3. Speicher

3.1. Batteriespeicher

Als Basis des Batteriemodells dient eine Spannungsquelle mit Innenwiderstand, die um eine Parallelschaltung aus R_1 und C_1 erweitert wird, wie in der folgenden Abbildung gezeigt. Mit Hilfe dieser Ersatzschaltung wird das Impedanzspektrum der Batterie bei gegebener Temperatur und gegebenem Ladezustand näherungsweise wiedergegeben.

Die Batterie wird durch folgende Kenngrößen beschrieben:

- Quellspannung (Leerlaufspannung) U_0 [V]
- Innenwiderstand R_0 [Ω]
- Innenimpedanz $R_1//C_1$ [Ω]
- Klemmenspannung U_L [V]
- Kapazität Q_n [Ah]
- Ladezustand SoC [%]
- Masse m [kg]

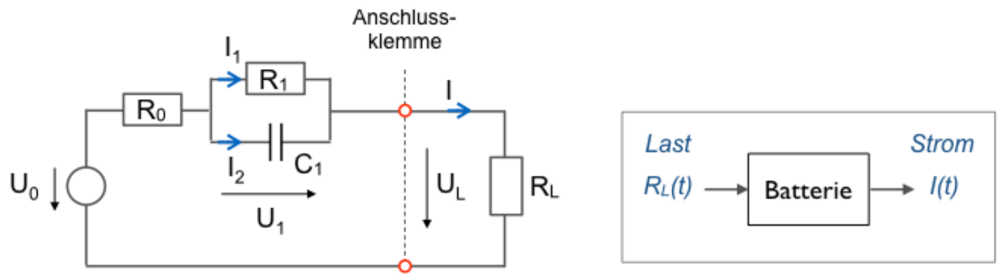


Bild 3.1.1 Elektrische Ersatzschaltung des Batteriermodells

Der Ladezustand wird aus der zufließenden bzw. abfließenden Ladung mit Hilfe des Klemmenstroms über der Zeit ermittelt.

Für die Ersatzschaltung gelten folgende Gleichungen:

$$U_0 = R_0 \cdot I + U_1 + R_L \cdot I \qquad (3.1.1)$$

$$\dot{U}_1 = \frac{1}{C_1} \cdot I_2 = \frac{1}{C_1} \cdot I - \frac{1}{R_1 C_1} \cdot U_1 \qquad (3.1.2)$$

Durch Einsetzten von (2.1.1) in (2.1.2) lässt sich der Strom I eliminieren und $U_1(t)$ aus der Differenzialgleichung berechnen. Anschließend kann aus $U_1(t)$ mit Hilfe von (2.1.1) der Strom I(t) berechnet werden. Aus dem Strom folgen die Klemmenspannung, die aufgenommene bzw. abgegebene Leistung, sowie der Ladezustand.

Wie aus der Schaltung bzw. den Gleichungen ersichtlich, repräsentiert die Kapazität C_1 nur das transiente Verhalten. Im eingeschwungenen Zustand beträgt der gesamte Innenwiderstand $R_i + R_1$. Die Masse der Batterie ist dann von Bedeutung, wenn die Batterie bewegt werden soll, beispielsweise in einem elektrischen Fahrzeug, sowie für Betrachtungen der Leistungsdichte.

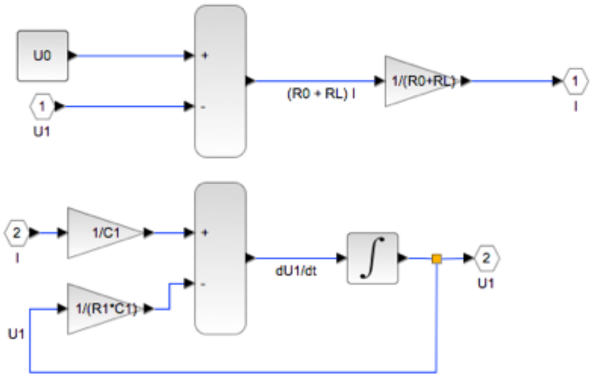
Frage 3.1.1: Eine Batterie sei durch folgende Kenngrößen gegeben:

- Quellspannung (Leerlaufspannung): U_0 = 36 V
- Innenwiderstand: R_0 = 0,2 Ω

- Innenimpedanz: $R_1 = 0{,}1\ \Omega$, $C_1 = 4000$ F
- Kapazität: $Q_n = 11$ Ah
- Masse: m = 2 kg

Skizzieren Sie den Signalfluss, der durch die Gleichungen (3.1.1) und (3.1.2) gegeben ist.

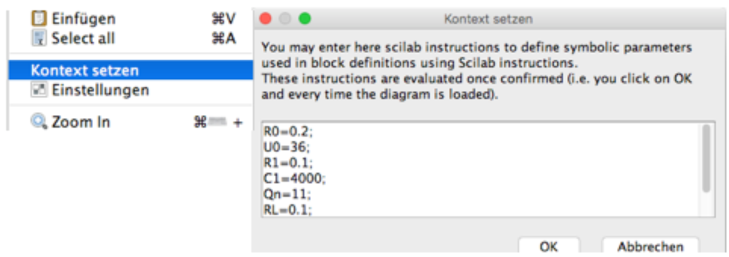
Lösung:



(3.1.1)

(3.1.2)

Hinweis: Die Parameter für die Blöcke werden im Kontext definiert (Menü Simulation bzw. rechte Maustaste: Kontext setzen)



Frage 3.1.2: Geben Sie statt des Lastwiderstands an der Ausgangsklemme die geforderte Leistung als Eingangsgröße vor. Ergänzen Sie den Ladezustand durch Integration des Stroms.

Lösung: Gleichungssystem:

$$U_0 = R_0 \cdot I + U_1 + U_L \tag{3.1.3}$$

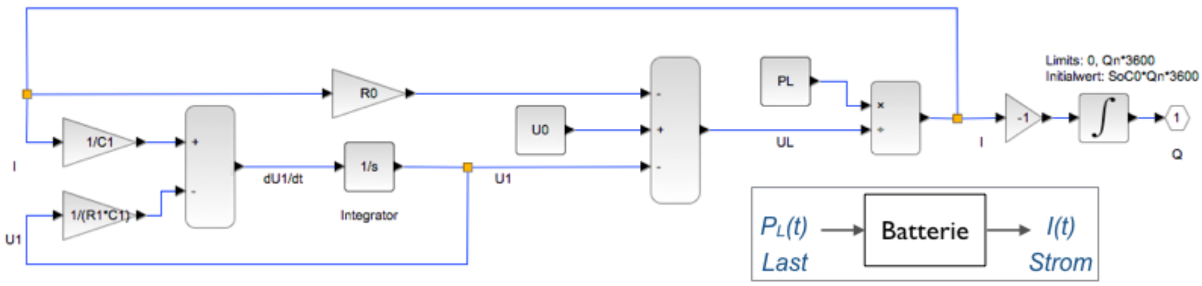
$$\dot{U}_1 = \frac{1}{C_1} \cdot I_2 = \frac{1}{C_1} \cdot I - \frac{1}{R_1 C_1} \cdot U_1 \tag{3.1.4}$$

$$P_L = U_L \cdot I \tag{3.1.5}$$

$$Q_{(t)} = Q_0 - \int_0^t I(\tau) \cdot d\tau \tag{3.1.6}$$

$$SoC = \frac{Q_{(t)}}{Q_n} \tag{3.1.7}$$

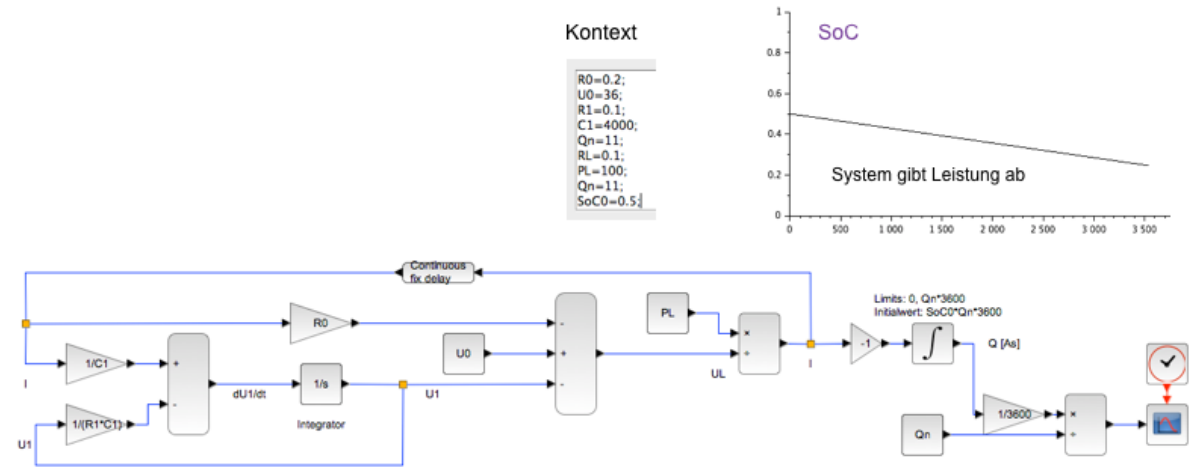
Signalfluss:



Ladezustand: Wenn das System Leistung abgibt (siehe Zählpfeile in der Ersatzschaltung), fließen mit dem Strom Ladungen aus dem System. Der aktuelle Ladezustand (= Initialzustand des Integrierers) muss über das Zeitintegral des Stroms verringert werden. Aus diesem Grund wurde das Vorzeichen des Stroms vor dem Integrierer umgekehrt (siehe Gleichung 3.1.6). Der Initialwert des Ladezustandes kann relativ angegeben werden, z.B. als SoC_0 = 50%. Aus der Speicherkapazität Q_n folgt hieraus Q_0 = SoC_0 Q_n.

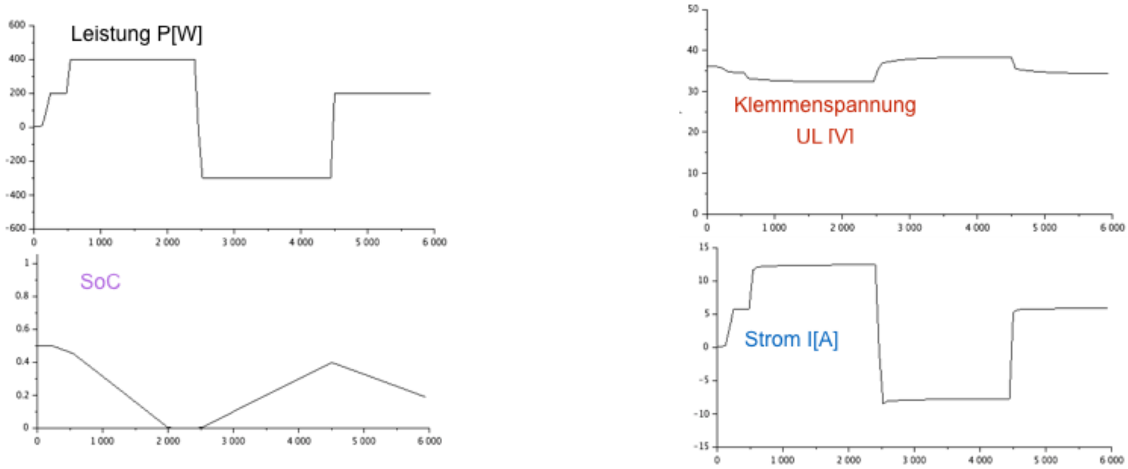
Frage 3.1.3: Erstellen Sie ein Modell und prüfen Sie das Modell in einer Simulation mit einem fest vorgegebenen Parameter für die Leistung. Geben Sie den initialen Ladezustand vor und stellen Sie den Ladezustand des Batteriespeichers über der Zeit dar.

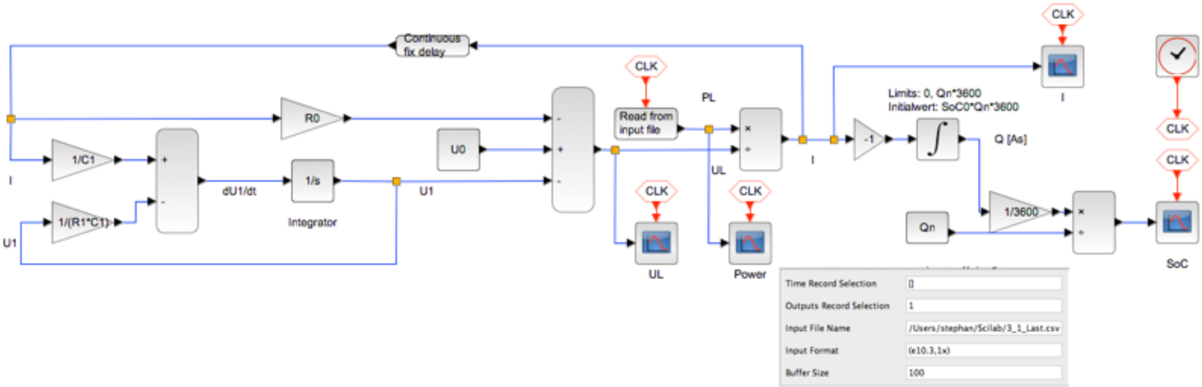
Lösung:



Hinweis: Der oben dargestellte Signalfluss enthält einen logischen Zirkel. In einem realen System verhindern Laufzeiten solche Zirkelschlüsse. Daher lässt sich das Problem durch Einführung einer Verzögerung beheben, z.B. in deirRückführung des Stroms. Die Verzögerungszeit wird unterhalb der für das System relevanten Zeit gewählt.

Frage 3.1.4: Simulation des Systems. Stellen Sie Klemmenspannung, Strom und Ladezustand für ein willkürlich vorgegebenes Lastprofil dar. Das Lastprofil soll aus einer Datei gelesen werden.





Hinweis: Die Datei für das Lastprofil kann mit kommaseparierten Format erstellt werden (als .csv-Datei). Tabellenkalulationsprogramme und Texteditoren unterstützen dieses Format. Zum Einlesen mit Hilfe des Scilab Blocks „Read from input file“, siehe Quellen, wird am besten ein Gleitkommaformat verwendet (10e+3). Zum Einlesen muss der genaue Pfad der Datei angegeben werden.

Zeitdiskrete Modelle

Frage 3.1.5: Zeitdiskretes Modell. Führen Sie die Differenzialgleichung (3.1.2) durch Verwendung zeitdiskreter Größen in eine Differenzengleichung über. Die Differenzengleichung stellt zusammen mit der übrigen Systemgleichung (3.1.1) ein algebraisches Gleichungssystem dar, das sich numerisch lösen lässt.

Lösung: Für einfache Systeme wie das hier beschriebene Batteriemodell ist ein Test mit Hilfe einer Tabellenkalkulation möglich. Hierzu wird die Differenzialgleichung diskretisiert. Die resultierende Differenzengleichung lässt sich algebraisch lösen. Für die Gleichungen (3.1.1) und (3.1.2) erhält man mit Hilfe des Abtastintervalls Δt in zeitdiskreter Form:

$$u_0 = u_1(k) + (R_i + R_L(k)) \cdot i(k) \qquad (3.1.8)$$

$$\frac{u_1(k) - u_1(k-1)}{\Delta t} = \frac{1}{C_1} \cdot i(k) - \frac{1}{R_1 C_1} \cdot u_1(k) \qquad (3.1.9)$$

Hierbei steht der Index k für k Δt. Durch Einsetzen von i(k) aus (3.1.8) in (3.1.9) erhält man eine Differenzengleichung, aus der $u_1(k)$ in Abhängigkeit der Last $R_L(k)$ berechnet werden kann. Aus $u_1(k)$ lässt sich dann mit Hilfe von Gleichung (3.1.8) der gesuchte Strom i(k) ermitteln.

Frage 3.1.6: Implementierung des zeitdiskreten Modells in der Tabellenkalkulation. Die Differenzengleichungen lassen sich z.B. mit Hilfe einer Tabellenkalkulation lösen. Implementieren Sie das zeitdiskrete Modell in einer Tabellenkalkulation.

Lösung: Folgende Abbildung zeigt das Berechnungsschema.

Modell: **Spannungsquelle mit Innenwiderstand R0 plus R1//C1**

Paramater:	U0	Quellspannung	[V]	U0=	36	V
	R0	Innenwiderstand R0	[Ω]	R0=	0,2	Ω
	Qn	Ladungsmenge	[Ah]	Qn=	11	Ah
	m	Gewicht	[kg]	m=	2	kg
	R1	Innenwiderstand R1//C1	[Ω]	R1=	0,1	Ω
	C1	Kapazität R1//C1	[F]	C1=	4000	F
	SoC	Ladezustand	[%]	Δt=	20	s
	Nn	Ladezyklen	[1]			

Differenzengleichung:
u0 = u1(k) + (R0 + RL) i(k) Gl. (1)
(u1(k) - u1(k-1)) / Δt = (1/C1) i(k) - (1/R1C1) u1(k) Gl. (2)

nach Umformung:
u1(k) (1 + a Δt) = u1(k-1) + (Δt u0)/(C1(R0 + RL))
u1(k) (1 + a Δt) = u1(k-1) + b u0
mit: a= 1/(C1(R0 + RL) +1/(R1 C1)
b= Δt/(C1(R0 + RL))

Index k	Zeit t [s]	Last RL [Ω]	Hilfsgröße a [1/s]	Hilfsgröße b [1]	Spannung u1 [V]	Strom I [A]	Klemmen-spannung UL [V]	Leistung P [kW]	Ladung Q [As]	Ladung Q [Ah]	Ladezustand SoC
-1					0				14400	4	36,4%
0	0	2	0,003	0,002	0,08	16,33	32,66	0,533	14073	3,91	35,5%
1	20	2	0,003	0,002	0,15	16,30	32,59	0,531	13748	3,82	34,7%
2	40	2	0,003	0,002	0,22	16,26	32,53	0,529	13422	3,73	33,9%

Anschlussleistung

Die an der Last abgeführte Leistung berechnet sich zu

$$P_L = U_L \cdot I = U_L^2 / R_L = I^2 \cdot R_L \tag{3.1.10}$$

Die gesamte Leistung berechnet sich zu

$$P_0 = U_0 \cdot I = I^2 \cdot (R_i + R_L) \tag{3.1.11}$$

Hierbei ist im eingeschwungenen Zustand $R_i = R_0 + R_1$. Für den Wirkungsgrad berechnet man hieraus:

$$\eta = \frac{P_L}{P_V + P_L} = \frac{P_L}{P_0} = \frac{R_L}{R_i + R_L} \tag{3.1.12}$$

Die Verlustleistung P_V führt zur Erwärmung der Batterie und sollte im Sinne eines vernünftigen Wirkungsgrades gering gehalten werden, d.h. $\eta > 0{,}9$. Für die Lastimpedanz ergibt sich aus (2.1.7):

$$R_L = \frac{\eta}{1 - \eta} \cdot R_i \tag{3.1.13}$$

Für einen Wirkungsgrad von $\eta > 0{,}9$ wäre somit $R_L > 9\ R_i$ zu wählen. Im Falle einer geregelten Last wäre P_L unmittelbar durch die Last vorgegeben. In diesem Fall ermittelt sich die Verlustleistung und somit der Wirkungsgrad aus dem resultierenden Strom.

Wirkungsgrad und Ersatzschaltung

Für einen Batteriespeicher sind vor allem folgende Kenngrößen von Interesse

- Anschlusswert (Leistung P_n in kW)
- Kapazität (speicherbare Energie E_n in kWh)
- Wirkungsgrad (Anteil η der Nutzleistung an der Gesamtleistung)

- Betriebsspannung (U_0 in V)
- Anzahl der Ladezyklen.

Einen realen Batteriespeicher muss man für die jeweils geforderten Kenngrößen aus Batteriezellen aufbauen. Bei der Auslegung wird man auf einen realistischen Wirkungsgrad achten. Herbei hängt der Innenwiderstand im Ersatzschaltbild von der geforderten Leistung ab (siehe 3.1.12).

Frage 3.1.7: Berechnen Sie den Innenwiderstand für eine gegebene Spannung aus der geforderten Leistung (Anschlusswert) und dem Wirkungsgrad.

Lösung: Für den Innenwiderstand gilt (siehe 3.1.13):

$$\eta \cdot (R_i + R_L) = R_L \tag{3.1.14}$$

Hieraus folgt:

$$R_i = R_L \cdot \left(\frac{1-\eta}{\eta}\right) \tag{3.1.15}$$

Bei Vorgabe der Leistung gilt wegen $U_L \approx U_0$:

$$P_L = U_L \cdot I = U_L^2 / R_L \approx U_0^2 / R_L \tag{3.1.16}$$

Hieraus folgt für den Innenwiderstand durch Einsetzen in (3.1.15):

$$R_i \approx \frac{(1-\eta)\, U_0^2}{\eta P_L} \tag{3.1.17}$$

Beispiel: Für eine Batterie mit Spannung 36 V und Anschlusswert 300W berechnet sich bei einem Wirkungsgrad von 95% der Innenwiderstand zu $R_i \approx$ 0,216 Ohm.

Besteht die Ersatzschaltung aus einer Kette von Impedanzen, z.B. R_0 in Serie mit $R_1//C_1$, so bildet der Innenwiderstand Ri den Widerstand im eingeschwungenen Zustand. Es gilt also:

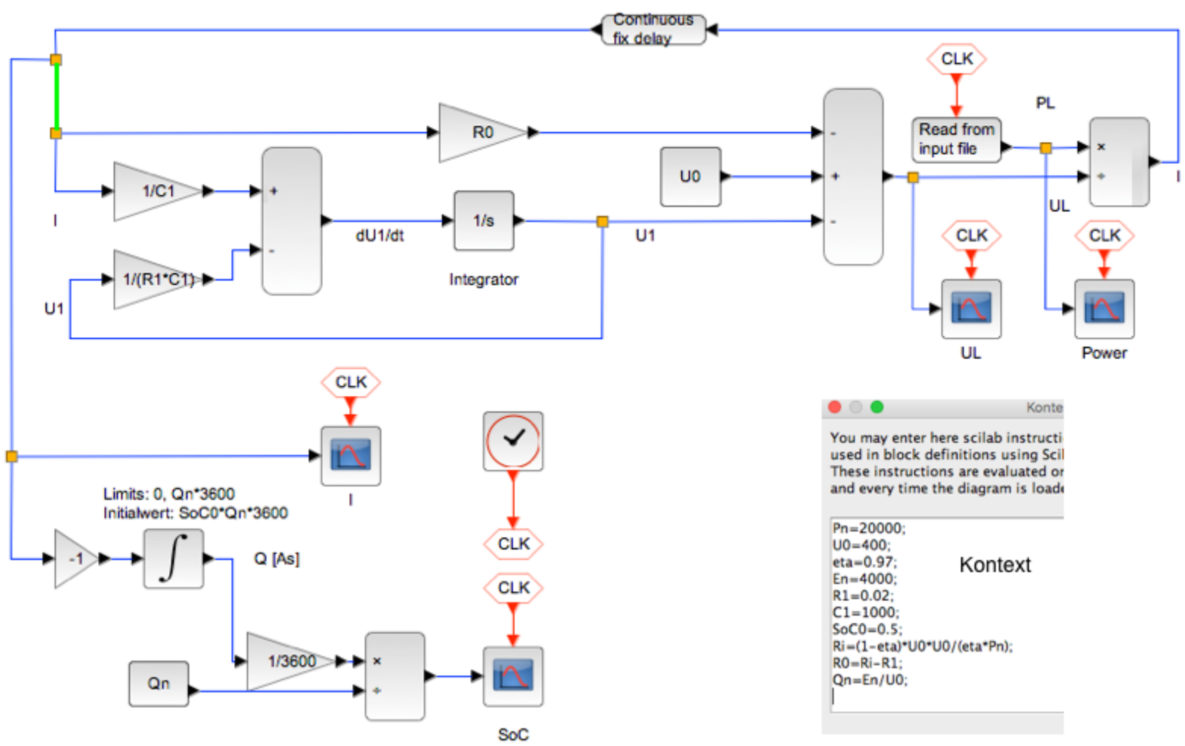
$$R_i = R_0 + R_1 \tag{3.1.18}$$

Der Innenwiderstand R_i ist also auf die beiden Ersatzwiderstände aufzuteilen. Bei der Simulation kann nun die Last direkt als Leistung P vorgegeben werden. Für die Systemgleichungen folgt aus der Last der Lastwiderstand gemäß (3.1.16).

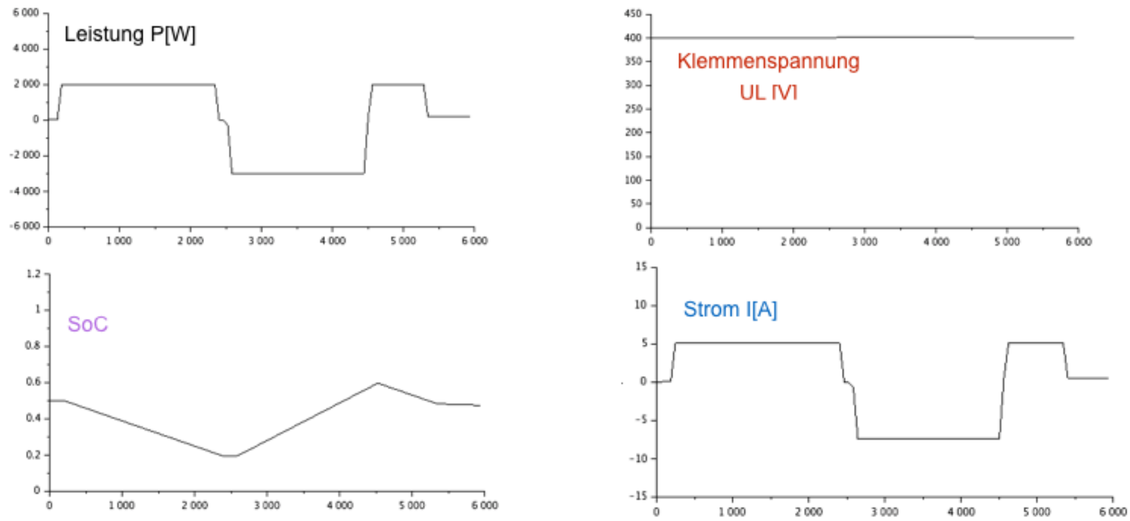
Frage 3.1.8: Erstellen Sie ein Modell, das zu einer gegebenen Betriebsspannung aus dem Anschlusswert (=Nennleistung) und dem Wirkungsgrad den Innenwiderstand der Batterie automatisch berechnet. Verwenden Sie folgende Vorgaben: U_0 = 400V, P_n = 20kW, E_n = 4kWh, η=97%, C_1 = 1000F.

Lösung: Aus den Vorgaben folgen Q_n = 10Ah und R_i = 0,2474Ω. Der Innenwiderstand wird aufgeteilt in R_i= R_0 + R_1. Mit der willkürlichen Vorgabe von R_1 = 0,02Ω (z.B. aus der Zeitkonstanten $\tau = R_1C_1$ = 20s) ergibt sich R_0= 0,2274. Im Modell werden R_1 und C_1 vorgegeben, R_0 berechnet sich aus R_i über den Wirkungsgrad und der Nennleistung.

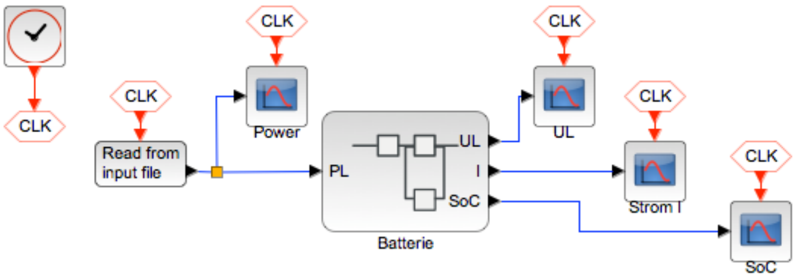
Die Ladung der Batterie für das gegebene Spannungsniveau erhält man aus $Q_n = E_n/U_0$. Diese Ladungsmenge ist abhängig vom Spannungsniveau: bei höherer Spannung können die Ladeströme für die gleiche Energiemenge geringer ausfallen. Als Initialzustand der Batterie wird z.B. SoC_0=50% angenommen.



Zur Modellierung ist dieser Ansatz am einfachsten. In der Realität würde man eine Batterie aus Zellen einzeln aufbauen und DC-Wandler zur Transformation auf die gewünschte Spannung verwenden. Erreicht man hiermit den geforderten Wirkungsgrad für die gewünschte Spannung und Leistung, ergeben sich die gleichen Werte für eine Ersatzschaltung. Dieses Modell gibt die Eigenschaften der Batterie an den Anschlussklemmen korrekt wieder.



Fasst man die Batterie nun zu einem Superblock zusammen, ergibt sich folgendes System.



Abhängigkeiten von Temperatur und Ladezustand

Im bisher betrachteten Modell ist die Quellspannung konstant und somit völlig unabhängig vom Ladezustand. Bis zur vollständigen Entladung steht die volle Quellspannung zur Verfügung. Dieses Verhalten ist wenig realistisch: bei einer realen Batterie wäre die Quellspannung abhängig vom Ladezustand. Ebenso hat die Temperatur einen erheblichen Einfluss auf das Verhalten der Batterie.

Im Bereich vollständiger Ladung gibt die Spannung über dem Ladezustand beim Entladen in exponentieller Weise nach:

$$u_{exp} = A\, e^{-it/B} \qquad (3.1.19)$$

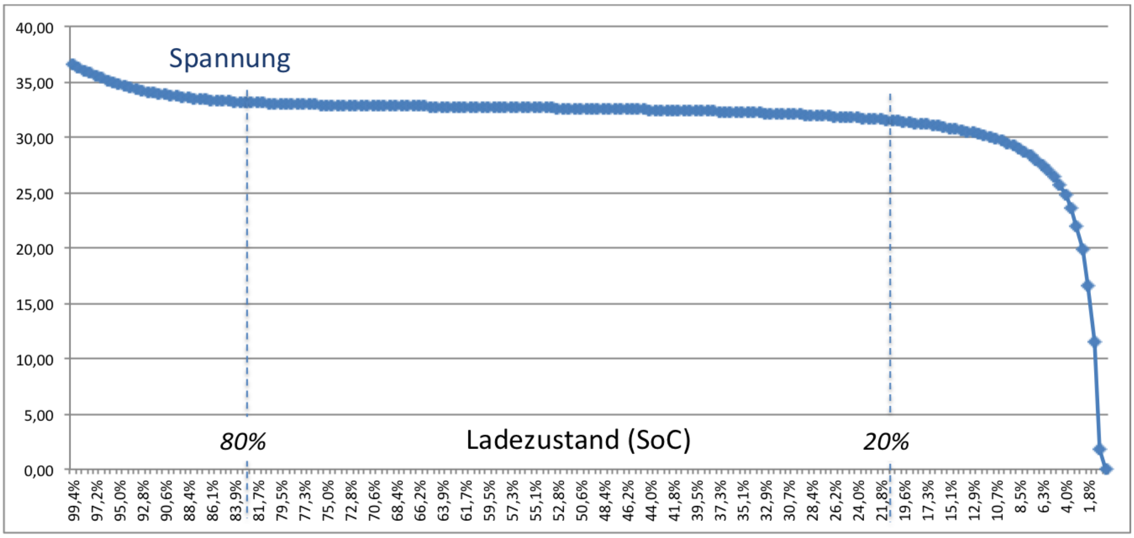
Hierbei bezeichnet A den Betrag der Spannungseinbruchs (z.B. A = 4 V) und B den Ladungsbereich des Spannungseinbruchs (z.B. B = 2500 As). Im Bereich vollständiger Entladung bricht die Spannung völlig zusammen. Diesen Verlauf kann man mathematisch wie folgt beschreiben:

$$u_{dis} = -K \cdot \frac{Q_n}{Q_n - it} \cdot it \qquad (3.1.20)$$

Im hinreichen aufgeladenen Zustand (d.h. Q_n << it) ist dieser dieser Wert annähernd u_{dis} = – K it. Im Bereich der vollständigen Entladung (it ≈ Qn) sorgt die Polstelle für einen Zusammenbruch der Spannung. Die Konstante K kennzeichnet die Steilheit des Effektes im linearen Bereich (z.B. K = 0,025 V/Ah). Insgesamt erhält man für die Spannung:

$$u'_1(it) = u_1(it) + u_{exp}(it) + u_{dis}(it) \qquad (3.1.21)$$

Mit $u_{1\,i}$ ist hierbei gemäß Ersatzschaltbild die Spannung ohne die nichtlinearen Effekte (3.1.19) und (3.1.20) bezeichnet. Folgende Abbildung zeigt den Verlauf. Die Batterie wird hierzu im eingeschwungenen Zustand betrieben, d.h. die durch die Kapazität im Ersatzschaltbild bedingten transienten Verläufe spielen keine Rolle. Bei Spannungen kleiner als Null (bedingt durch u_{dis} im Bereich der vollständigen Entladung) wird die Kennlinie abgeschnitten.



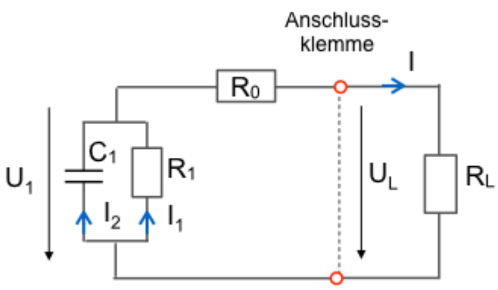
Ruhespannungskurve: Spannung in Abhängigkeit vom Ladezustand

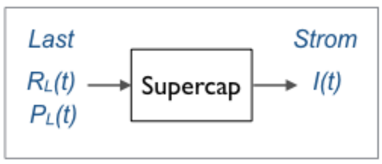
Li-Ionen Batterien besitzen keine Hysterese, d.h. Ladung und Entladung folgen dem gleichen Verlauf bezüglich der Spannung über dem Ladezustand. Die Abbildung zeigt auch, dass für einen realistischer Arbeitspunkt zwischen 20% – 80% SoC die nichtlinearen Effekte so gut wie keine Rolle spielen. In der Praxis sorgt der Laderegler dafür, dass dieser Bereich eingehalten wird. Wird die Batterie in diesem Bereich betrieben, kann man die besagten nichtlineare Effekte im Modell vernachlässigen.

Die Temperatur hat einen erheblichen Einfluß auf die Kenngrößenfelder. Allerdings wird man auch hier die Temperatur auf einem realistischer Arbeitspunkt halten, d.h. bei Nenntemperatur betreiben. Der Laderegler sorgt für eine angemessene Entwärmung im Rahmen der spezifizierten Verlustleistung. Bei Verlassen des spezifizierten Temperaturbereiches sorgt eine Schutzeinrichtung für eine Abschaltung. Auf eine Modellierung der Temperaturabhängigkeit wurde daher in diesem Modell verzichtet.

3.2. Superkondensatoren

Superkondensatoren (Supercaps) besitzen wegen ihrer großen Fläche eine große Kapazität. Das Ersatzschaltbild ist das einer Kapazität C_1 mit Selbstentladung (Parallelwiderstand R_1) und Innenwiderstand R_0, wie in folgender Abbildung gezeigt.





Die Ersatzschaltung wird durch folgende Gleichungen beschrieben.

$$U_1 = (R_0 + R_L) \cdot I = R_0 \cdot I + U_L \qquad (3.2.1)$$

$$I = -\frac{1}{R_1} \cdot U_1 - C_1 \cdot \dot{U}_1 \qquad (3.2.2)$$

Die gespeicherte Energie berechnet sich aus:

$$E_n = \int_0^{U_n} Q\, dU = \int_0^{U_n} C_1 U\, dU = \frac{1}{2} C_1 U_n^2 \qquad (3.2.3)$$

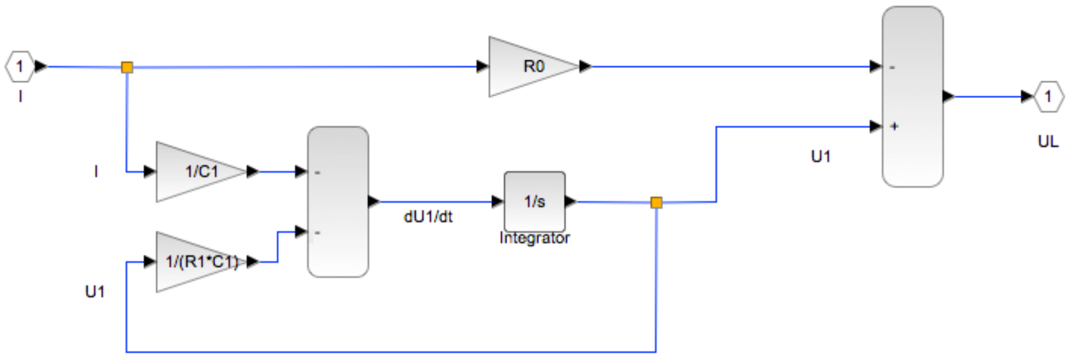
Hierbei ist U_n die Nennspannung bzw. Betriebsspannung des Kondensators.

Frage 3.2.1: Signalfluss. Stellen Sie den Signalfluss zu den Gleichungen (3.2.1) und (3.2.2) dar.

Lösung: Umformung ergibt

$$U_L = U_1 - R_0 \cdot I \qquad (3.2.4)$$

$$\dot{U}_1 = -\frac{1}{C_1} \cdot I - \frac{1}{R_1 C_1} \cdot U_1 \qquad (3.2.5)$$



außerdem gelten

$$P_L = U_L \cdot I \qquad (3.2.6)$$

$$Q_{(t)} = Q_0 - \int_0^t I(\tau) \cdot d\tau \qquad \text{mit } Q_0 = C_1 {*} U_1(0) \qquad (3.2.7)$$

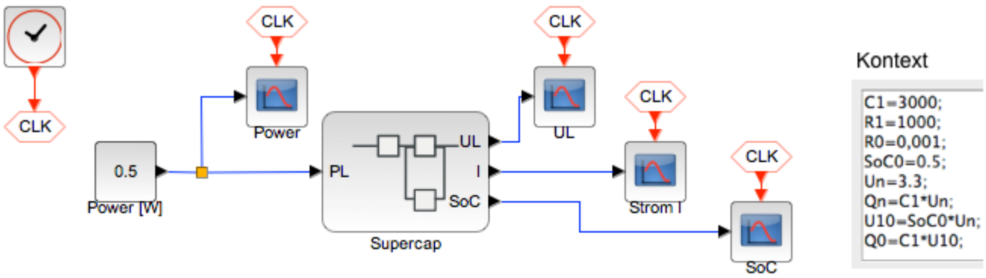
$$SoC = \frac{Q_{(t)}}{Q_n} \qquad (3.2.8)$$

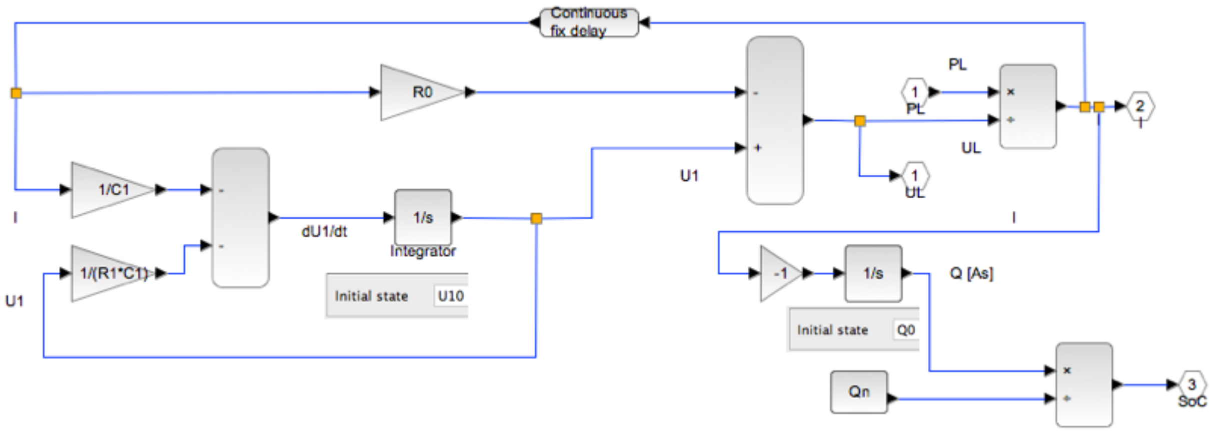
Frage 3.2.2: Simulation. Erstellen Sie eine Simulation für folgende Parameter:

- Kapazität C_1 = 3000F
- Selbstentladung R_1 = 1000 Ω
- Innenwiderstand R_0 = 0,001 Ω

Der Kondensator darf an einer Spannung von ca 3,3V betrieben werden. Hinweis: Sie benötigen einen initialen Ladezustand des Kondensators, d.h. eine initiale Spannung $U_1(0)$.

Lösung:





Zeitdiskretes Modell

Der Übersichtlichkeit halber seien die Gleichungen (3.2.1) und (3.2.2) hier nochmals dargestellt:

$$u_1(t)=(R_0+R_L(t))\cdot i(t) \qquad (3.2.1)$$

$$i(t)=-\frac{1}{R_1}\cdot u_1(t)-C_1\cdot\frac{du_1(t)}{dt} \qquad (3.2.2)$$

Umformung von (3.2.2) nach dem Strom I(t) und Einsetzen von (3.2.2) in (3.2.1) ergibt:

$$\frac{du_1(t)}{dt}=-\frac{1}{\tau}\cdot u_1(t) \quad \text{mit} \quad \tau=\frac{C_1 R_1 (R_0+R_L)}{R_0+R_L+R_1} \qquad (3.2.9)$$

Frage 3.2.3: Zeitdiskretes Modell. Ersetzen Sie die Differenzialgleichung (3.2.8) durch eine Differenzengleichung. Lösen Sie diese Gleichung nach $u_1(k)$ auf.

Lösung: Durch Ersetzen des Differenzials du/dt durch den Differenzenquotienten Δu/Δt erhält man:

$$\frac{u_1(k)-u_1(k-1)}{\Delta t}=-\frac{1}{\tau}\cdot u_1(k) \qquad (3.2.10)$$

Ausmultiplizieren und Zusammenfassen nach $u_1(k)$ ergibt:

$$u_1(k)=\frac{1}{1+\frac{\Delta t}{\tau}}\cdot u_1(k-1) \qquad (3.2.11)$$

Nach Gleichung (3.2.1) erhält man aus $u_1(k)$ den Strom i(k).

Frage 3.2.4: Implementieren Sie das zeitdiskrete Modell in der Tabellenkalkulation.

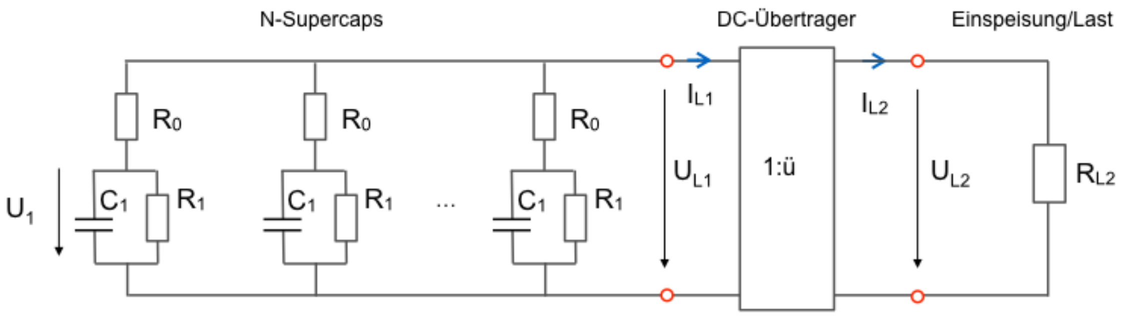
Lösung:

Modell:	**Supercap C1 mit Innenwiderstand R0 und Selbstentladung R1**										
Paramater:	Un		Betriebsspannung	[V]	Un=	3,3	V	Nennspannung des Supercaps			
	R0		Innenwiderstand	[Ω]	R0=	0,001	Ω				
	Qn		Ladungsmenge	[Ah]	Qn=	2,75	Ah	Nennladung aus U0n und C1			
	m		Gewicht	[kg]							
	R1		Selbstentladung	[Ω]	R1=	10000	Ω				
	C1		Kapazität des Supercaps	[F]	C1=	3000	F				
					En=	0,00454	kWh				
	SoC		Ladezustand	[%]	Δt=	1	s				
							Klemmen-				
Index	Zeit	Last	Last	Hilfsgröße	Spannung	Strom	spannung	Leistung	Ladung	Ladung	Ladezustand
k	t [s]	P [kW]	RL [Ω]	τ [s]	u1 [V]	I [A]	UL [V]	P [kW]	Q [As]	Q [Ah]	SoC
-1					3				9000	2,5	90,9%
0	0	0,5	0,02178	68	2,96	129,80	2,83	0,367	8870	2,46	89,6%
1	1	0,5	0,02178	68	2,91	127,92	2,79	0,356	8742	2,43	88,3%
2	2	0,5	0,02178	68	2,87	126,08	2,75	0,346	8616	2,39	87,0%
3	3	0,5	0,02178	68	2,83	124,26	2,71	0,336	8492	2,36	85,8%
4	4	0,5	0,02178	68	2,79	122,47	2,67	0,327	8369	2,32	84,5%
5	5	0,5	0,02178	68	2,75	120,70	2,63	0,317	8249	2,29	83,3%
6	6	0,5	0,02178	68	2,71	118,96	2,59	0,308	8130	2,26	82,1%
7	7	0,5	0,02178	68	2,67	117,25	2,55	0,299	8013	2,23	80,9%
8	8	0,5	0,02178	68	2,63	115,55	2,52	0,291	7897	2,19	79,8%

Hierbei wurde als variable Last der Lastwiderstand R_L modifiziert. Die Hilfsgröße τ ist dann ebenfalls variabel mit dem Lastwiderstand. Das Zeitintervall Δt wird abhängig von der gewünschten zeitlichen Auflösung vorgegeben.

System mit DC-Wandler

Es soll ein System aus mehreren parallel geschalteten Supercaps aufgebaut werden, wie in folgender Abbildung gezeigt.



Zur Anpassung an eine Betriebsspannung U_{L2} wird ein DC-Wandler verwendet. Der DC-Wandler besitzt das Übersetzungsverhältnis ü mit folgenden Eigenschaften:

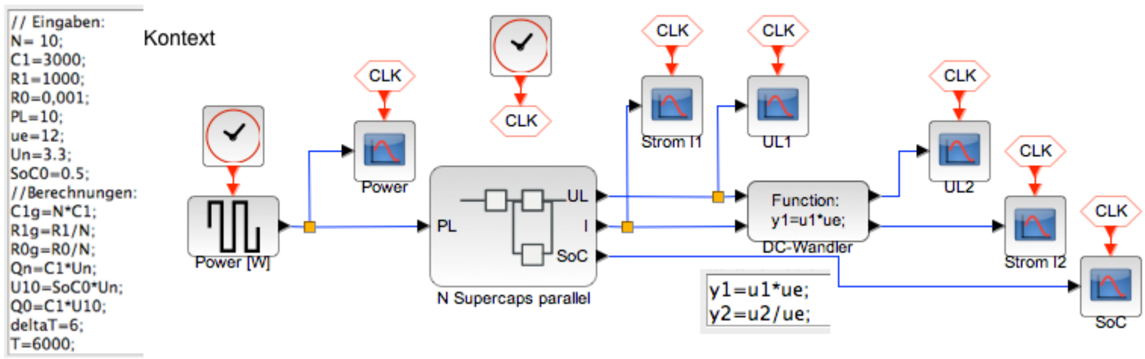
$$U_{L2} = ü \cdot U_{L1}; \quad I_{L2} = \frac{1}{ü} \cdot I_{L1} \qquad (3.2.12)$$

Frage 3.2.5: Welche Eigenschaften besitzt die Parallelschaltung der N gleichen Superkondensatoren bezüglich der gesamten Kapazität C_{1ges}, des gesamten Innenwiderstandes R_{0ges} und der gesamten Selbstentladung R_{1ges}? Welche Ersatzschaltung lässt sich näherungsweise verwenden? Was bewirkt der DC-Wandler?

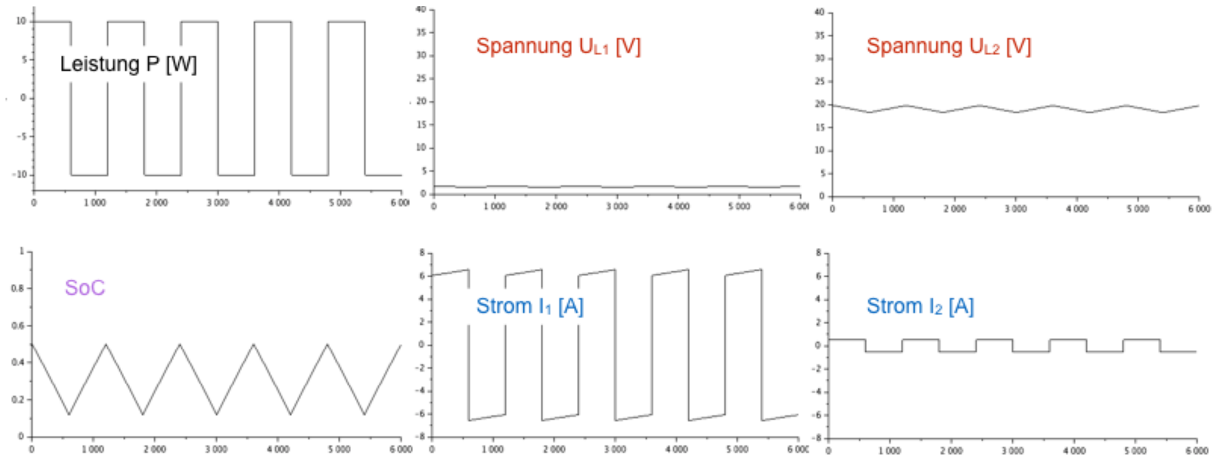
Lösung: Superkondensator mit näherungsweise $C_{1ges} \approx N\ C_1$; $R_{0ges} \approx R_0/N$; $R_{1ges} \approx R_1/N$; Der DC-Wandler bewirkt durch die Transformation der Spannungen und Ströme auch eine Impedanztransformation. Leistung und Energie bleiben hierbei invariant.

Frage 3.2.6: Implementieren Sie das Modell und testen Sie das Modell in der Simulation.

Lösung:



Mit dem Vorgaben im Kontext erhält man folgende Ergebnisse:



3.3. Schwungradspeicher

Als Modell eines mechanischen Speichers (Schwungrad, engl. Flywheel) wird ein einfaches Modell gewählt, das nur die wesentliches physikalischen Zusammenhänge enthält. Das Funktionsprinzip des Schwungrades wird durch folgende physikalischen Gleichungen beschrieben:

$$E = \frac{1}{2} J \omega^2 \qquad (3.3.1)$$

$$M = J \dot{\omega} \qquad (3.3.2)$$

Der Energiegehalt ist abhängig vom Quadrat der Kreisfrequenz, sowie linear abhängig vom Trägheitsmoment des Schwungrades. Ein Antriebsmoment bewirkt eine Drehimpulsänderung, und somit bei konstantem Trägheitsmoment eine Änderung der Drehzahl. Änderungen der geforderten Leistung lassen sich linear in eine Änderung des Drehmoments umsetzen. Charakteristisch ist die quadratische Abhängigkeit des Energiegehalts von der Drehzahl.