellt, dass sich die Richtung des Drehmomentes umkehrt (Gefälle statt Steigung). Die Höhe der Klemmenspannung wird hierbei konstant gehalten. Da der Strom dem Lastmoment folgt, kehrt sich bei negativem Lastmoment die Richtung des Stromes um. Somit wird das Produkt aus Strom $i(t)$ und Spannung $u_1(t)$ an der Klemme der Maschine ebenfalls negativ: Die Spannungsquelle nimmt elektrische Leistung auf.

Folgende Abbildung zeigt einen Simulationslauf:



Hierbei wurden die Eingangsgrößen wie folgt gewählt:

- Klemmenspannung $u_1(t)$: Anfahren bis $T = 1\text{s}$, dann konstanter Wert $u_1(t) = U_n$
- Lastmoment $M(t)$: positives Lastmoment $M(t) = M_n$ zum Zeitpunkt $T = 2.5\text{s}$ (schiefe Ebene mit positiver Steigung); Zum Zeitpunkt $T = 5\text{s}$ negatives Lastmoment $M(t) = -M_n$; Lastabwurf $M(t) = 0$ ab Zeitpunkt $T = 7.5\text{s}$.

Die Ausgangsgrößen zeigen folgendes Verhalten:

- Strom $i(t)$: folgt dem Lastmoment (siehe Gleichung (5.2')); Hierdurch Stromumkehr beim Vorzeichenwechsel des Lastmoments bei konstanter Klemmenspannung.
- Drehzahl $f(t)$: folgt der Klemmenspannung (siehe Gleichung (5.1)); Der Beitrag $R i(t)$ kann wegen des großen Wirkungsgrades hierbei vernachlässigt werden. Bei Lastumkehr wird somit die Drehrichtung beibehalten. Hierdurch dreht sich bei Lastumkehr das Vorzeichen der mechanischen Leistung um.
- Leistung $P(t) = P_{\text{mech}}(t) = M(t) \omega(t)$: Bei Lastumkehr folgt eine Umkehr der Leistung. Wegen des Wirkungsgrades der Maschine wird hierbei mehr mechanische Leistung aufgenommen als an der Klemme der Maschine elektrisch aufgenommen wird.

An der Maschine selbst sind somit für den Generatorbetrieb keine Änderungen erforderlich. In einem realen System würde die Klemmenspannung $u_1(t)$ durch die Fahrzeugbatterie auf einem konstanten Wert gehalten werden. Im Modell übernimmt diese Rolle die ideale Klemmenspannung $u_1(t)$.

Frage 5.8: Einfluss der Klemmenspannung. Wie verhält sich die Maschine unter den gleichen Lastverhältnissen, wenn die Klemmenspannung konstant auf Null gehalten wird (kurzgeschlossene Maschinenklemmen)? Erläutern Sie das Verhalten.

Aufgabe 6: Elektromechanisches Fahrzeugmodell

Der Gleichstrommotor soll nun als Antrieb ins Fahrzeugmodell eingebaut werden. Hierbei wird so vorgegangen, dass das Fahrzeug um den Antrieb entwickelt wird.

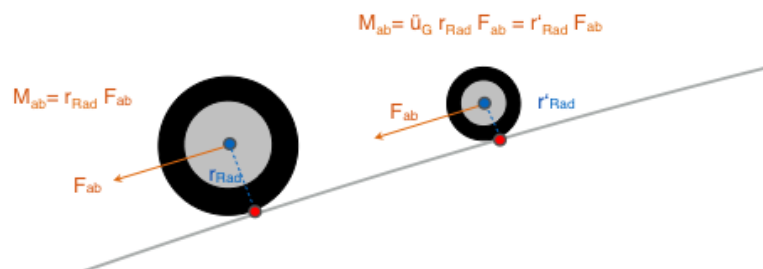
Frage 6.1: Lastmoment und Steigungswinkel. Wie hängen Lastmoment und Hangabtriebskraft zusammen? Lässt sich aus dem Lastmoment der Steigungswinkel des Geländes rekonstruieren?

Lösung: (1) Die Hangabtriebskraft besitzt als Hebel den Radius des Rades, d.h. $M_{ab} = F_{ab} r_{Rad}$.

(2) Verwendet man den Ansatz $F_{ab} = M_{ab}/r_{Rad} = m g \sin(\varphi)$, so lässt sich aus der Vorgabe des Lastmomentes der Steigungswinkel φ rekonstruieren.

Frage 6.2: Getriebe. Welche Rolle spielt ein Schaltgetriebe im Fahrzeug?

Lösung: Ein Schaltgetriebe mit Übersetzung $\ddot{u}_G = \varphi_{Rad}/\varphi_{Motor}$ verändert den effektiven Raddurchmesser, d.h. $r'_{Rad} = r_{Rad} \ddot{u}_G$. Dreht sich der Motor z.B. pro Radumdrehung um 2 Umdrehungen ($\ddot{u}_G = 0.5$), so halbiert sich hierdurch der effektive Raddurchmesser (und somit der Hebel der Abtriebskraft). Umgekehrt betrachtet, kann bei gleichem Motormoment am Rad die doppelte Kraft entwickelt werden. Folgende Abbildung illustriert das Prinzip.



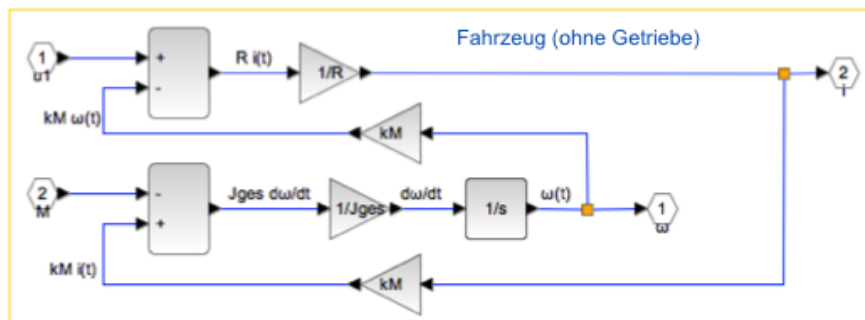
Der Preis des kürzeren Hebels der Abtriebskraft ist der verkürzte Weg bei gleicher Drehzahl, und somit die geringere Bahngeschwindigkeit.

Frage 6.3: Fahrzeugmodell. Erweitern Sie Ihr Antriebsmodell um das Fahrzeugmodell. Verzichten Sie hierfür zunächst auf ein Getriebe.

Lösung: Im einfachsten Fall wird die Punktmasse aus Gleichung (4.2) im vorhandenen Fahrzeugmodell als Trägheitsmoment berücksichtigt. Sofern kein Getriebe vorhanden ist und somit eine einheitliche Drehzahl ω für Rad und Motor gilt, ergeben sich hierdurch keinerlei Einschränkungen.

$$J_M \dot{\omega} + 4 J_{Rad} \dot{\omega} + r_{Rad} m \dot{v} = (J_M + 4 J_{Rad} + r_{Rad}^2 m) \dot{\omega} = M(t) - M_{ab}(t)$$

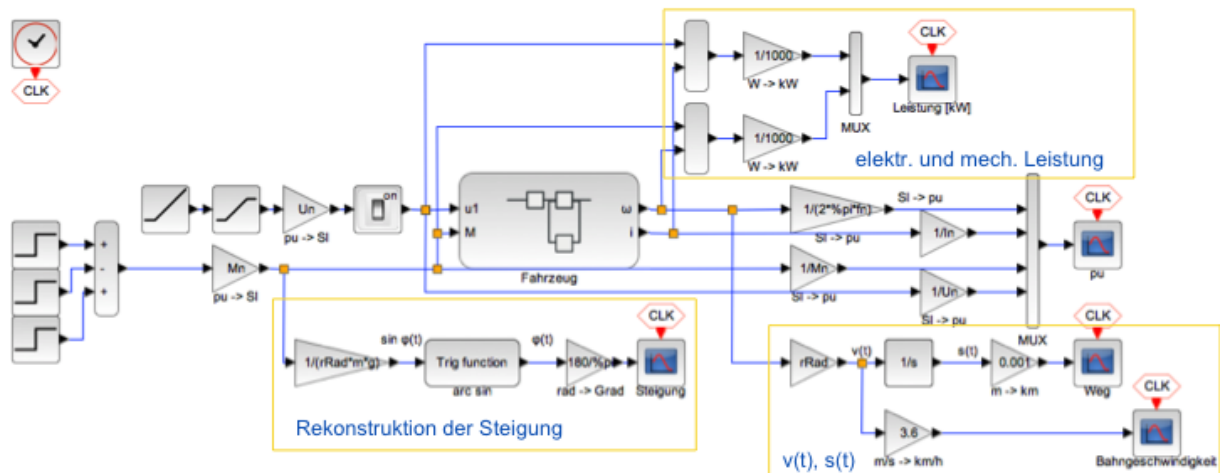
Die Trägheitsmomente von Motor, 4 Rädern und das äquivalente Trägheitsmoment der Punktmasse über der Winkelgeschwindigkeit der Räder lassen sich zu einem Gesamtträgheitsmoment zusammenfassen. Folgende Abbildung zeigt den Signalfuss.



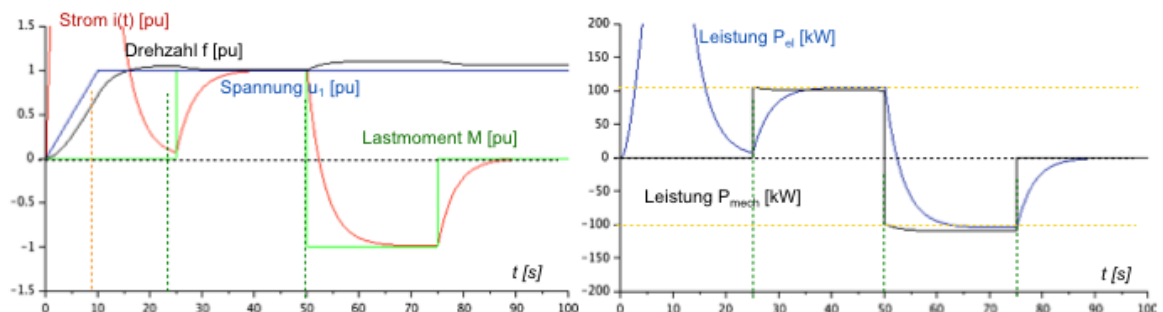
Bemerkung: Bei Einbau eines Getriebes müssten zwei um die Übersetzung zueinander proportionale Drehzahlen eingeführt werden: $\omega = \omega_M = \omega_{Rad} / \dot{U}_G$. Der Beitrag der Trägheitsmomente zum gesamten Trägheitsmoment wäre anteilig zu den Drehzahlen.

Frage 6.4: Simulation. Testen Sie Ihr Modell in der Simulation.

Lösungsbeispiel: Der Aufbau des Antriebs kann beibehalten werden.



Wesentlicher Unterschied ist das nun erheblich vergrößerte effektive Trägheitsmoment ($J_{ges} = 62,8 \text{ kgm}^2$ gegenüber vorher $J_M = 1,2 \text{ kg m}^2$). Die Simulationsdauer wurde daher um eine Faktor 10 verlängert. Folgende Abbildung zeigt einen Simulationslauf.

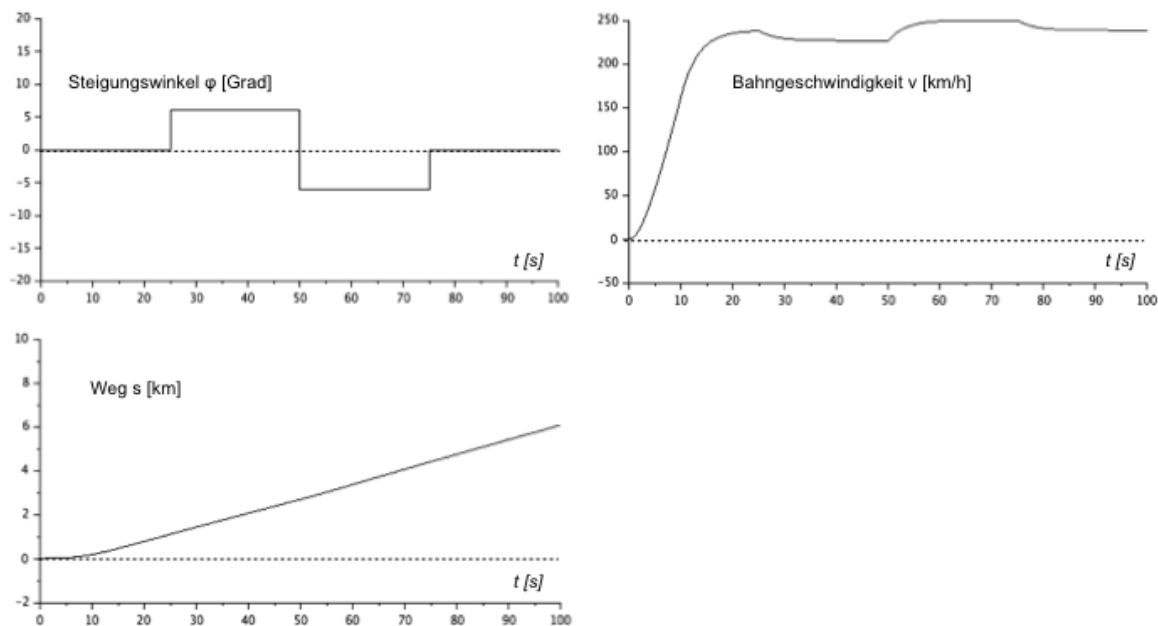


In der verlängerten Simulationsdauer wurde das Verhalten der Eingangsgrößen gegenüber der Simulation des Antriebs ohne Fahrzeug beibehalten, d.h. Anfahren bis auf konstante Spannung, dann einen sprungförmigen Lastwechsel. Es zeigt sich der Einfluss der nun sehr viel größeren trägen Masse.

Als Ausgangsgrößen wurden die elektrische und mechanische Leistung betrachtet. Während die mechanische Leistung bei nahezu konstanter Drehzahl dem vorgegebenen Lastmoment folgt, zeigt die elektrische Leistung, dass das Fahrzeug beim Anfangen eine erhebliche elektrische Energie zur Beschleunigung der Massen benötigt. Die Konsequenz sind erhebliche Ströme beim Anfahren.

Während der Lastwechsel sorgt die im Fahrzeug gespeicherte kinetische Energie für einen verzögerten Einsatz der benötigten bzw. abgegebenen elektrischen Leistung. Da die Drehzahl (und somit die Bahngeschwindigkeit) bei konstanter Spannung nahezu konstant bleiben, darf man davon ausgehen, dass bei einem Bremsmanöver (mit reduzierter Klemmenspannung) die Bremsströme ebenfalls erheblich würden.

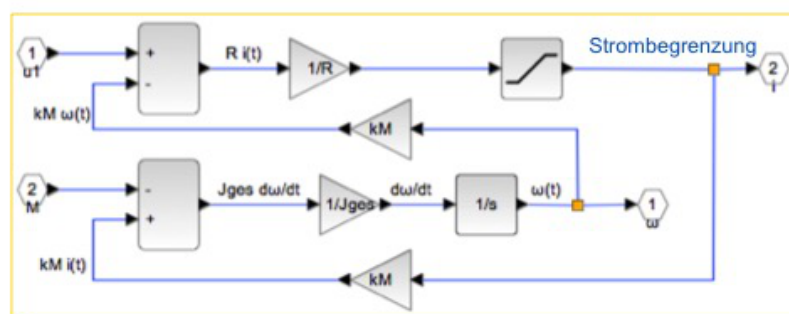
Steigungswinkel der Strecke, Bahngeschwindigkeit und zurückgelegter Weg lassen sich aus dem Modell ebenfalls rekonstruieren, wie folgende Abbildung zeigt.



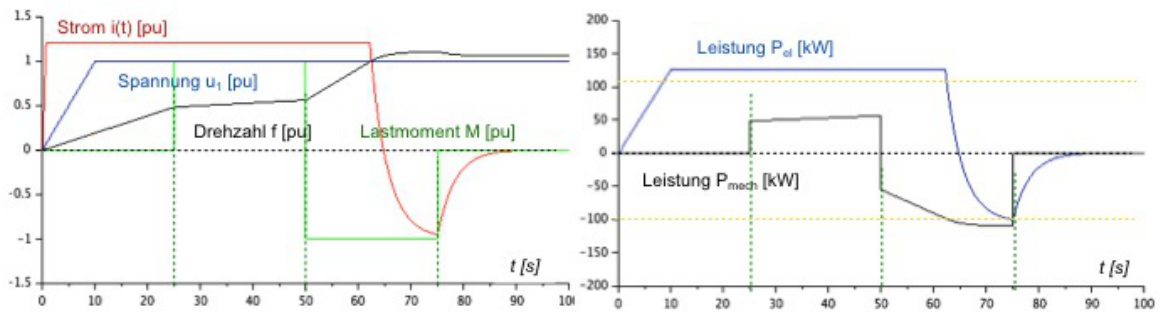
Man erkennt, dass die Geschwindigkeit im wesentlichen der vorgegebenen Klemmenspannung folgt, auch ohne Einsatz eines Reglers. Dies entspricht dem Verhalten der Gleichstrommaschine. Da keine Strombegrenzung vorgesehen ist, leistet die Maschine eine erhebliche Beschleunigung.

Frage 6.5: Strombegrenzung. Eine reale Maschine wäre mit den Strömen aus der Simulation überfordert. Ergänzen Sie Ihr Modell daher um eine Strombegrenzung.

Lösungsbeispiel: Die Strombegrenzung wird in den Strompfad im Signalfluss eingefügt.



Ein Simulationslauf mit sonst unveränderten Parametern zeigt folgendes Verhalten.

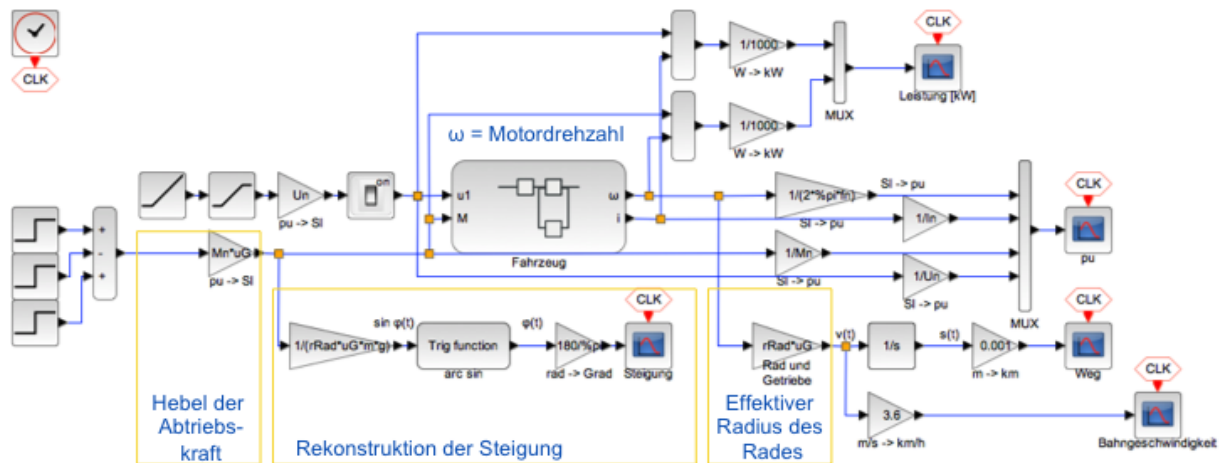


Mit dem Strom ist nun auch die elektrische Leistungsaufnahme begrenzt. Das Fahrzeug fährt sehr viel langsamer an (siehe Drehzahl) und kann auch die geforderte mechanische Leistung nicht erbringen.

Bei Lastumkehr setzt die Stromumkehr erst nach Abbau der kinetischen Energie ein. Die Drehzahl bleibt nahezu unverändert. Für einen wirksamen Bremsvorgang wäre die Klemmenspannung zu verringern. Bei Lastabwurf erreicht die Maschine ihre Leerlaufdrehzal.

Frage 6.6: Getriebe. Ergänzen Sie im Modell ein Schaltgetriebe, das vor allem das Anfahren verbessert. Testen Sie Ihr Modell in der Simulation.

Lösungsbeispiel: Das Getriebe wurde durch Veränderung des effektiven Raddurchmesser berücksichtigt. Folgende Abbildung zeigt den Signalfluss. Bemerkung: Auf eine drehzahlabhängige Korrektur des effektiven Trägheitsmomentes des Motors wurde verzichtet, der der Effekt gegenüber der Fahrzeugmasse und dem Trägheitsmoment der Räder gering ist.



Ein Simulationslauf zeigt, dass der Motor nun seine Drehzahl wegen der verringerten Last nun eher erreicht. Wegen der Strombegrenzung bleibt die aufgenommene elektrische Leistung weitgehend gleich und wird nach wie vor zur Beschleunigung der Massen aus dem Stand verwendet. Im Gefälle ist die Motorbremse nun wirksamer.

Aufgabe 7: ...

Mechanische Erweiterungen/Variation des Modells, z.B. Elektro-Roller mit Kreiselmoment, Radaufhängung, bzw. Auto mit Getriebe, Federung, Spur, ...

Frage 7.1:

Frage 7.2:

Frage 7.3:

Frage 7.4:

Aufgabe 8: ...

Elektrische Erweiterungen/Variation des Modells, z.B. Batterie, Rückgewinnung von Bremsenergie, Laderegler, Fahrzyklen, ...)

Frage 8.1:

Frage 8.2:

Frage 8.3:

Frage 8.4: