	<b>ISAS Praktikum</b> Versuch Saber 1 SABER- Simulation Spulenansteuerung			Prof. Dr.-Ing. Günter Schmitz Lehrgebiet Flugzeug- Elektrik und Elektronik
Name	Vorname	Matr.-Nr.	Semester	Studienrichtung
Datum	Testat (ohne Gewähr für Richtigkeit)			

Version 06.06.2013

**VERSUCH 1: SABER- SIMULATION SPULENANSTEUERUNG**

1	Einleitung .....	1
2	Versuchsdurchführung.....	1
	<b>2.1 Simulation einer elektronischen Schaltung .....</b>	<b>1</b>
	2.1.1 Simulation einer Spulenansteuerung ohne Freilauf.....	2
	2.1.2 Simulation einer Spulenansteuerung mit Freilaufdiode.....	2
	2.1.3 Simulation einer Spulenansteuerung mit Freilaufdiode und Widerstand.....	2
	2.1.4 Simulation einer Spulenansteuerung mit Freilaufdiode und Zenerdiode .....	2
	2.1.5 Ergebnisdarstellung.....	3
	<b>2.2 Simulation eines mechatronischen Systems.....</b>	<b>3</b>
3	Anhang .....	5
	<b>3.1 Parametereingabe .....</b>	<b>5</b>
	<b>3.2 Tabelle der Maßstabsfaktoren .....</b>	<b>5</b>
	<b>3.3 Tabelle von Across- Größen und Through- Größen.....</b>	<b>5</b>

## 1 Einleitung

Für viele Anwendungen in "Intelligenten Sensor Aktor Systemen" werden elektromagnetische Aktuatoren eingesetzt, die mit Strömen betrieben werden müssen, die deutlich über denjenigen Strömen liegen, die unmittelbar von entsprechenden Steuergeräten/Prozessoren zur Verfügung gestellt werden können. In diesem Versuch des Praktikums sollen nun Schaltungen simuliert werden, die zur Ansteuerung solcher magnetischen Aktuatoren verwendet werden können. An dieser Stelle wird bewusst auf eine Darstellung möglicher Schaltungen verzichtet, da man am meisten lernt, wenn man es zunächst eigenständig versuchen muss, solche Schaltungen zu entwerfen. In der Vorlesung wurden allerdings die Grundlagen hierzu bereits behandelt.

## 2 Versuchsdurchführung

Bei den folgenden Versuchen sollen Sie die Schaltung mit Hilfe des SABERs erstellen und deren Funktion mit Hilfe einer Transient- Analyse (zeitlicher Verlauf) untersuchen. Benutzen Sie *zunächst* die in der Anleitung vorgegebenen Bauelemente und Dimensionierungsvorschläge. Führen Sie eigene Variationen durch und beobachten die sich ergebenden Effekte. Speichern Sie bitte den jeweils erreichten (Endstand) - sowohl die Schaltung als auch die zugehörigen Diagramme.

### 2.1 Simulation einer elektronischen Schaltung

Sowohl bei elektrischen Schaltungen als auch bei der Simulation von mechanischen, hydraulischen oder anderen Systemen sind zwei Größen zu unterscheiden: die Across- Größen und die Through- Größen. Die Across- Größen treten jeweils zwischen zwei Punkten der Schaltung auf bzw. stellen die Differenz an zwei Bauteilanschlüssen dar. In der Elektrotechnik ist diese Across- Größe die Spannung, in der Mechanik z.B. der Abstand (siehe auch Tabelle im Anhang 3.3). Die Through- Größe ist dadurch gekennzeichnet, dass alle in ein Bauteil "fließenden" Werte der Through- Größe in Summe Null ergeben. Dies ist in der Elektrotechnik als Knotenpunktregel (*Summe aller Ströme ist Null*) und in der Mechanik als Kräftegleichgewicht (*Summe aller an einem Punkt angreifenden Kräfte ist Null*) bekannt. Somit kann jedes System, ob elektrisch, mechanisch oder sonstiges durch Aufstellung von Maschen- und Knotengleichungen beschrieben und numerisch gelöst werden. Dabei ist es natürlich erforderlich, dass jedes Teilsystem (mechanisch, elektrisch,...) einen definierten Bezugspunkt hat (elektrisch die Masse). Dies wird beim Saber durch das Element "SABER Node 0" bewirkt, an den jedes Teilsystem angeschlossen sein muss. Ansonsten kommt es zu einem "Floating Ground Error": Singular Jacobian Matrix, possible reason: Node/subsystem with no connection to the reference (floating).

### 2.1.1 Simulation einer Spulenansteuerung ohne Freilauf

Simulieren Sie eine Schaltung bestehend aus:

- einem Darlington- Transistor (Typ 2N6388, SABER- Name: q2n6388),
- einer Betriebsspannungsquelle mit 12V (SABER- Name: Voltage Source, Constant Ideal),
- einer Pulsquelle zur Ansteuerung der Schaltung (SABER- Name: Voltage Source, Pulse), Parameter (beachte auch zur Art der Werteeingabe den Anhang!):

Bedeutung	Sabername	vorgeschlagener Wert
Anfangsspannung	initial	0
Pulsspannung	pulse	5
Anstiegszeit (risetime)	tr	1m
Abfallzeit	tf	1m
Einschaltverzögerung	delay	0.1
Pulsdauer	width	0.5
Periodendauer	period	keine (undef belassen)

- eine Spule mit einer Induktivität von 100mH und einem Widerstand von  $2\Omega$
- ein Vorwiderstand für den Transistor von  $1k\Omega$

*Hinweis: Bezeichnen Sie alle Knoten mit eigenem Namen, damit Sie sich später besser zurechtfinden. Blenden Sie alle wichtigen Parameter der verwendeten Komponenten ein.*

**Beginnen Sie mit der Arbeitspunktanalyse (DC-Analyse). Starten Sie danach die Transient- Analyse; aktivieren Sie dabei "Run DC-Analysis First" und verwenden folgende Parameter: Tend (Endzeit der Simulation): 2 (also 2 Sekunden), Time Step (Schrittweite für erste Iteration): 0.01 (also 10ms).**

Stellen Sie folgende Signale im Scope- Modus dar: Ansteuerspannung, Strom durch die Spule, Spannung an der Spule. Benutzen Sie am besten die Einstellung „Append Plots“, damit Sie die folgenden Ergebnisse vergleichen können.

### 2.1.2 Simulation einer Spulenansteuerung mit Freilaufdiode

Erweitern Sie die Schaltung nun mit einem Diodenfreilauf und vergleichen Sie die Ergebnisse mit denjenigen aus 2.1.1.

### 2.1.3 Simulation einer Spulenansteuerung mit Freilaufdiode und Widerstand

Erweitern Sie die Schaltung nun mit einem Widerstand im Freilaufkreis und vergleichen Sie die Ergebnisse für verschiedene Widerstandswerte mit denjenigen aus 2.1.2.

### 2.1.4 Simulation einer Spulenansteuerung mit Freilaufdiode und Zenerdiode

Verwenden Sie nun anstelle des Widerstandes einer Zenerdiode (z.B. 40V, oder ist das zu viel?) und vergleichen Sie die Ergebnisse mit den vorhergehenden. (Bauelement „zd“, Parameter ‚vzt‘ im „saber model“ ist die Zenerspannung. Der Bahnwiderstand ‚rzt‘ sollte auf 0,01 Ohm reduziert werden.)

### 2.1.5 Ergebnisdarstellung

Welche Erkenntnisse können Sie aus den Simulationen und dem Vergleich gewinnen?  
Bitte reflektieren Sie die Erkenntnisse.

## 2.2 Simulation eines mechatronischen Systems

Nun wird die Spule ersetzt durch einen Elektromagneten. Auf der mechanischen Seite des Magneten müssen die Masse des Magnetankers (inklusive der "reduzierten" Federmasse), eine Rückstellfeder sowie eine Dämpfung (durch Reibung) simuliert werden. Außerdem benötigen Sie einen Einspannpunkt für die Feder, die in einem bestimmten Abstand zum Anker angeordnet werden soll.

Die vorgeschlagenen Komponenten und Parameter sind wie folgt:

- Die Puls- Spannungsquelle sollte nun auf delay = 50m und width = 200m eingestellt werden.
- Die Simulationsdauer (Tend) auf 500m und der Time Step auf 1u.
- Abstandshalter (Saber- Name: Spacer) 10mm (für die Festlegung des Federfußpunktes, kann ggf. entfallen)
- Feder (spring\_tr, "t" steht dabei für "translational" zur Unterscheidung von Drehfedern): Länge: 5mm (,initial deformation'), Bei Auflegen eines 100 Gramm schweren Gewichtes soll sich die Feder gerade um 1mm eindrücken; Bestimmen Sie hieraus die in N/m anzugebende Federkonstante (Ergebnis sollte gerundet werden).
- Ankermasse: 50g (Denken Sie daran, dass alle Größen im MKS- System angegeben werden, sofern Sie nichts Anderes einstellen!)
- Dämpfer (damper\_t): 2 N/m/s also eine geschwindigkeitsabhängige Dämpfung, die hier recht klein gewählt wurde, um das Schwingverhalten des Feder-Masse Systems in der Simulation gut erkennen zu können.
- Magnet („el\_magnt“):  
Parameter:

Bedeutung	Sabername	vorgeschlagener Wert
Induktivität bei anliegendem Anker	lmax	10m
Induktivitätsänderung bei sich entfernendem Anker (wichtig auch für Zusammenhang zwischen Strom und Kraft)	lcoef	200
Position der Polfläche	x0	0
Federsteifigkeit der Polfläche	kstop	20000k

Die Spule des Magneten soll wieder einen Widerstand von  $2\Omega$  aufweisen.

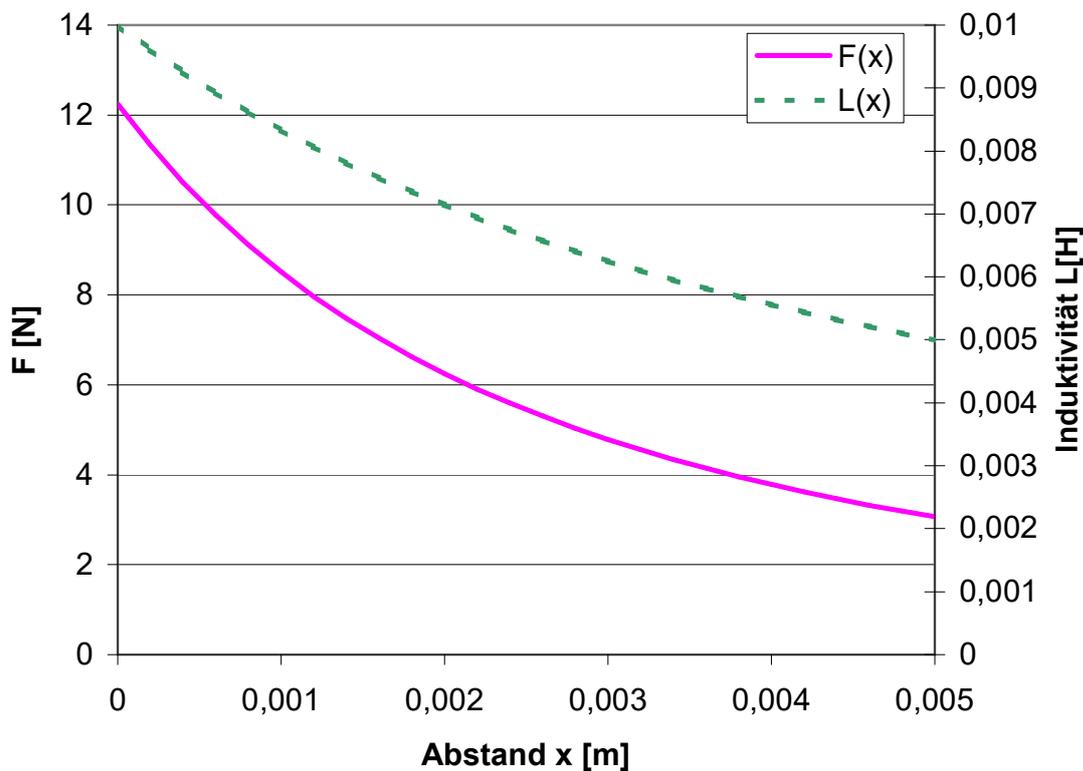
Erstellen Sie das Design so, dass sich in stromlosem Zustand ein Abstand des Ankers von der Polfläche von 5mm einstellt.

*Anmerkung zu den im Modell verwendeten Formeln (muss nicht simuliert werden):*

- Für die normale Funktion des Magneten muss der Abstand  $x$  ( $x = \text{pos1} - \text{pos2}$ ) immer größer sein als die Position  $x_0$ . Die Kraft des Magneten ermittelt sich zu:

$$F_{\text{magn}} = -\frac{1}{2} \left( \frac{l_{\text{coef}}}{l_{\text{max}}} \right) \cdot (L(x) \cdot i)^2 \quad \text{mit der ortsabhängigen Induktivität: } L(x) = \frac{l_{\text{max}}}{1 + l_{\text{coef}} \cdot (x - x_0)}$$

Es ergibt sich somit ein Induktivitäts- und Kraftverlauf gemäß dem folgenden Diagramm:



- Das Verhalten beim Auftreffen auf die Polfläche wird durch die "Federkonstante der Polfläche" bestimmt. Diese sollte sehr hoch gewählt werden, da das "Zusammendrücken" der Polfläche tatsächlich einen hohen Kraftaufwand erfordert. Für Werte des Abstandes  $x$  ( $x = \text{pos1} - \text{pos2}$ ) für  $x < x_0$  gilt die Formel für eine Feder:  $F = -k_{\text{stop}} \cdot (x - x_0)$

### 3 Anhang

#### 3.1 Parametereingabe

Zur Eingabe von Parametern in SABER ist folgendes zu beachten:

Die Nachkommastellen werden durch einen Punkt abgetrennt! Also 5.332 und nicht 5,332. Eine falsche Eingabe führt zu **späteren** oft kaum interpretierbaren Fehlermeldungen!

Parameter werden ohne ihre Einheiten angegeben. Basis für die Einheiten ist das MKS- System (solange keine anderen Einstellungen unter "units" vorgenommen werden). Angeben von "milli" oder "kilo" sind in der gewohnten Weise möglich (mit Einschränkungen). Ein Widerstand von  $1k\Omega$  kann als 1k eingegeben werden; eine Zeit von 1 Mikrosekunde als 1u. Merke: **u nicht  $\mu$** .

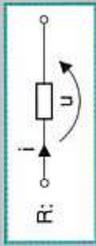
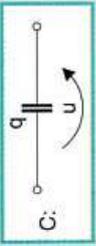
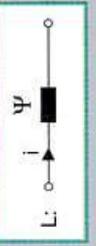
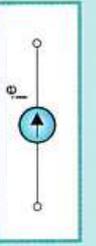
#### 3.2 Tabelle der Maßstabsfaktoren

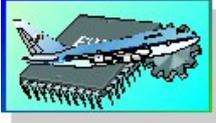
Zehnerpotenz	Bezeichnung	Saber-Buchstabe
$10^{12}$	Tera	T
$10^9$	Giga	G
$10^6$	Mega	Meg (Achtung nicht M)
$10^3$	kilo	k
$10^{-3}$	milli	m
$10^{-6}$	mikro	u
$10^{-9}$	nano	n
$10^{-12}$	pico	p
$10^{-15}$	femto	f
$10^{-18}$	atto	a

#### 3.3 Tabelle von Across- Größen und Through- Größen

Gebiet (topic)	Flussgröße (Through)	Differenzgröße (Across)
Elektrotechnik (electronics)	Strom (current)	Spannung (voltage)
transl. Mechanik (transl. mechanic)	Kraft (force)	Weg, Geschwindigkeit (position, velocity)
rot. Mechanik (rotational mech.)	Drehmoment (torque)	Winkel, Winkelgeschwindigkeit (angle, angular velocity)
Thermik (thermal systems)	Entropiestrom (power)	Temperatur (temperature)
Hydraulik (hydraulic systems)	Volumenfluss (flow rate)	Druck (pressure)
Magnetik (magnetic systems)	Fluss (flux)	Durchflutung (magnetomotive force)

Weitere Analogien:

Symbol	Allgemeines NW	Mechanisch-trans-latorisches NW	Mechanisch-rotatorisches NW	Elektrisches NW	Strömungs-NW	Thermisches NW
$i$	Flußgröße	Kraft	Drehmoment	Strom	Volumenfluß	Wärmestrom
$u$	Differenzgröße	Geschwindigkeit	Winkelgeschwindigkeit	Spannung	Druck	Temperatur
$q$	integrierte Flußgröße	Impuls	Drehimpuls	Ladung	Volumen	Wärmemenge
$\psi$	integrierte Differenzgröße	Weg	Drehwinkel	magnetischer Fluß	Strömungsbewegungs-Größe	-
<b>R:</b>	 Verbraucher $R = u/i$ ( $G = 1/R$ )	Reibungsmittang	Drehreibungsmittang	Ohmscher Widerstand	Strömungswiderstand	Wärmewiderstand
<b>C:</b>	 F-Speicher $C = q/u$ ( $E_q = q^2/2C$ )	Masse, kinetische Energie	Trägheitsmoment, kinetische Energie	Kapazität, elektrische Energie	Strömungskapazität (potent. Energie)	Wärmekapazität, Wärme
<b>L:</b>	 D-Speicher $L = \psi/i$	Federnachgiebigkeit, potentielle Energie	Drehfedernachgiebigkeit, potentielle Energie	Induktivität, magnetische Energie	Strömungsträgheit (kinet. Energie)	-
<b>F-Quelle,</b>	 $i^e =$ vorgegebene Zeitfunktion	Kraftquelle	Drehimpulsquelle	Stromquelle	Volumenflußquelle	Wärmestromquelle
<b>D-Quelle,</b>	 $u^e =$ vorgegebene Zeitfunktion	Geschwindigkeitsquelle	Winkelgeschwindigkeitsquelle	Spannungsquelle	Druckquelle	Temperaturquelle

		<b>ISAS Praktikum</b> Versuch Saber 2 SABER- Simulation Motor mit Ansteuerung			Prof. Dr.-Ing. Günter Schmitz Lehrgebiet Flugzeug- Elektrik und Elektronik
		Name	Vorname	Matr.-Nr.	Semester
Datum	Testat (ohne Gewähr für Richtigkeit)				

Version 04.06.19

## VERSUCH 2: SABER- SIMULATION MOTOR MIT ANSTEUERUNG

1	Einleitung .....	1
2	Versuchsdurchführung.....	1
2.1	<b>Simulationen.....</b>	<b>1</b>
2.1.1	Simulation einer gesteuerten Stromquelle .....	2
2.1.2	Simulation einer gesteuerten Spannungsquelle.....	3
2.1.3	Simulation Drehzahlregelung .....	3
2.1.4	Simulation der Motoren mit einem Getriebe.....	3

## 1 Einleitung

In diesem Versuchsteil soll die Ansteuerung eines Motors sowie die Modelle für Motoren und Getriebe mittels des Simulationssystems SABER untersucht werden. Hierzu sind einige Teilaufgaben zu lösen, die in Form von Kleingruppen bearbeitet werden. Die entsprechenden Teilergebnisse werden dann in Form von Präsentationen zusammengetragen. Hieraus wird ein Gesamtmodell erstellt und von jeder Gruppe simuliert.

Als Hintergrundinformation zu den verwendeten Motoren sei an folgende Zusammenhänge erinnert:

Für die elektrische Gleichstrommaschine gelten im Wesentlichen zwei Gleichungen:

Die Polradspannung ergibt sich zu:  $U_0 = k_1 \cdot \phi \cdot n$

Das Moment ergibt sich zu:  $M = k_2 \cdot \phi \cdot I_A$

Aufgrund der Gleichung für die mechanische Leistung  $P_{\text{mech}} = \omega \cdot M = U_0 \cdot I_A$  ergibt sich zwischen  $k_1$  und  $k_2$  ein fester Zusammenhang und zwar:

$$k_1 = 2\pi \cdot k_2$$

Bei einer permanenterrregten Maschine ist der Fluss konstant, so dass er mit in die Faktoren  $k_1$  und  $k_2$  integriert werden kann. Somit ergeben sich entsprechend vereinfachte Formeln:

Die Polradspannung ergibt sich zu:  $U_0 = k_e \cdot n$

Das Moment ergibt sich zu:  $M = k_t \cdot I_A$

sowie die Umrechnung zwischen  $k_e$  und  $k_t$ :  $k_e = 2\pi \cdot k_t$

Aufgrund des Ersatzschaltbildes ergibt sich für die an den Klemmen messbare Ankerspannung:

$$U_A = U_0 + I_A \cdot R_A$$

## 2 Versuchsdurchführung

### 2.1 Simulationen

Bei den folgenden Versuchen sollen Sie die Schaltung mit Hilfe des SABERs erstellen und deren Funktion mit Hilfe einer Transient- Analyse (zeitlicher Verlauf) untersuchen. Benutzen Sie *zunächst* die in der Anleitung vorgegebenen Bauelemente und Dimensionierungsvorschläge. Führen Sie eigene Variationen durch und beobachten die sich ergebenden Effekte. Speichern Sie bitte den jeweils erreichten (Endstand) - sowohl die Schaltung als auch die zugehörigen Diagramme.

**2.1.1 Simulation einer gesteuerten Stromquelle**

Entwerfen Sie eine Schaltung für eine gesteuerte Stromquelle. Benutzen Sie dabei die folgenden Komponenten:

- einen Darlington- Transistor (Typ 2N6388, SABER- Name: q2n6388),
- eine Betriebsspannungsquelle mit 12V (SABER- Name: Voltage Source, Ideal Supply),
- eine Spannungsquelle zur Ansteuerung der Schaltung (SABER- Name: Voltage Source, PWL = piece wise linear). Der Parameter pwl wird in Form von Wertepaaren Zeit, Spannung, Zeit, Spannung, ... angegeben. Hier wird vorgeschlagen, folgende Eingabe für pwl zu verwenden:

Zeit	Wert
0	0
1	0
2	2
10	2
12	0
15	0
15.01	5
20	5
20.01	0

- einen Operationsverstärker LF356 (mit Balance-Eingängen, Parameter balance aber auf yes setzen)
- ein Strommesswiderstand von  $100\text{m}\Omega$
- einen Permanentmotor („Motor, DC PM with brushdrop“) mit folgenden Parametern:

Bedeutung	Sabername	vorgeschlagener Wert	Einheit
Trägheitsmoment	j	10u	$\text{kgm}^2$
Momentenkonstante	kt	5m	$\text{Nm/A}$
Spannungskonstante	ke	5m	$\text{V/rad/s}$
Ankerinduktivität	laa	1u	H
Ankerwiderstand	ra	100m	$\Omega$
Polpaarzahl	p	1	
Reibmoment	dft	8m	Nm

Dabei sollte der Anschluss a1 positiver sein als a2, damit die sich ergebenden Drehzahlen positiv sind; die sich ergebenden Drehzahlen sind in rad/s angegeben. Um die Drehzahl in U/min zu erhalten müssen die Werte mit einem Faktor  $60\text{s/min}$  multipliziert und durch  $2\pi$  dividiert werden. Somit ergibt sich ein Umrechnungsfaktor von etwa 10 (exakt: 9,55).

- einige Widerstände für Spannungsteiler bzw. Schutzschaltung für die Basis des Transistors

Dimensionieren Sie die Schaltung derart, dass bei einer Eingangsspannung der Steuerquelle von 1V gerade auch 1A durch den Motor fließen.

*Hinweis: Bezeichnen Sie wichtige Knoten mit eigenem Namen, damit Sie sich später besser zurechtfinden. Blenden Sie alle wichtigen Parameter der verwendeten Komponenten ein.*

**Beginnen Sie mit der Arbeitspunktanalyse (DC-Analyse). Starten Sie danach die Transient- Analyse; aktivieren Sie dabei "Run DC-Analysis First" und verwenden folgende Parameter: Tend (Endzeit der Simulation): 25 (also 25 Sekunden), Time Step (Schrittweite für erste Iteration): 0.01 (also 10ms).**

Stellen Sie folgende Signale im Scope- Modus dar: Ansteuerspannung, Spannung am Motor, Strom durch den Motor, Drehzahl. Drucken Sie Schaltung und Zeitdarstellung aus.

### 2.1.2 Simulation einer gesteuerten Spannungsquelle

Ändern Sie nun die Schaltung derart, dass bei einer Vorgabe von 2V an der Steuerquelle der Motor ebenfalls mit 2V betrieben wird.

Stellen Sie folgende Signale im Scope- Modus dar: Ansteuerspannung, Spannung am Motor, Strom durch den Motor, Drehzahl. Drucken Sie Schaltung und Zeitdarstellung aus.

### 2.1.3 Simulation Drehzahlregelung

Erweitern Sie die Schaltung nun mit einem 2. Motor mit den selben Parametern, benutzen Sie diesen Motor als Tachogenerator und speisen Sie das Tachogeneratorsignal zurück in die Schaltung, so dass sich eine Drehzahl von 400rad/s bei einer Steuerspannung von 2V ergibt.

Stellen Sie folgende Signale im Scope- Modus dar: Ansteuerspannung, Spannung am Motor, Strom durch den Motor, Drehzahl. Drucken Sie Schaltung und Zeitdarstellung aus.

### 2.1.4 Simulation der Motoren mit einem Getriebe

Fügen Sie ein Getriebe zu mit einem Übersetzungsverhältnis von 1:9.55 und stellen Sie die Drehzahl dar (Getriebe: „/Mechanical/Rotational Velocity (Angular)/Gear, Angular Velocity“). Fügen Sie eine mechanische Belastungsquelle (Mechanical Sources/ Rotational/ Torque velocity source pulse) ein. Als Parameter verwenden Sie hierbei:

Bedeutung	Sabername	vorgeschlagener Wert
Anfangsmoment	initial	0
Pulsmoment	pulse	10m
Anstiegszeit (risetime)	tr	1m
Abfallzeit	tf	1m
Einschaltverzögerung	delay	4
Pulsdauer	width	5
Periodendauer	period	keine (*opt* belassen)

Ändern Sie Ihre Ansteuerungsquelle auf pwl [0,0,1,0,1.01,2].

Führen Sie die Versuche mit

1. der gesteuerten Stromquelle
2. der gesteuerten Spannungsquelle oder
3. der Drehzahlregelungsschaltung durch.