

Leistungselektronik und Energie- speicher

Arbeitsblatt 2

Wandler am DC-Netz

Ausgabe 0.3, 18.02.2024
Autor: Stephan Rupp

Kontakt: stephan.rupp@srupp.de
Web: <https://www.srupp.de>

Veröffentlicht unter [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Inhaltsverzeichnis

1. Mittelwertmodell des Wandlers.....	4
1.1. AC-Kreis eines Dual-Active-Bridge-Wandlers.....	4
1.2. DC-Kreise des Wandlers.....	6
1.3. Betrieb an einer Spannungsquelle.....	9
1.4. Vereinfachtes Modell des Wandlers.....	11
2. Betriebsarten.....	15
2.1. DC-Netzbildner.....	15
2.2. Bezugsanlage und Einspeisung.....	18
2.3. Laderegler für Batteriespeicher.....	21
2.4. DC-Transformator.....	23
3. Betrieb von Anlagen am DC-Netz.....	28
3.1. Netzbetrieb ohne Solareinspeisung.....	29
3.2. Netzbetrieb mit Solareinspeisung.....	33
3.3. Inselnetzbetrieb aus dem Batteriespeicher.....	37
3.4. Betrieb mit Subnetz.....	40

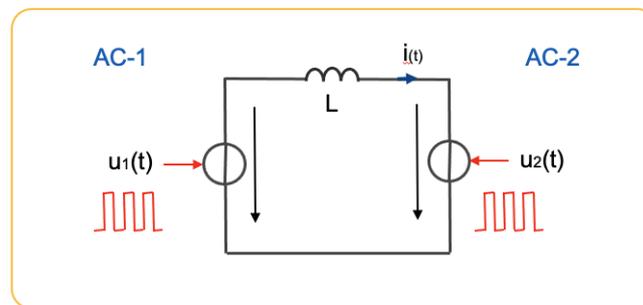
1. Mittelwertmodell des Wandlers

Unter einem Mittelwertmodell wird hier ein Modell verstanden, das mit Hilfe von Stromquellen und Spannungsquellen aufgebaut ist, anstelle schaltender Elemente (Transistoren). Stromquellen und Spannungsquellen können wahlweise pulsbreitenmoduliert betrieben werden, bzw. mit Netzfrequenz oder als Gleichstrom- bzw. Gleichspannungsquellen.

Solche Modelle illustrieren das Funktionsprinzip der Schaltung und verkürzen die Dauer der Simulation. Sie dienen auch als Basis für das Regelungskonzept und die Auslegung der Regler, ohne Details zur Ansteuerung der Schaltelemente. Bei Bedarf lassen sie sich zu physikalischen Modellen einschließlich der Schalter erweitern.

1.1. AC-Kreis eines Dual-Active-Bridge-Wandlers

DAB-Konverter mit Phasenansteuerung funktionieren nach dem Prinzip induktiv gekoppelter Spannungsquellen. Details zur Funktionsweise (einschließlich der Funktionsweise serienresonanter DAB-Konverter) finden sich im [Skript Teil 3](#).



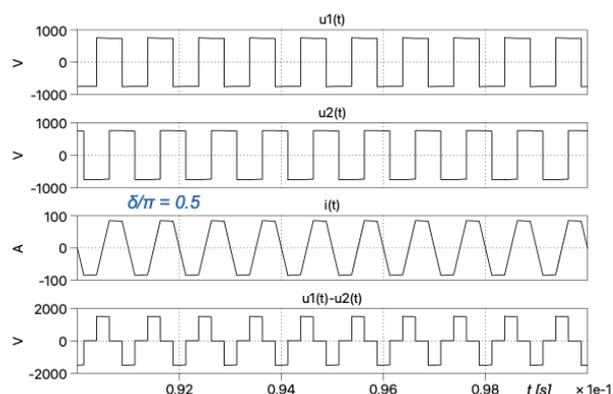
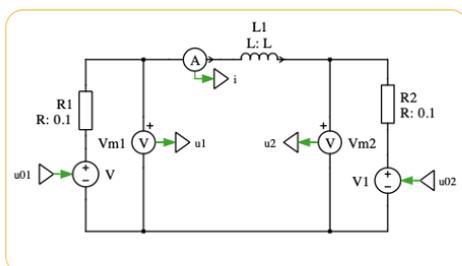
Erläuterungen zur Funktionsweise induktiv gekoppelter Spannungsquellen findet sich mit Zeigerdiagrammen und [PLECS-Modellen](#) in [Arbeitsblatt 1](#) zur Leistungselektronik. Dieses Arbeitsblatt findet sich im Web unter [Arbeitsblatt 2](#).

Frage 1.1.1: Machen Sie sich mit der Funktionsweise induktiv gekoppelter Spannungsquellen aus Arbeitsblatt 1 vertraut. Welchen Einfluss hat eine Phasenverschiebung zwischen den Spannungsquellen? Welchen Einfluss haben unterschiedliche Amplituden der Spannungsquellen?

Lösung: siehe Erläuterungen im Arbeitsblatt 1.

Frage 1.1.2: Erstellen Sie ein Simulationsmodell zur in der Abbildung dargestellten Schaltung. Legen Sie die Spannungsamplitude und die gewünschte Leistung fest. Legen Sie die Schaltung auf eine Schaltfrequenz von $f_s = 1$ kHz aus. Stellen Sie Spannungen und Ströme dar und erläutern Sie die Funktionsweise der Schaltung.

Lösungsbeispiel: siehe folgende Abbildung (das Model findet sich hier: [Modelle zum Arbeitsblatt 2](#)).



Der Strom folgt im AC-Kreis den Spannungsquellen der Beziehung

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_0^t (u_1(\tau) - u_2(\tau)) \cdot d\tau \quad (1.1)$$

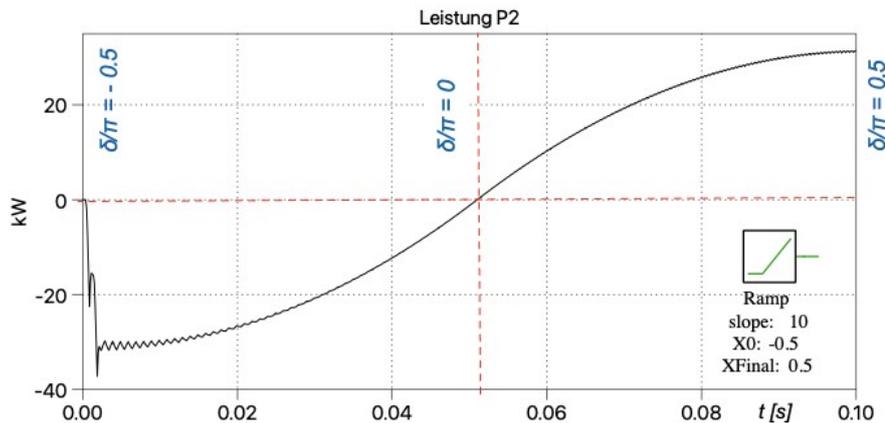
Der Stromverlauf in der Abbildung lässt sich aus dieser Gleichung interpretieren: Sind beide Spannungen unterschiedlich, z.B. $u_1(t) > u_2(t)$ steigt der Strom linear an, andernfalls fällt der Strom ab. Sind beide Spannungen gleich, bleibt der Strom konstant. Man erhält einen trapezförmige Stromverlauf.

Die Schaltung wurde auf eine Betriebsspannung von 750 V und eine Leistung von ca. 40 kW ausgelegt. Die hierfür benötigte Reaktanz X ergibt sich aus Gleichung (2.4“) in [Arbeitsblatt 1](#) zur Vorlesung. Man erkennt, dass sich auch bei rechteckförmiger Modulation der Spannungsquellen bei einer Phasenverschiebung ein Lastfluss zwischen beiden Spannungsquellen einstellt.

Beide Spannungsquellen wurden nicht als ideale Spannungsquellen realisiert, sondern mit Innenwiderständen. Die Innenwiderstände übernehmen die Dämpfung der Schaltung nach dem Einschalten.

Frage 1.1.3: Leistung. Welche Leistung ergibt sich in Abhängigkeit der Phasenverschiebung? Nehmen Sie die Leistungskennlinie $P(m)$ auf, wobei m den normierten Phasenwinkel $m = \delta/\pi$ darstellt. Der Modulationsindex m stellt die Stellgröße der Schaltung dar.

Lösungsbeispiel: Variiert man den Modulationsindex $m = \delta/\pi$ im Bereich $\{-0,5 \text{ bis } 0,5\}$, so bewegt sich der Phasenwinkel zwischen beiden Spannungen im Bereich $\{-\pi/2 \text{ bis } \pi/2\}$.



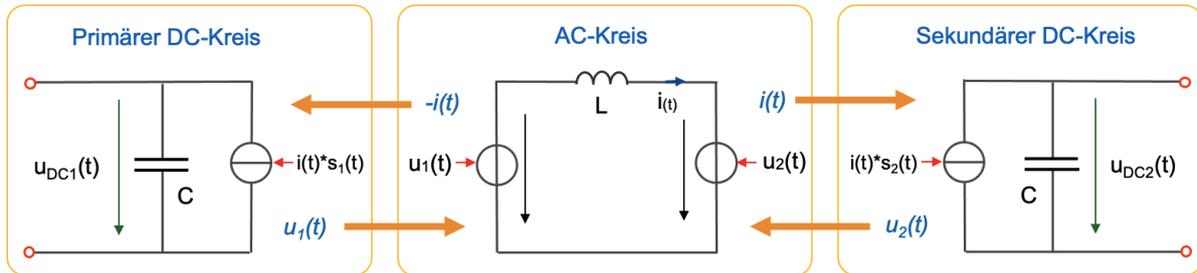
Die Leistung zeigt den nach Gleichung (2.4“) aus Arbeitsblatt 1 zu erwartenden Verlauf. Man erkennt, dass der Lastfluss sich mit dem Vorzeichen des Spannungswinkels δ umkehrt. Die vorgegebene Leistung von 40 kW wird hierbei nicht ganz erreicht. Hierzu müsste man die Reaktanz mit etwas Reserve kleiner wählen, bzw. die Effektivwerte der Spannungen etwas kleiner vorgeben. Im Beispiel wurden für die rechteckförmigen Spannungen als Effektivwerte die Scheitelwerte der Leerlaufspannungen der Quellen verwendet.

Frage 1.1.4: Transformator im AC-Kreis. Wird im AC-Kreis ein Transformator verwendet, so trennt die Schaltung galvanisch und es gilt ein Übersetzungsverhältnis für Ströme und Spannungen im Sekundärkreis im Verhältnis zum Primärkreis. Wodurch entsteht die induktive Kopplung mit L in dieser Schaltungsvariante? Wie verhält sich die Schaltung im Kurzschlussfall?

Lösung: Durch die Streuinduktivität des Transformators. Die Schaltung verhält sich im AC-Kreis wie ein konventioneller Transformator, der jedoch mit Schaltfrequenz betrieben wird und daher kleiner ausfällt als ein 50 Hz-Transformator (wegen $X = \omega_s L$). Im Kurzschlussfall wird der Strom durch die Streureaktanz X begrenzt (siehe Definition der Kurzschlussspannung beim Transformator).

1.2. DC-Kreise des Wandlers

Folgende Abbildung zeigt den Aufbau des Modells mit DC-Kreisen.



In der Schaltung sind die Anschlussklemmen der DAB mit Hilfe von H-Brücken mit dem AC-Kreis verbunden. An den Anschlussklemmen befinden sich die Kapazitäten der Primärseite und des Sekundärseite der Wandler. Die Kopplung mit dem AC-Kreis wird im Mittelwertmodell mit Hilfe von Stromquellen dargestellt. Die H-Brücken bewirken die Gleichrichtung bzw. Wechselrichtung der Ströme. Hierbei wird auch die Spannung auf der Primärseite bzw. Sekundärseite des Wandlers im Takt der Schaltfrequenz mit jeweils wechselndem Vorzeichen an den AC-Kreis übertragen.

Frage 1.2.1: Erläutern Sie das Funktionsprinzip der in der Abbildung dargestellten Schaltung. Welche Funktion bleibt dem AC-Kreis?

Lösung: Die DC-Spannungen werden in den AC-Kreis als Wechselfspannungen gespiegelt. Den Takt und die Phasenverschiebung der beiden AC-Spannungen bestimmt der AC-Kreis mit Hilfe der Modulation $m = \delta/\pi$, die die Phasenverschiebung der AC-Spannungen bestimmt. Regelungstechnisch stellt der Modulationsindex m die Stellgröße dar.

Mit der Stellgröße m wird der Lastfluss in die DC-Kreise vorgegeben, wobei beide Richtungen möglich sind (siehe Aufgabe 1.1.3). Die Ströme der AC-Kreise koppeln im Takt $s_2(t)$ (bzw. $s_1(t)$) der Spannungsquellen $u_2(t)$ (bzw. $u_1(t)$) in die DC-Kreise und werden dort geglättet.

Sollten die DC-Spannungen nicht übereinstimmen, ergibt sich im AC-Kreis ein Blindstrom. Der Blindstrom gleicht die Spannungsamplituden über der Koppelinduktivität aus und belastet den AC-Kreis. Im DC-Kreis besitzt der Blindstrom keinen Gleichanteil und wird durch die Kapazität ausgeglichen.

Frage 1.2.2: Beschaltung. Welchen Einfluss hat die Stellgröße m , wenn primärseitig eine Spannungsquelle angeschlossen ist und die Sekundärseite im Leerlauf betrieben wird? Welchen Einfluss hat die Stellgröße m , wenn sekundärseitig ein Lastwiderstand bzw. eine Stromquelle angeschlossen ist? Wie erhält man eine konstante Ausgangsspannung?

Lösung: Die Stellgröße m lässt einen Stromfluss zur Sekundärseite aus, bzw. führt Strom von der Sekundärseite ab. Bei einem Zufluss erhöht sich die Spannung über der Kapazität wegen

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) \cdot d\tau \quad (1.2)$$

(1) im Leerlauf erhöht sich die Spannung kontinuierlich und hat keine Begrenzung. (2) Mit einem Lastwiderstand erhöht sich die Spannung solange, bis der Abfluss durch den Lastwiderstand dem Zufluss durch die Stellgröße m entspricht. Das Spannungsniveau hängt somit von der Größe des Lastwiderstandes ab. Durch den Lastwiderstand ist die Lastflussrichtung festgelegt.

(3) Mit einer Stromquelle als Last ergibt sich kein stabiler Zustand, wenn der Zufluss vom Abfluss abweicht. Da der Zufluss mit Hilfe der Stellgröße m vorgegeben wird, und der Abfluss unabhängig hiervon, wird die Kapazität entweder geleert oder kontinuierlich aufgefüllt. Mit Hilfe der Stromquelle lässt sich je nach Stromrichtung auf der DC-Seite Leistung abführen oder Leistung einspeisen.

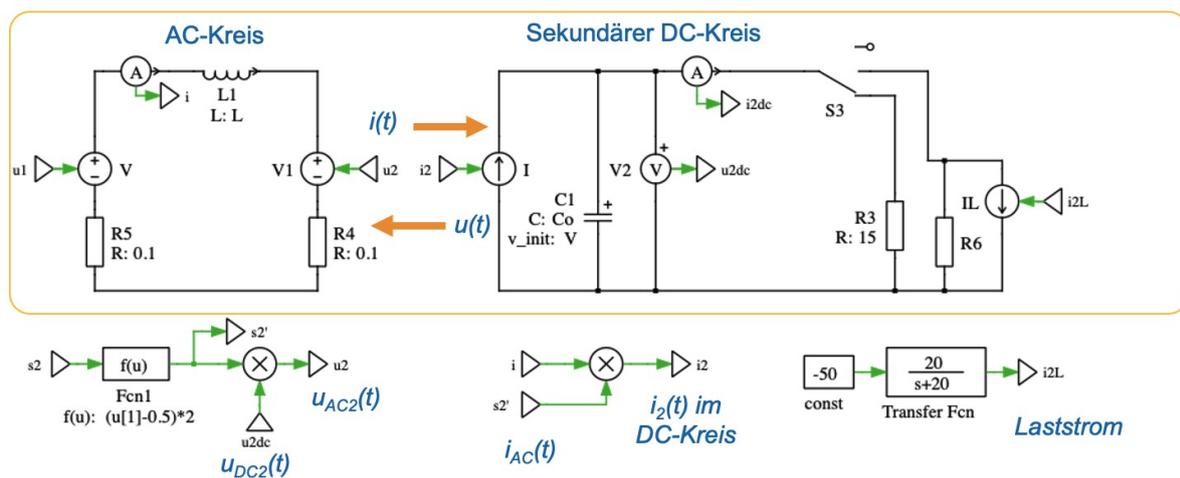
Für eine stabile Ausgangsspannung benötigt die Sekundärseite einen Spannungsregler. Führungsgröße ist hierbei die Sekundärspannung $u_{DC2}(t)$, Stellgröße die Modulation m .

Frage 1.2.3: Aufbau eines Modells. Bauen Sie die Schaltung mit einem DC-Kreis auf der Sekundärseite auf. Für die Primärseite genügt der AC-Kreis, der über eine Spannungsquelle verfügt. Auf der Sekundärseite soll wahlweise ein Lastwiderstand oder eine DC-Stromquelle angeschlossen werden. Außerdem soll die Sekundärseite im Leerlauf betrieben werden können.

Lösungsbeispiel: siehe folgende Abbildung. Zur Auskopplung des Stromes aus dem AC-Kreis in den DC-Kreis wird dieser im Takt der Spannung $u_2(t)$ in den DC-Kreis gepolt und übertragen. Im Modell erfolgt das durch Multiplikation des auf 1 normierten Steuersignals $s_2'(t)$ der Spannung $u_2(t)$.

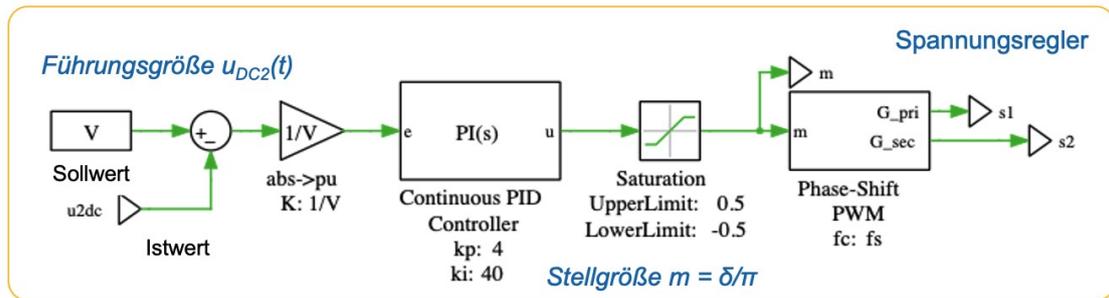
In einer realen H-Brücke wird der Strom gleichermaßen mit wechselnder Polarität vom AC-Kreis in den DC-Kreis geführt. Auf diese Weise bleiben Blindströme im AC-Kreis: In jeweils einer Halbwelle der Spannung haben diese wegen der Phasenverschiebung um eine Viertelperiode gleichgroße positive und negative Anteile. Der Mittelwert im DC-Kreis bleibt Null. Wirkströme im AC-Kreis behalten auf diese Weise einen positiven bzw. negativen Gleichanteil.

Im Betrieb an einem Lastwiderstand nimmt die sekundäre Spannungsquelle $u_2(t)$ die Leistung P_2 auf und gibt sie mit Hilfe des Stroms an den DC-Kreis weiter: Der Strom hat in den gemessenen Richtungen in der Abbildung positives Vorzeichen. Der Lastwiderstand nimmt die Leistung auf.



Die Amplitude der sekundären AC-Spannung $u_2(t)$ entspricht der sekundären DC-Spannung $u_{DC2}(t)$, wobei das Referenzsignal für die AC-Spannung mit der Phasenverschiebung weiterhin verwendet wird. Die Signalflüsse zur Kopplung von Strom und Spannung finden sich unterhalb des Schaltkreises in der Abbildung oben.

Der Schaltkreis ermöglicht die Auswahl der Beschaltung auf der DC-Seite: Wahlweise Leerlauf, Betrieb an einer Stromquelle in beiden Lastflussrichtungen, sowie Betrieb an einem Lastwiderstand. Damit sich in jedem der Betriebsfälle eine definierte Spannung einstellt, wird die Schaltung um einen Spannungsregler ergänzt, wie in folgender Abbildung dargestellt.

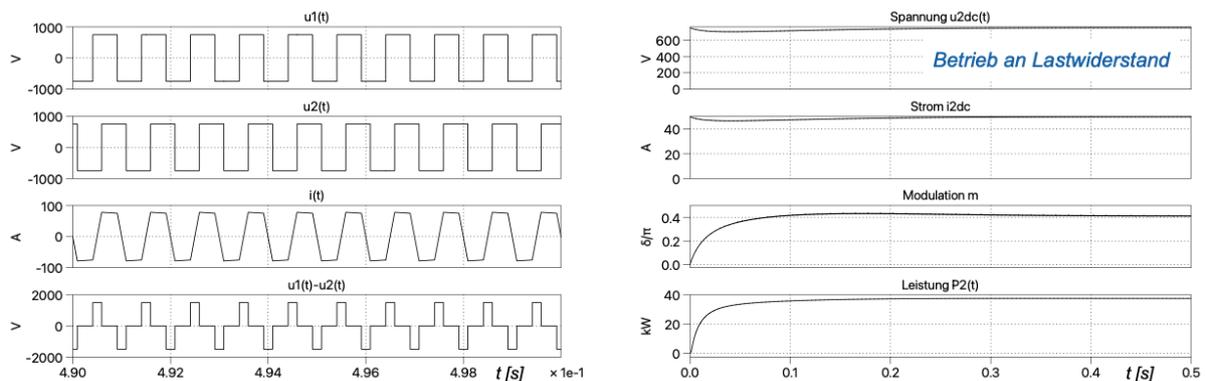


Der Spannungsregler entspricht dem Prinzip der Füllstandregelung aus Arbeitsblatt 1, Aufgabe 1. Als Stellgröße für den Strom dient hierbei die Modulation m des AC-Kreises. Führungsgröße der Regelung ist die Spannung $u_{DC2}(t)$ im DC-Kreis. Im Beispiel wird eine feste Spannung als Sollwert vorgegeben. Die Stellgröße der Regelung wird auf einen Wertebereich begrenzt, der einem Phasenwinkel von $\{-\pi/2$ bis $\pi/2\}$ entspricht.

Frage 1.2.4: Simulation. Untersuchen Sie die in Frage 2.3.1 genannten Betriebszustände in der Simulation. Welchen Einfluss hat die Stromrichtung der Stromquelle?

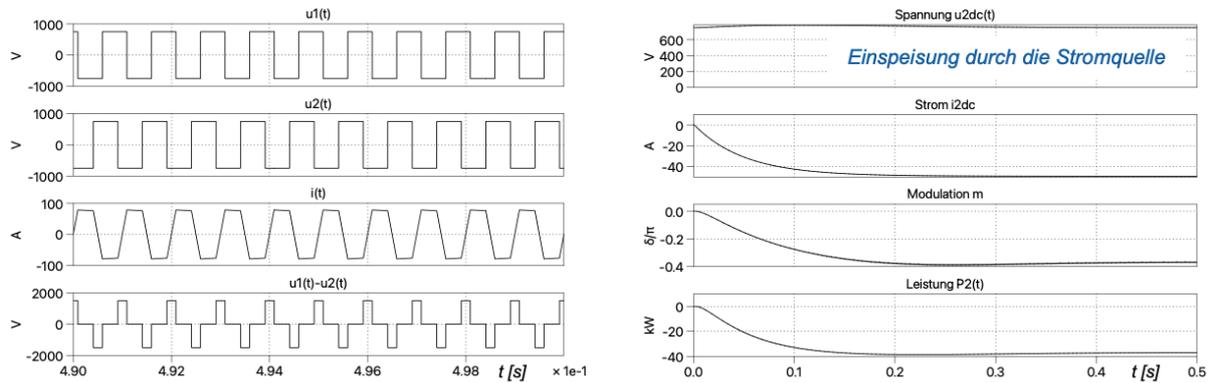
Lösungsbeispiel: Im Leerlaufbetrieb wird die Stellgröße auf $m=0$ geführt, sobald die Ausgangskapazität aufgeladen ist. In der Simulation lässt sich die Kapazität vorladen, um den Einschaltvorgang vorzusetzen.

Im Betrieb mit Lastwiderstand fließt bei vorgeladener Kapazität sofort ein Strom, der die Kapazität entlädt und somit zu einer sinkenden Spannung $u_{DC2}(t)$ führt. Wegen dieser Regelabweichung erhöht der Regler mit Hilfe der Stellgröße m den Zufluss aus dem AC-Kreis. Folgende Abbildung zeigt den Verlauf der Spannung $u_{DC2}(t)$, des Stroms $i_{DC2}(t)$, sowie den Modulationsindex $m(t)$ über eine Zeit von 0,5 Sekunden zusammen mit den Strömen und Spannungen im AC-Kreis für die letzten 10 ms. Ebenfalls dargestellt ist die Leistung $P_2(t)$ im AC-Kreis.



Man erkennt, dass der Regler die gewünschte Spannung herstellt. Mit dem gewählten Lastwiderstand kommt die Schaltung an die Nähe der Leistungsgrenze, was sich am Modulationsgrad m erkennen lässt. Der Strom im AC-Kreis ist in Phase mit den Spannungen, es wird Leistung aufgenommen.

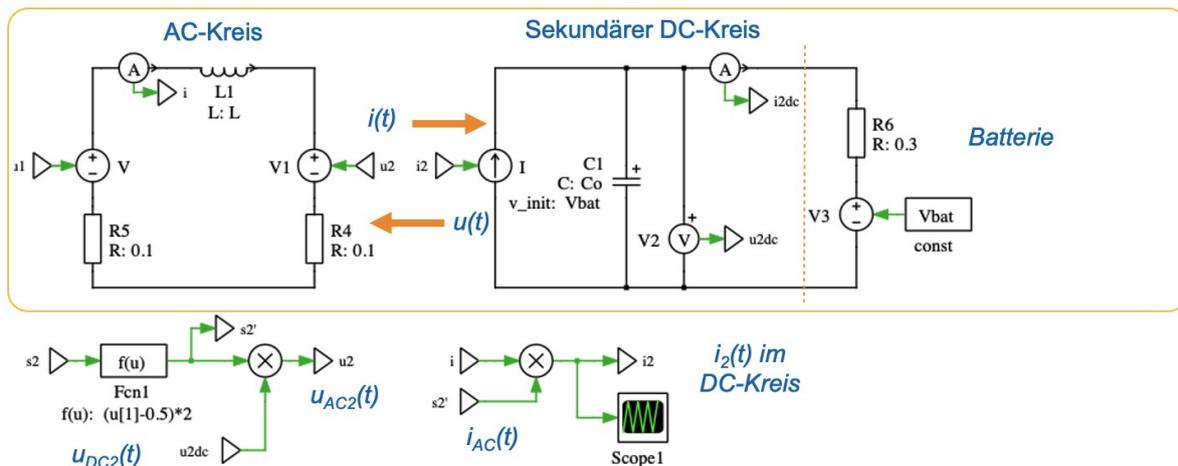
Bei Betrieb an einer Stromquelle mit negativer Stromrichtung erhält man eine Einspeisung vom DC-Kreis in den AC-Kreis, die Leistung wird negativ. Folgende Abbildung zeigt einen Simulationslauf.



Als Strom wurde $i_{DC,soil} = 50 \text{ A}$ vorgegeben. Der Spannungsregler stellt auch hier die gewünschte Spannung im DC_Kreis ein, allerdings wird die Modulation m nun negativ, die Spannung $u_2(t)$ läuft vor der Spannung $u_1(t)$, was sich an den Spannungen im AC-Kreis erkennen lässt. Die Richtung des Stroms im AC-Kreis kehrt sich entsprechend um, die Spannungsquelle $u_2(t)$ gibt Leistung an $u_1(t)$ ab.

1.3. Betrieb an einer Spannungsquelle

Der Wandler soll sekundärseitig an einer Spannungsquelle betrieben werden. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn die Batterie eines Elektrofahrzeugs geladen werden soll. In diesem Fall gibt die Batterie die Spannung im Sekundärkreis des Wandlers vor. Die Batteriespannung kann hierbei von der Spannung im Primärkreis abweichen. Folgende Abbildung zeigt den Aufbau der Schaltung.



Der Wandler hat nun die Aufgabe, die Batterie zu laden bzw. der Batterie Leistung zu entnehmen. Somit ist eine Stromregelung im Sekundärkreis erforderlich.

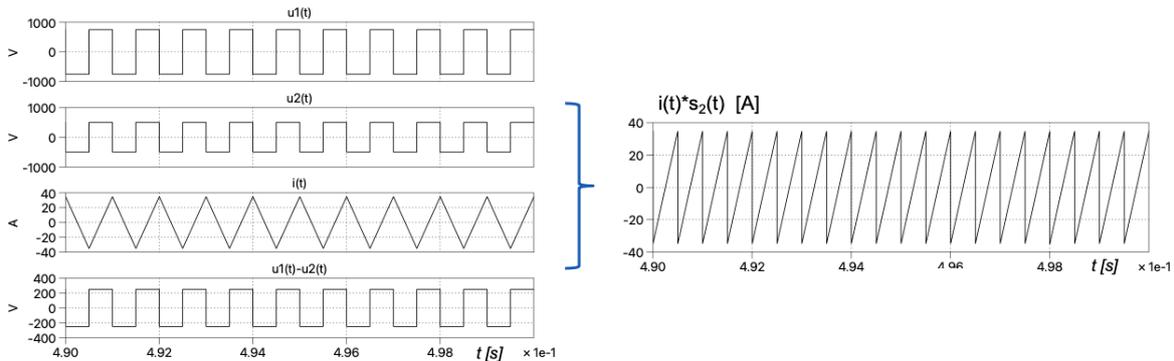
Frage 1.3.1: Funktionsprinzip. Erläutern Sie das Funktionsprinzip der Schaltung. Welchen Einfluss hat die Batteriespannung, wenn diese von der Spannung im Primärkreis abweicht? Wie funktioniert die Stromregelung?

Lösung: Die Batteriespannung im Sekundärkreis wird auf die Spannung $u_2(t)$ im AC-Kreis abgebildet. Bei abweichender Batteriespannung besitzen somit $u_2(t)$ und $u_1(t)$ unterschiedliche Amplituden. Der Ausgleich der Spannungen erfolgt im AC-Kreis nach der Maschenregel durch die Spannung über der Koppellinduktivität L : Man erhält einen Blindstrom im AC-Kreis.

Unabhängig von den Spannungsamplituden lässt sich über die Phasenverschiebung δ zwischen den beiden Spannungen $u_2(t)$ und $u_1(t)$ im AC-Kreis ein Wirkstrom einstellen, der in den DC-Kreis übertragen wird. Je nach Vorzeichen der Phasenverschiebung δ ergeben sich unterschiedliche Stromrichtungen und somit unterschiedliche Lastflussrichtungen.

Frage 1.3.2: Betrieb im Leerlauf. Untersuchen Sie das Verhalten der Schaltung in der Simulation im Leerlauf, d.h. für $m = 0$. Welcher Strom stellt sich ein?

Lösungsbeispiel: siehe folgende Abbildung.



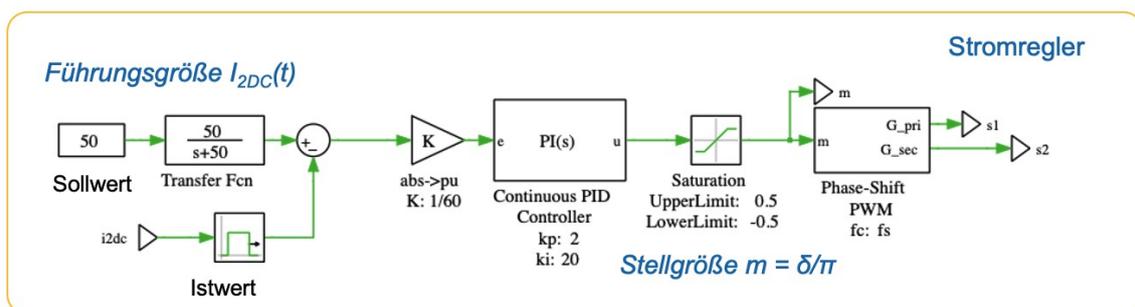
Im Beispiel beträgt die primäre Spannung 750 V, die sekundäre Spannung (= Batteriespannung) 500 V. Beide Spannungen im AC-Kreis sind phasensynchron mit $\delta = 0$. Wegen der Spannungsdifferenz stellt sich im AC-Kreis ein Strom ein. Der Strom ist um eine Viertelperiode verschoben zu den beiden Spannungen und somit ein Blindstrom.

Der in den DC-Kreis übertragene Strom stellt das Produkt des Taktes $s_2(t)$ und des AC-Stromes $i(t)$ dar und ist im rechten Teil der Abbildung dargestellt. Dieser Strom besitzt den Mittelwert Null und wird somit durch die Kapazität im DC-Kreis ausgeglichen. Der Batteriestrom im DC-Kreis ist annähernd Null.

Bemerkung: Da die Kapazität im DC-Kreis parallel zum Innenwiderstand der Batterie geschaltet ist, fließt ein Teil des getakteten Stroms an der Kapazität vorbei in den Batteriekreis. Dieser Strom ist abhängig von der Größe der Kapazität und vom Innenwiderstand der Batterie und führt zu Verlusten im Batteriekreis.

Frage 1.3.3: Betrieb mit Stromregler. Ergänzen Sie die Schaltung um einen Stromregler und geben Sie hiermit einen Ladestrom für die Batterie vor.

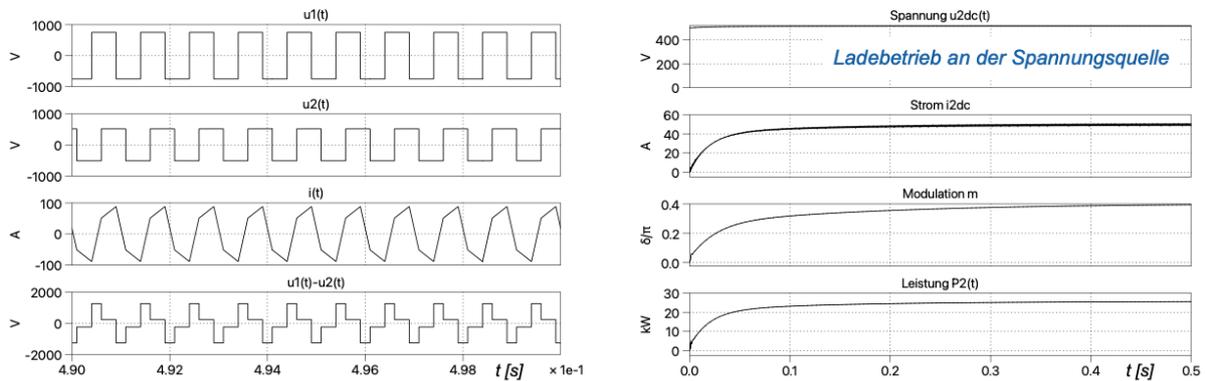
Lösungsbeispiel: siehe folgende Abbildung.



Führungsgröße ist nun der Strom $i_{2DC}(t)$ an der Anschlussklemme des Wandlers zur Batterie. Die Regelabweichung wird auf einen PI-Regler geführt und hiermit die Stellgröße m bedient. Der Regler stellt die Modulation so ein, dass sich der gewünschte Strom ergibt. Durch das Vorzeichen des Stroms wird die Lastflussrichtung vorgegeben: Die Batterie kann somit geladen und entladen werden. Der Regler ermöglicht somit das etwas unglücklich bezeichnete bidirektionale Laden.

Da die Batteriespannung gegenüber Frage 1.3.2 unverändert geblieben ist (500 V gegenüber 750 V), bleiben der Blindstrom im AC-Kreis erhalten: Wirkstrom und Blindstrom überlagern sich. Der in folgen-

der Abbildung dargestellte Simulationslauf zeigt die Überlagerung der Trapezform mit der Dreiecksform im Stromsignal.



Der Blindstromanteil wird im DC-Kreis durch die Kapazität ausgeglichen. Es verbleibt der Wirkstrom, der durch den Regler auf den gewünschten Wert geführt wird. Die Darstellung auf der rechten Seite zeigt außerdem den Modulationsgrad m und die Ladeleistung der Batterie.

Frage 1.3.4: Blindstrom. Im Bildbereich (Zeigerdarstellung) sind Blindströme orthogonal zur Spannung. Wann sind zwei Vektoren orthogonal? Wie ist Orthogonalität für zwei Funktionen im Zeitbereich definiert?

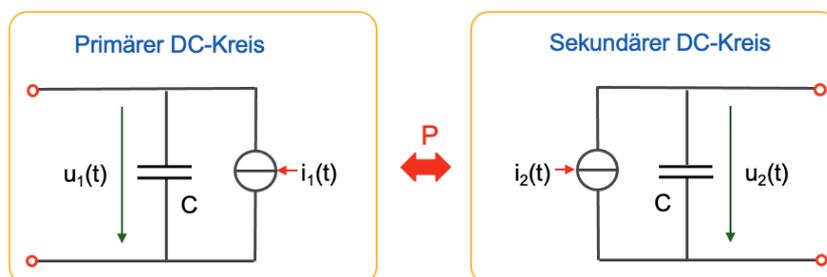
Lösung: Zwei Vektoren gelten als orthogonal, wenn ihr Skalarprodukt Null ergibt. Im Zeitbereich sind zwei Funktionen $i(t)$ und $u(t)$ dann orthogonal, wenn

$$\int_0^T i(t) \cdot u(t) dt = 0 \quad ,$$

wenn ihr Produkt also im Mittel (bzw. über der Periodendauer T) den Wert Null ergibt. Auf diese Weise werden die im Takt $s_2(t)$ der Spannung geschalteten Blindströme $i(t) \cdot s_2(t)$ im DC-Kreis nach der Beziehung (1.2) durch die Kapazität eliminiert.

1.4. Vereinfachtes Modell des Wandlers

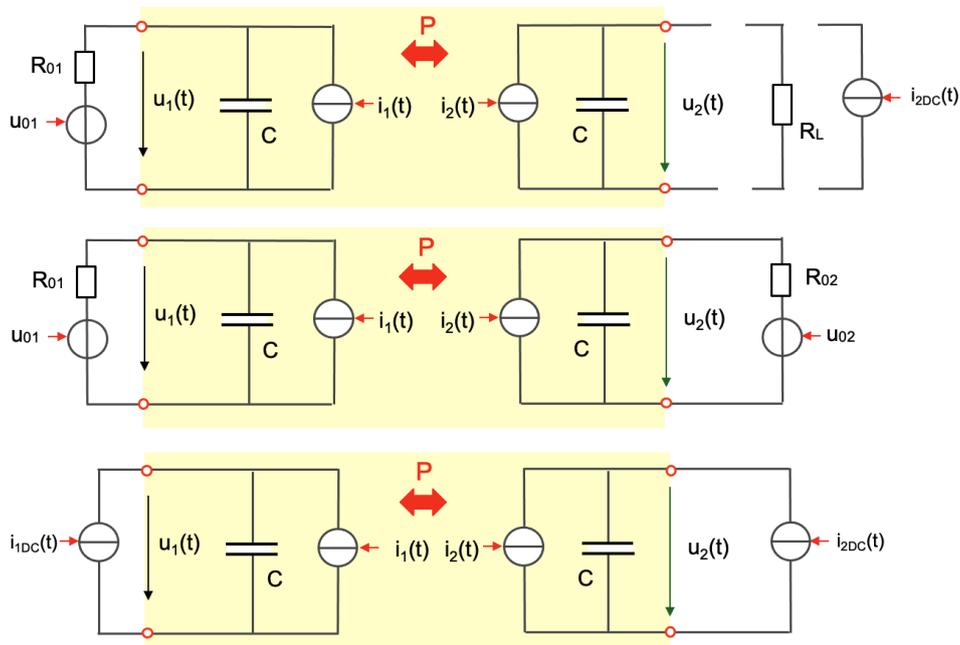
Beschränkt man sich auf das Verhalten an den DC-Klemmen, lässt sich der Wandler auf über die Leistung gekoppelte Stromquellen reduzieren, wie in folgender Abbildung dargestellt.



In diesem Modell fehlt der AC-Kreis mit der phasenverschobenen Ansteuerung und den möglichen Blindströmen komplett. Da der AC-Kreis mit phasenverschobener Ansteuerung als Stromquelle funktioniert, wird die Betriebsweise an den DC-Klemmen durch die Stromquellen korrekt wiedergegeben, allerdings sind die Ströme $i_1(t)$ und $i_2(t)$ zeitvariable Ströme ohne den Blindstromanteil aus dem AC-Kreis.

Frage 1.4.1: Welche Beschaltungen auf der Primärseite und auf der Sekundärseite kommen für den Wandler in Frage? Erläutern Sie die jeweilige Funktionsweise.

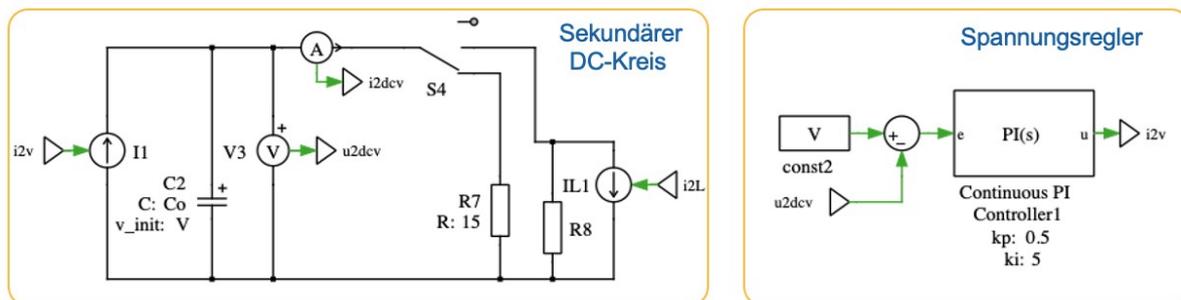
Lösung: Als Beschaltung kommen Spannungsquellen, Stromquellen und Lastwiderstände in Frage. Da die Schaltung symmetrisch aufgebaut ist, lassen sich Primärseite und Sekundärseite austauschen. Folgende Abbildung zeigt eine Übersicht über die Möglichkeiten zur Beschaltung.



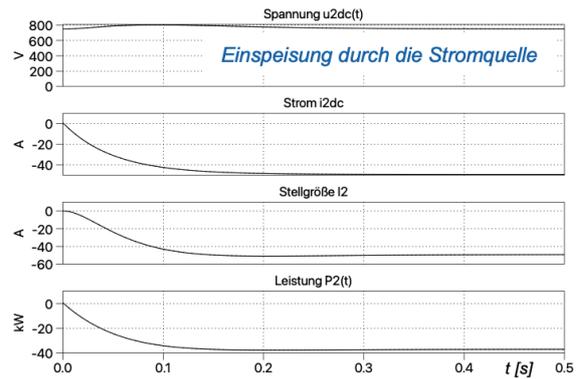
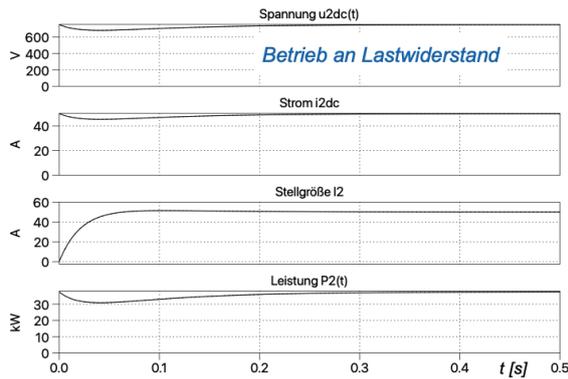
In den oberen beiden Varianten ist die Primärseite an eine Spannungsquelle angeschlossen, in der untersten Variante an eine Stromquelle. Spannungsquellen am Anschluss legen die Spannung fest: Die Schaltung arbeitet dort als Stromquelle. Lastwiderstände oder Stromquellen an einem Anschluss benötigen einen Spannungsregler der Schaltung an diesem Anschluss. In allen Fällen gilt das Gleichgewicht der Leistungen $P_2 = P_1$.

Frage 1.4.2: Betrieb an einer Last bzw. an einer Stromquelle. Die Schaltung wird primärseitig an einer Spannungsquelle $u_1(t) = u_{01}$ mit Innenwiderstand R_1 betrieben, sekundärseitig an einem Lastwiderstand R bzw. an einer Stromquelle $i_{2DC}(t)$. Welches Regelungskonzept wird benötigt? Welchen Einfluss hat die Kopplung der Leistung $P_2 = P_1$? Untersuchen Sie die Schaltung in der Simulation. Reduzieren Sie die Schaltung auf die Sekundärseite.

Lösung: Es wird ein Spannungsregler auf der Sekundärseite benötigt. Der Primärseite wird die benötigte Leistung entnommen, bzw. die eingespeiste Leistung wird auf die Primärseite weitergegeben. Da sich abgesehen von der Leistungskopplung kein weiterer Einfluss aus der primärseitigen Beschaltung ergibt, lässt sich die Schaltung auf die Sekundärseite reduzieren.

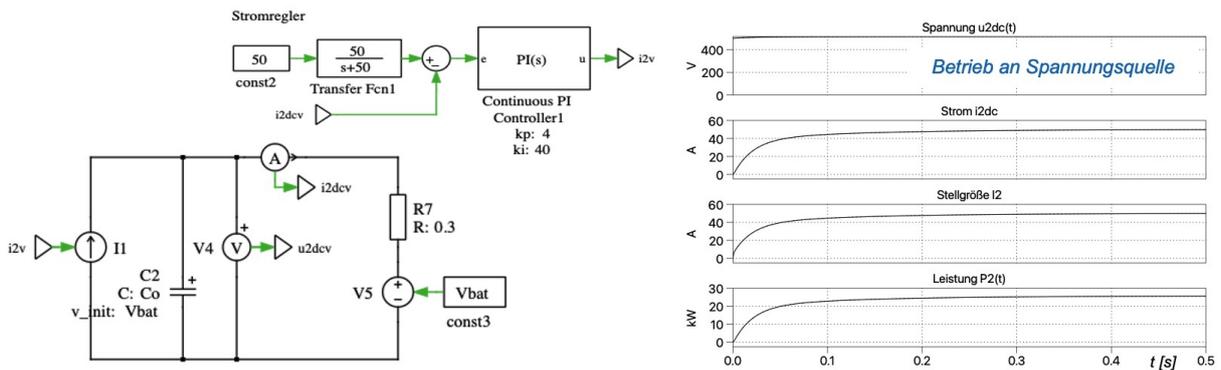


Ein Simulationslauf ergibt gleiches Verhalten wie für das Modell mit AC-Kreis (siehe Frage 1.2). Die jeweils benötigte Leistung wird der Primärseite entnommen, bzw. in die Primärseite eingespeist.



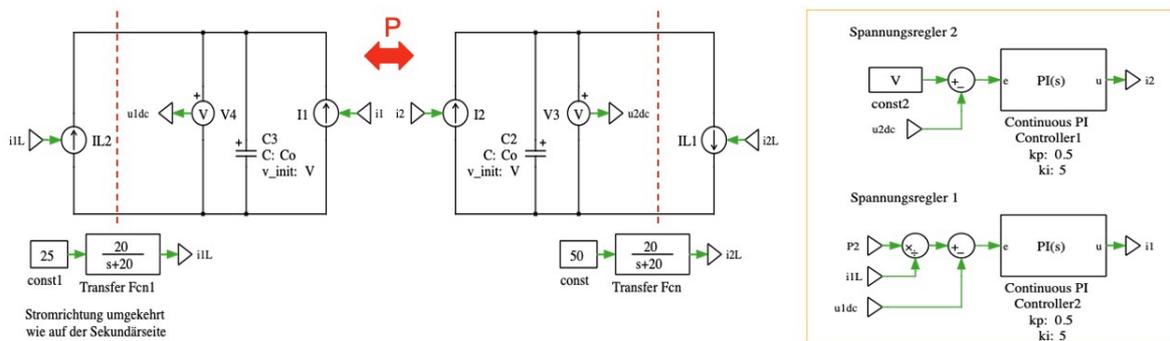
Frage 1.4.3: Betrieb an einer Spannungsquelle. Die Schaltung wird primärseitig an einer Spannungsquelle $u_1(t) = u_{01}$ mit Innenwiderstand R_1 betrieben, sekundärseitig an einer weiteren Spannungsquelle $u_2(t) = u_{02}$ mit Innenwiderstand R_2 . Welches Regelungskonzept wird benötigt? Reduzieren Sie die Schaltung auf die Sekundärseite.

Lösung: Beim sekundärseitigen Betrieb an einer Spannungsquelle (z.B. beim Laden einer Fahrzeugbatterie) wird ein Stromregler benötigt. Die Schaltung entspricht der aus Aufgabe 1.3, wobei der AC-Kreis entfällt. Folgende Abbildung zeigt einen Simulationslauf.



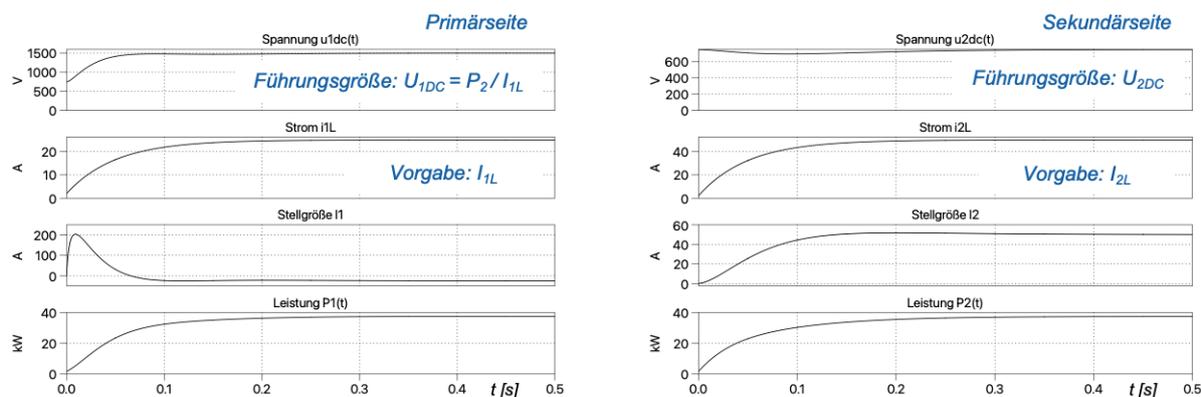
Frage 1.4.4: Betrieb an zwei Stromquellen. Die Schaltung soll zwischen zwei Stromquellen betrieben werden. Welche Regelung wird benötigt? Untersuchen Sie die Schaltung in der Simulation.

Lösung: Störgrößen im Sinne der Regelung sind nun die Ströme I_{L1} und I_{L2} auf der Primärseite und Sekundärseite. Die Spannung auf einer Seite kann vorgegeben werden, die Spannung auf der anderen Seite folgt dem Gleichgewicht der Leistung $P_1 = P_2$.



Bei der in der Abbildung oben dargestellten Anordnung wurde die Richtung der Ströme an den primären und sekundären Klemmen in umgekehrter Richtung zu einander gewählt: Während auf einer Seite

eingespeist wird, wird auf der anderen Seite Leistung entnommen. Auf diese Weise bleiben im Leistungsgleichgewicht die Vorzeichen der Ströme jeweils gleich. Im Modell wurde die Spannung auf der Sekundärseite als Führungsgröße fest vorgegeben.



Die Führungsgröße der Spannung auf der Primärseite muss aus der sekundären Leistung P_2 errechnet werden: $U_{1DC} = P_2 / I_{L1}$. Im Beispiel ist der sekundäre Strom I_{L2} doppelt so groß wie der primäre Strom I_{L1} . Folglich wächst die Spannung U_{1DC} auf der Primärseite auf den doppelten Wert der Sekundärspannung U_{2DC} . Die Leistungen sind jeweils gleich.

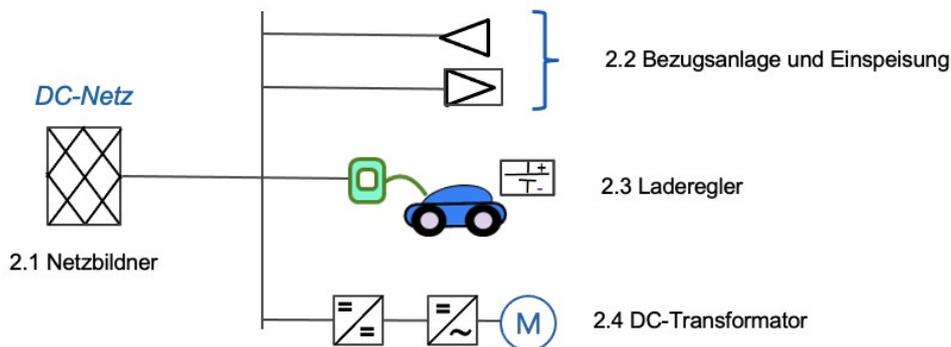
Bemerkung: Der besseren Lesbarkeit halber wurde im Beispiel die Stromrichtung I_{L1} auf der Primärseite umgekehrt zur Stromrichtung I_{L2} auf der Sekundärseite gewählt. Wegen der umgekehrt gewählten Stromrichtungen muss das Vorzeichen der Leistung umgekehrt interpretiert werden: Auf der Sekundärseite bedeutet $P > 0$ Leistungsentnahme, auf der Primärseite bedeutet $P > 0$ Einspeisung). Für die Funktion der Schaltung ist die Wahl der Zählpfeile unerheblich.

Bemerkung: Die Höhe einer der beiden Spannungen kann in dieser Betriebsweise nicht fest vorgegeben werden, da eine der Spannungen der Leistung und dem Strom folgt. Netze sind in der Regel spannungsgeführt mit fest vorgegebenen Spannungswerten. Daher ist dieser Betrieb in der Praxis nicht relevant.

2. Betriebsarten

Die für den Betrieb wesentliche Eigenschaft der Wandler ist die Strombegrenzung: Auch im vereinfachten Modell behält der Wandler die Charakteristik einer Stromquelle. Je nach gewünschter Betriebsart kann die Stromquelle mit Hilfe der Kapazität am Eingang bzw. am Ausgang des Wandlers als Spannungsquelle geregelt werden.

Unabhängig von der Betriebsart bestimmen die physikalischen Eigenschaften der Schaltung das Verhalten im Kurzschluss: ein Wandler mit Stromquellencharakteristik liefert im Kurzschlussfall den Bemessungsstrom (= Kurzschlussstrom) der Stromquelle. Folgende Abbildung zeigt eine Übersicht über die Betriebsarten.



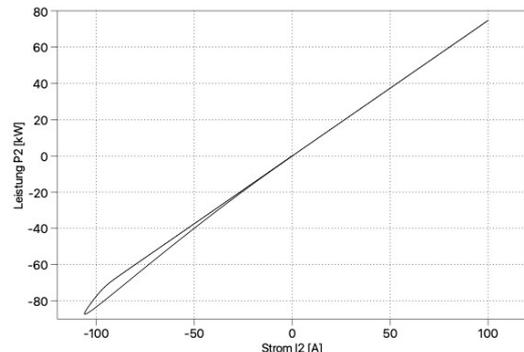
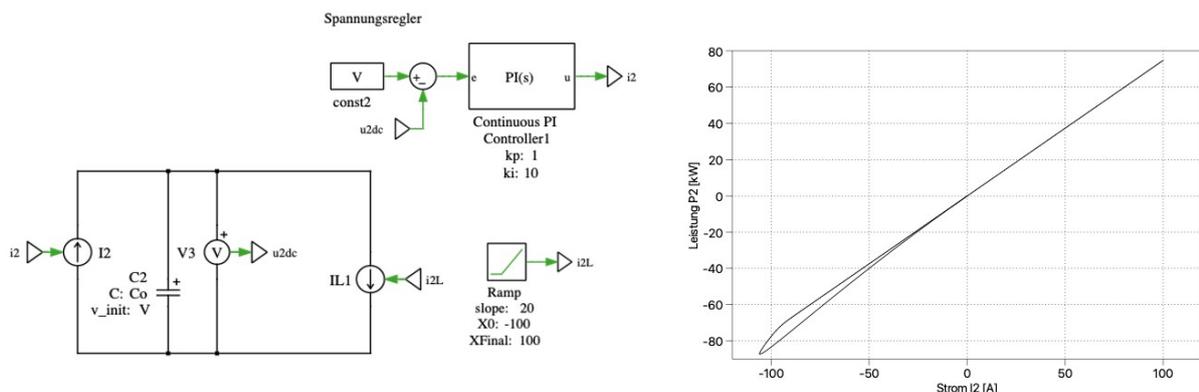
Netzbildner stellen die Spannung bereit und werden als Spannungsquelle am Netz abgebildet. Bezugsanlagen und Erzeugungsanlagen sind stromgeführt und werden als Stromquellen abgebildet. Laderegler sind stromgeführt und besitzen einen zweiten Anschluss für eine Batterie. DC-Transformatoren funktionieren wie AC-Transformatoren und bilden die Regelcharakteristik der angeschlossenen Anlage ab (in der Abbildung ein Maschinenumrichter).

2.1. DC-Netzbildner

Im Betrieb als Netzbildner repräsentiert die Schaltung eine Spannungsquelle: sie hält die Spannung stabil, stellt Leistung bereit oder nimmt Leistung auf. Führungsgröße der Regelung ist somit die Spannung über der Kapazität auf der Sekundärseite, Stellgröße bleibt der Strom der Schaltung. Als Störgröße wird eine Stromquelle verwendet.

Frage 2.1.1: Bereitstellung von Leistung. Bauen Sie die Schaltung auf und untersuchen Sie die Funktion über einem Bereich des Ausgangsstroms.

Lösungsbeispiel: Zur Spannungsregelung genügt ein einfacher Füllstandsregler mit dem Wandlerstrom $i_2(t)$ als Stellgröße.



Wenn man den Laststrom variiert (hier über einen Bereich von -100 A bis 100 A) folgt der Wandlerstrom, wobei der Sollwert der Spannung gehalten wird.

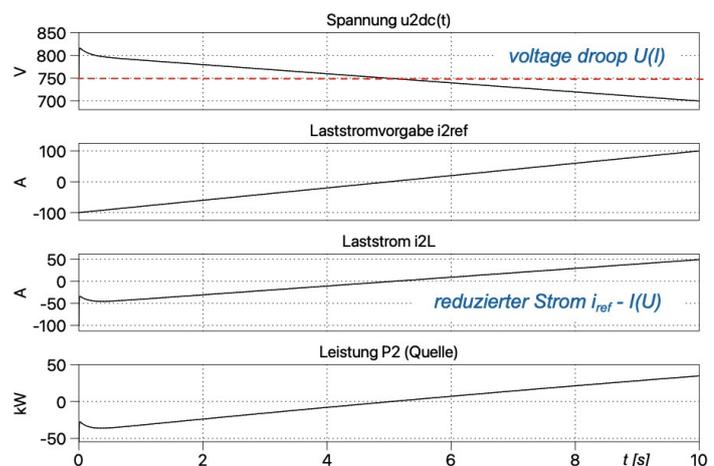
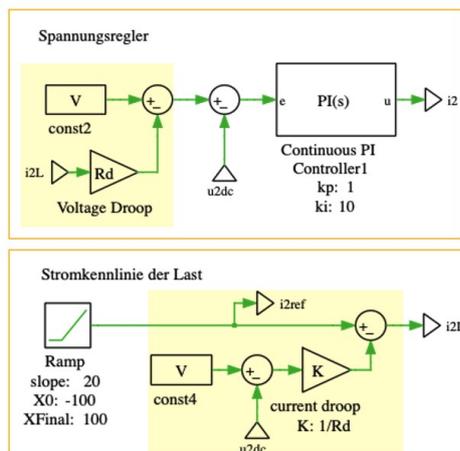
Frage 2.1.2: Strombegrenzung. Die Schaltung hat einen begrenzten Strom. Wie ist diese mit der Betriebsart Netzbildner vereinbar?

Lösung: Der Netzbildner muss über ausreichend Leistung verfügen, um die angeschlossenen Anlagen zu versorgen. Unter dieser Voraussetzung müssen die Anlagen ihren Leistungsbezug drosseln, wenn der Netzbildner an seine Grenzen kommt.

An einer Spannungsquelle mit Innenwiderstand sinkt die Spannung mit steigendem Leistungsbezug. Die Spannung des Netzbildners kann somit zur Kommunikation des Lastzustandes verwendet werden: Sinkt die Spannung zu weit, drosseln Anlagen ihre Bezugsleistung. Umgekehrt drosseln Anlagen ihre Einspeiseleistung, wenn die Spannung zu hoch wird.

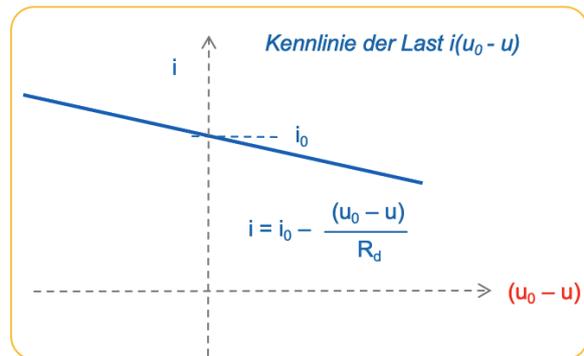
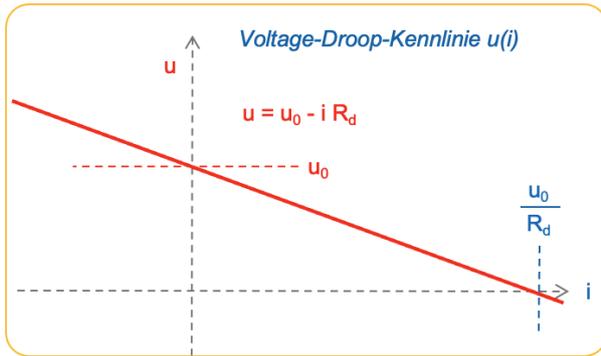
Somit sind folgende Regeln für den Betrieb zu implementieren: (1) Ein virtueller Innenwiderstand für den Netzbildner, so dass die Spannung sich mit dem Lastzustand verändert: $U(P)$ bzw. $U(I)$. (2) Eine Regelung des Leistungsbezugs der angeschlossenen Anlagen abhängig von der Spannung: $P(U)$ bzw. $I(U)$. Da die Spannung annähernd konstant bleiben soll, lässt sich als Leistungsindikator der Strom verwenden.

Für den virtuellen Innenwiderstand R_d des Netzbildners gilt: $u_{2DC} = u_0 - R_d \cdot i_{2L}$. Dieser Wert wird als Sollwert des Spannungsreglers vorgegeben. Die Spannung des Netzbildners sinkt somit mit steigendem Laststrom, bzw. steigt mit dem Laststrom bei Einspeisung.



Die Spannung lässt sich nun als Indikator für die Verringerung des Stroms der Last verwenden: $i_{2L}(i) = i_{ref} - (u_0 - u) / R_d$. Sinkt die Spannung unter dem Nennwert, wird der Laststrom reduziert. Für die Einspeisung gilt die gleiche Regel mit umgekehrten Vorzeichen (hier liegt die Spannung über dem Nennwert und der Strom besitzt die umgekehrte Richtung).

Der Simulationslauf zeigt, dass (1) die Kommunikation des Lastzustandes über die Spannung und (2) die Begrenzung des Stromes abhängig von der Spannung wie erwartet funktionieren. In diesem einfachen Beispiel wurde jeweils der gleiche virtuellen Widerstandes R_d verwendet. Die Größe des Wertes R_d bestimmt die Steigung der Spannungskennlinie $U(I)$, sowie die der zugehörigen Kennlinie der Last.



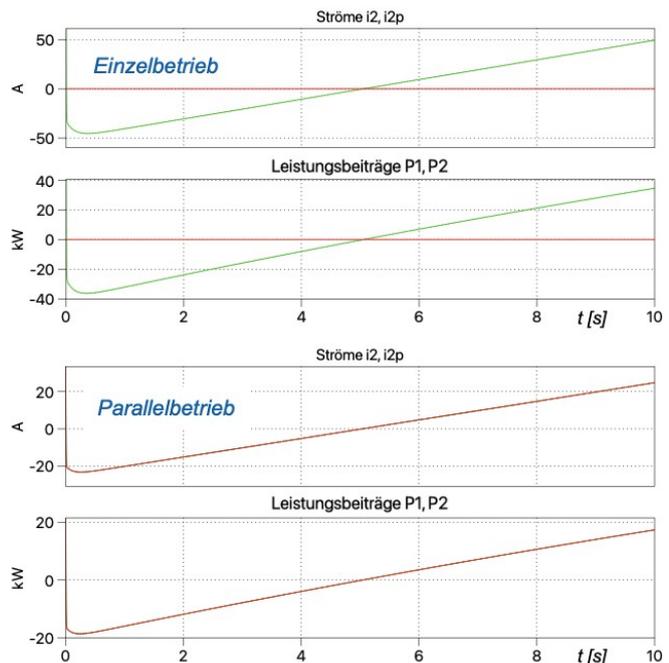
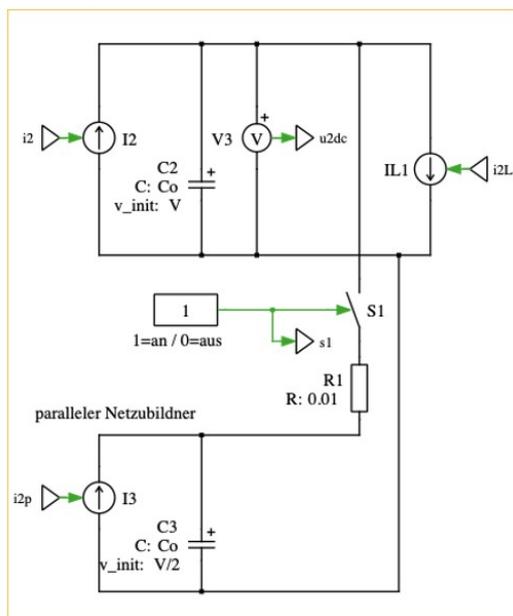
Die Spannungskennlinie $U(I)$ gibt im Leerlauf $i = 0$ die Leerlaufspannung u_0 wieder und sinkt mit wachsendem Strom (bzw. erhöht sich bei negativem Strom). Die Kennlinie der Last $i = i_0 - f(u)$ ist so gewählt, dass der Strom zu Null wird, wenn die Spannungsabweichung $(u_0 - u)$ den Wert $i_0 R_d$ erreicht.

Frage 2.1.3: Parallelbetrieb von Spannungsquellen. Die Leistung des Netzbildners soll erhöht werden, indem ein zweiter Netzbildner parallel betrieben wird. Untersuchen Sie die Schaltung in der Simulation. Hinweis: Der Parallelbetrieb beider Spannungsquellen soll so erfolgen, dass beide Spannungsquellen gleichmäßig belastet werden und Kreisströme vermieden werden.

Lösung: Da es im Parallelbetrieb nur eine Spannung gibt, arbeiten die Spannungsregler beider Anlagen gegeneinander. Schaltet man zwei physikalische Spannungsquellen parallel, so fällt die Spannungsdifferenz zwischen den Leerlaufspannungen an den Innenwiderständen ab: Kreisströme sorgen für den Ausgleich beider Spannungen.

Diese Kreisströme überlagern sich dem Laststrom aus beiden Quellen. Die Leistungsbeiträge zur Last verhalten sich umgekehrt proportional zu den Innenwiderständen der Spannungsquellen.

Für eine als Spannungsquelle geregelte Stromquelle findet somit die Anpassung der Leistungsbeiträge über den virtuellen Innenwiderstand R_d der Spannungskennlinie statt. Folgende Abbildung zeigt den Parallelbetrieb zweier identischer Netzbildner: Anlage einschließlich Regler ist die Kopie der parallel geschalteten Anlage 1.



Anlage 2 lässt sich mit einem Schaltsignal dazuschalten. Das Schaltsignal deaktiviert im Einzelbetrieb auch den Strom der Anlage 2. Der Simulationslauf zeigt im Einzelbetrieb der Anlage 1 ein unverändertes Verhalten: Anlage 1 stellt die gesamte Leistung bereit.

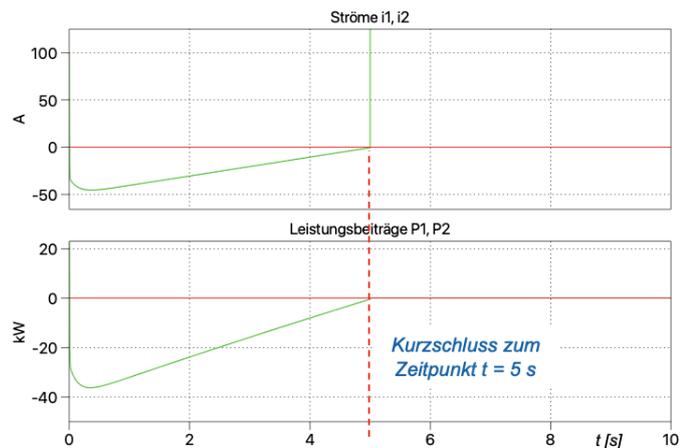
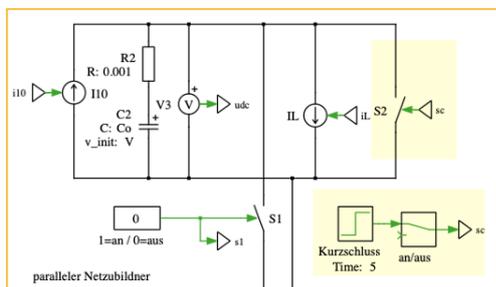
Im Parallelbetrieb teilen sich beide Anlagen den Laststrom und somit die Leistung auf. In der Abbildung unten rechts liegen Ströme und Leistung jeweils übereinander: die roten Linien der Anlage 2 überlagern Anlage 1, die Beiträge zu Strom und Leistung sind halb so groß.

Die Leistung wird somit in diesem Beispiel im Parallelbetrieb nicht größer. Grund hierfür ist, dass für die Spannungs-kennlinien beider Anlagen der Laststrom insgesamt verwendet wurde, d.h. der Spannungsabfall fällt identisch aus wie im Einzelbetrieb der Anlage 1.

Frage 2.1.4: Verhalten im Kurzschlussfall. Untersuchen Sie das Verhalten beim Kurzschluss am Ausgang der Anlage. Wie lässt sich ein Kurzschluss feststellen? Welche Möglichkeiten hat der Spannungsregler des Netzbildners, auf den Kurzschluss zu reagieren?

Lösungsbeispiel: Im Beispiel wurde mit Hilfe eines Schalters, der zu einem vorgegebenen Zeitpunkt schließt, ein Kurzschluss hergestellt. Folgende Abbildung zeigt die Anordnung zusammen mit einem Simulationslauf. Anlage 2 war im Beispiel getrennt.

Zum Zeitpunkt des Kurzschlusses fällt die Spannung auf Null: Eine Abgabe oder Aufnahme von Leistung ist nicht mehr möglich. Die Last als Stromquelle speist weiter in den Kurzschluss ein, der Laststrom bleibt somit unverändert. Der Spannungsregler von Anlage 1 treibt den Strom der Anlage hoch: In der Abbildung zeigt sich ein steiler Anstieg. Da der Spannungsregler über keine Strombegrenzung verfügt, geraten die Ströme rasch in einen unrealistischen Bereich.



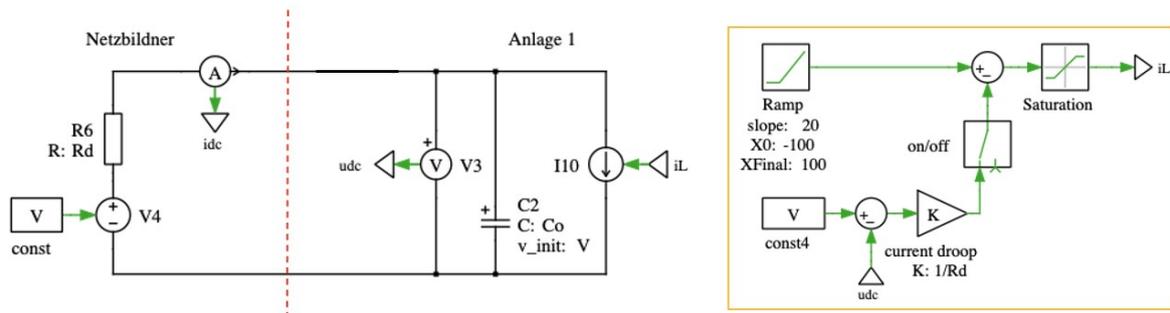
Von der Höhe der Ströme abgesehen ist ein Kurzschluss für einen Wandler mit Stromquellen-Charakteristik kein Problem: Der Anlagenstrom lässt sich durch den Spannungsregler auf den Bemessungsstrom begrenzen, bzw. nach erkanntem Fehlerfall abschalten.

Eine Möglichkeit zur Fehlererkennung ist der Spannungseinbruch. Ein weiteres Kriterium zur Fehlererkennung liefert die Kapazität am Ausgang der Anlage, die sich in den Kurzschluss entlädt. Eine schnelle Strommessung im Zweig der Kapazität in Verbindung mit dem Spannungseinbruch sollte einen zuverlässigen Indikator für einen Kurzschluss liefern.

2.2. Bezugsanlage und Einspeisung

Der Wandler soll zum Anschluss einer Bezugsanlage oder Einspeiseanlage an ein DC-Netz dienen. Das DC-Netz wird hierbei durch eine Spannungsquelle mit Innenwiderstand R_d repräsentiert. Stellvertretend für Anlage und Wandler soll die vereinfachte Schaltung bestehend aus einer Stromquelle mit der Eingangskapazität der DAB verwendet werden.

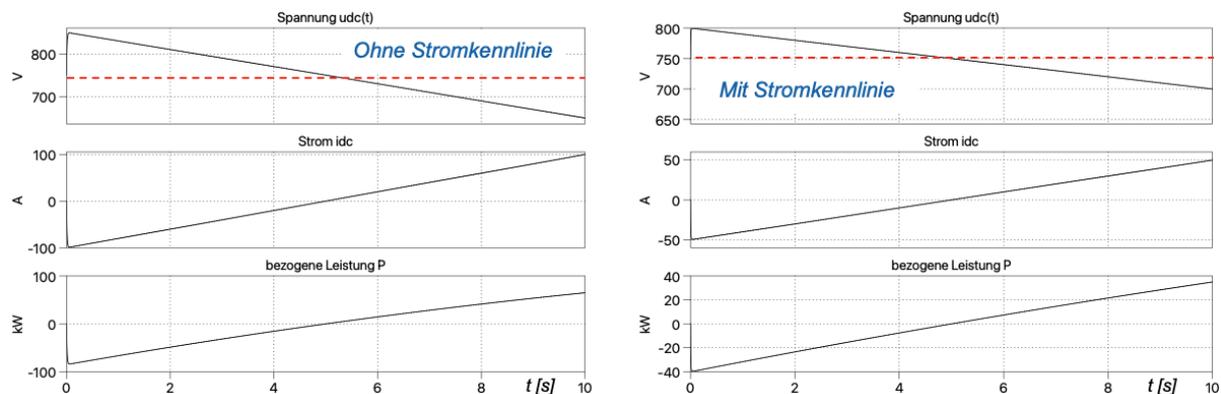
Frage 2.2.1: Funktionsprinzip. Folgende Abbildung zeigt die Anlage am Netz, zusammen mit dem Stromregler. Erläutern Sie das Funktionsprinzip. Wozu dient die spannungsabhängige Stromvorgabe?



Lösung: Die DC-Spannung wird hier durch die Spannungsquelle vorgegeben. Die Eingangskapazität wird aus dem Netz geladen und besitzt in dieser Ersatzschaltung keine besondere Funktion, da der Anlagenstrom i_L als Gleichstrom vorgegeben wird.

Die Spannungsquelle kann Ströme aufnehmen und Ströme bereitstellen. Hierbei ändert sich über den Innenwiderstand R_d der Quelle die Höhe der Spannung u_{dc} im Netz: $u_{dc} = u_0 - R_d i_{dc}$. Der Stromregler der Anlage reduziert sich auf eine Steuerung bzw. direkte Vorgabe des Stroms: Als Stromquelle sind Stellgröße und Führungsgröße identisch. Im Beispiel wird der Strom über einen Bereich von $i_0 = -100$ A bis 100 A vorgegeben.

Hierbei wird die Stromvorgabe abhängig von der gemessenen Spannung u_{dc} reduziert: $i_L = i_0 - (u_0 - u_{dc})/R_d$. Diese Stromkennlinie lässt sich wahlweise abschalten oder aktivieren. Ein Simulationslauf zeigt folgende Ergebnisse:

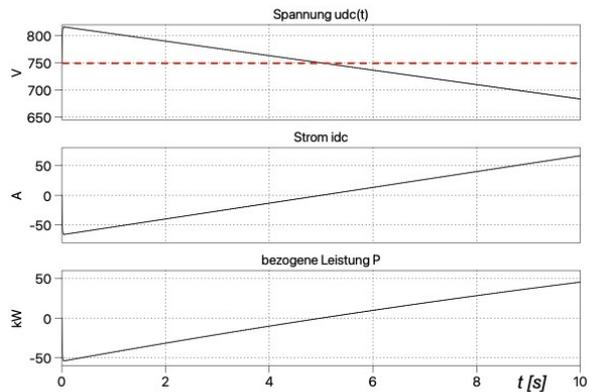
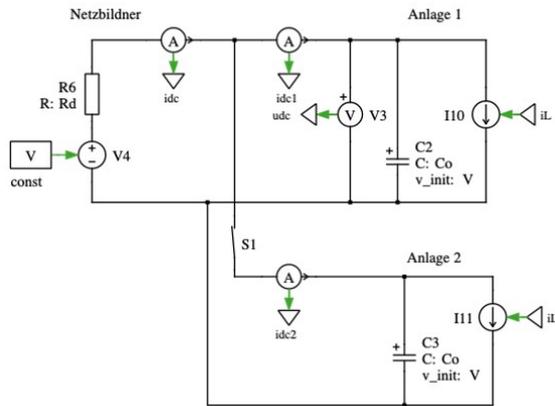


Ohne die Stromkennlinie gilt $i_L = i_0$, der gesamte Wertebereich wird durchlaufen. Im Bereich der Einspeisung erhöht sich hierdurch die Spannung u_{dc} . Im Bereich des Leistungsbezugs sinkt die Spannung u_{dc} im Netz. Einspeisung und Leistungsbezug folgen dem Produkt von Strom und Spannung, und somit dem Stromverlauf.

Mit aktivierter Stromkennlinie $i_L = i_0 - (u_0 - u_{dc})/R_d$ wird der Anlagenstrom der Spannung u_{dc} angepasst: Eine erhöhte Spannung $u_{dc} > u_0$ signalisiert ein Überangebot an Leistung. In diesem Fall wird der Betrag des Einspeisestromes und somit die Einspeiseleistung reduziert. Eine zu niedrige Spannung $u_{dc} < u_0$ signalisiert einen Leistungsbezug. In diesem Fall wird der bezogene Strom und somit die Bezugsleistung abhängig von der Abweichung $(u_0 - u_{dc})$ reduziert.

Frage 2.2.2: Parallelbetrieb von Anlagen. Erweitern Sie das Modell um eine weitere Anlage. Da die Parallelschaltung von Stromquellen keine besonderen Anforderungen stellt, kann der gleiche Stromregler verwendet werden. Untersuchen Sie das Verhalten der Anlagen in der Simulation.

Lösung: Bei der Parallelschaltung der Anlagen addieren sie die beiden Anlagenströme i_{dc1} und i_{dc2} zum gesamten Strom i_{dc} . Die Summe beider Ströme führt zu einem Spannungsabfall am Innenwiderstand der Spannungsquelle (= Netzbildner).



Die Parallelschaltung erweist sich als unproblematisch: Das Netz lässt sich ohne Probleme um weitere Anlagen erweitern. Im Beispiel wurden beide Anlagen mit dem gleichen Stromregler geregelt. Da die für die Stromkennlinie verwendete Spannung u_{dc} für alle Anlagen gilt, ergeben sich hierdurch keine Einschränkungen.

Allerdings verdoppelt sich beim Parallelbetrieb beider Anlagen mit aktivierter Stromkennlinie der Strom und somit die bezogene Leistung nicht: Die Leistung wächst von ca. 35 kW für eine einzelne Anlage auf ca. 50 kW für zwei parallele Anlagen. Grund hierfür sind die identischen Spannungskennlinien beider Anlagen mit dem Innenwiderstand R_d . Diese Kennlinien sorgen dafür, dass der Netzbildner durch die Anlagen nicht überfordert wird.

Frage 2.2.3: Kennlinien für den Parallelbetrieb. Erläutern Sie die Unterschiede im Leistungsbezug beim Einzelbetrieb und Parallelbetrieb der Anlagen abhängig von den Kennlinien der Anlagen.

Lösung: Für die Kennlinien und den Parallelbetrieb erhält man folgende Gleichungen:

$$u = u_0 - R_d \cdot i \quad \text{Netzbildner} \quad (1)$$

$$i = i_1 + i_2 \quad \text{Parallelbetrieb} \quad (2)$$

$$i_1 = i_0 - \frac{(u_0 - u)}{R_d} \quad \text{Anlage 1} \quad (3)$$

$$i_2 = i_0 - \frac{(u_0 - u)}{R_d} \quad \text{Anlage 2} \quad (4)$$

Im Betrieb mit einer Anlage ($i_2 = 0$) erhält man durch Einsetzen hieraus für die Spannung $u = u_0 - R_d/2 i_0$. Mit einem Strom $i_0 = 100 \text{ A}$ und $R_d = 1 \text{ } \Omega$ stellt sich eine Spannung von ca. 700 V ein. Im Betrieb mit beiden Anlagen reduziert sich die Spannung auf $u = u_0 - 2 R_d/3 i_0$. Mit einem Strom $i_0 = 100 \text{ A}$ und $R_d = 1 \text{ } \Omega$ stellt sich eine Spannung von ca. 680 V ein.

In der Praxis wäre der Netzbildner für den Parallelbetrieb einer maximalen Anzahl Anlagen auszulegen und die Kennlinien entsprechend vorzugeben. Können einzelne Anlagen bei schwacher Last im Netz mehr Leistung bereitstellen oder aufnehmen, wären deren Kennlinien dynamisch anzupassen.

Frage 2.2.4: Kurzschlussverhalten. Wie verhalten sich die Anlagen bei einem Kurzschluss im Netz?

Lösung: Die Anlagen stellen Stromquellen mit Strombegrenzung dar (letztere findet sich im Stromregler der Anlagen). Daher sind Kurzschlüsse am Anschlusspunkt der Anlagen bzw. im DC-Netz für die Anlagen kein Problem: Es fließt der Bemessungsstrom und es entladen sich die Eingangskapazitäten der Anlagen in den Kurzschluss.

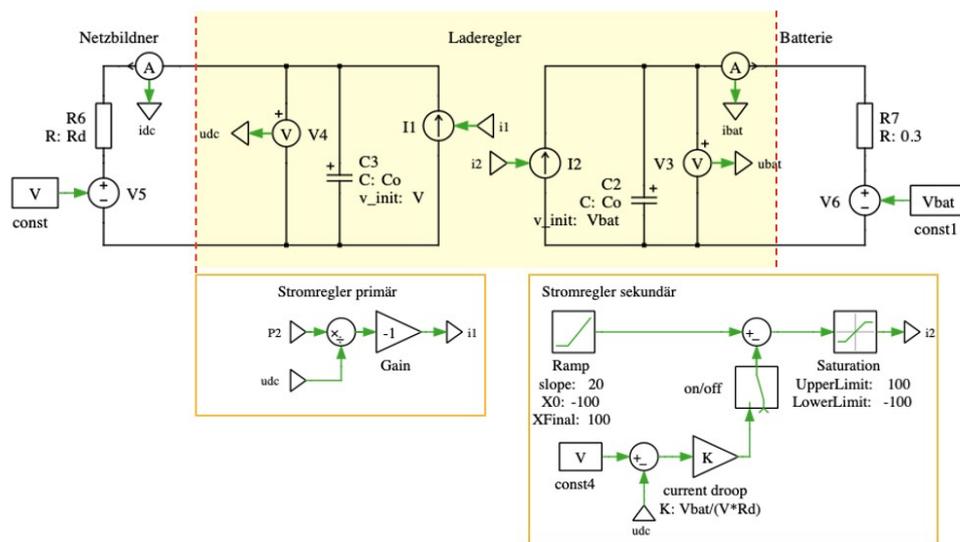
Allerdings ist im Kurzschlussfall die gesamte Anlage spannungslos und somit ein sinnvoller Betrieb nicht möglich. Der fehlerhafte Teil (z.B. ein defekter Abgang im Netz) muss selektiv vom Netz getrennt werden, damit der Betrieb wieder aufgenommen werden kann. Zur Identifikation des defekten Abschnitts liefert der Strom als Kurzschlussstrom kein hinreichendes Kriterium, da die Kurzschlussströme der Anlagen nicht höher als die Bemessungsströme ausfallen. Allerdings kann der Netzbildner in einzelnen Abgängen Kurzschlussströme bereitstellen, die über die Bemessungsströme der Abgänge bzw. der Anlagen hinausgehen. Für Einspeiseanlagen ist hierbei auch die Stromrichtung ein Kriterium.

Fehlerindikatoren in den Anlagen liefern die Spannung am Anschlusspunkt und die Entladeströme der Eingangskapazitäten. Die Anlagen lassen sich hiermit deaktivieren. Allerdings bleibt eine kurzgeschlossene Leitung als Fehler erhalten. Vor Wiederaufnahme des Betriebs muss der fehlerhafte Abgang vom Netz getrennt werden.

2.3. Laderegler für Batteriespeicher

Als Laderegler für Batteriespeicher (z.B. eine Fahrzeugbatterie) befindet sich der Wandler zwischen dem DC-Netz und dem Batteriespeicher. Es wird also ein Modell mit beiden Anschlussklemmen benötigt. Folgende Abbildung zeigt die Anordnung mit dem vereinfachten Modell der DAB. Hier wurde auf den AC-Kreis verzichtet; die DC-Kreise sind direkt über die übertragene Leistung gekoppelt.

Die der Batterie zugeführte Leistung P_2 muss dem DC-Netz entnommen werden: es gilt $P_1 = P_2$. Die Abbildung zeigt die elektrische Ersatzschaltung zusammen mit den Stromreglern.



DC-Netz und Fahrzeugbatterie sind hierbei als Spannungsquellen abgebildet. Alle Messungen finden an den Anschlussklemmen des Ladereglers statt: u_{dc} und i_{dc} auf der Primärseite, sowie u_{bat} und i_{bat} auf der Sekundärseite.

Frage 2.3.1: Erläutern Sie die Funktionsweise der Schaltung. Welches ist die Führungsgröße? Welche Größe wird nachgeführt? Welchen Einfluss auf die Ströme hat die Kopplung der Leistung?

Lösung: Führungsgröße ist der Ladestrom i_{bat} der Batterie, der durch den Strom i_2 des Wandlers auf der Sekundärseite gestellt wird. Die Spannung u_{bat} auf der Sekundärseite wird durch die Batterie vorgegeben. Die Kapazität C bleibt im vereinfachten Modell ohne Einfluss: die Stellgröße i_2 entspricht der

der Führungsgröße i_{bat} . Im vereinfachten Modell genügt daher eine einfache Steuerung des Ladestromes. Im Beispiel wird der Ladestrom mit Hilfe einer Rampe im Bereich $i_{bat} = -100 \text{ A}$ bis 100 A variiert.

Der Ladestrom i_{bat} beeinflusst über den Innenwiderstand der Batterie die Spannung u_{bat} . Aus dem Produkt von u_{bat} mit i_{bat} wird die Leistung P_2 berechnet. Diese Leistung muss dem Primärkreis entnommen bzw. zugeführt werden.

Der Stromregler für den Primärkreis verwendet als Vorgabe die im Sekundärkreis gemessene Leistung P_2 . Division durch die Spannung u_{dc} im Primärkreis liefert den gewünschten Strom. Mit den gewählten Stromrichtungen des Wandlers muss die Vorgabe für den Strom invertiert werden: aufgenommene Leistung muss abgegeben werden und umgekehrt. Auch im Primärkreis sind im vereinfachten Modell Stellgröße und Führungsgröße identisch: Zur Führung des Stroms genügt eine Steuerung.

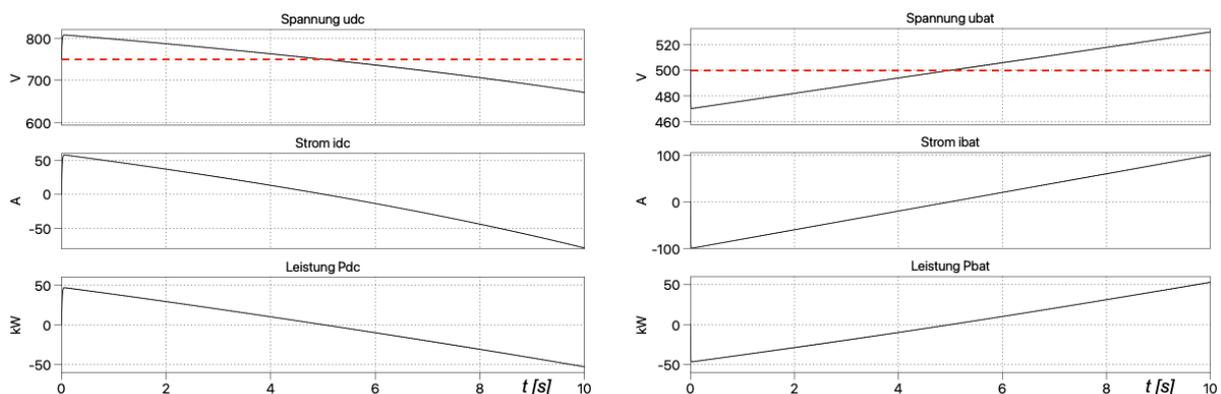
Der Strom i_{dc} im Primärkreis hat über den Innenwiderstand des Netzbildners einen Einfluss auf die Spannung u_{dc} . Wegen der jeweils umgekehrten Stromrichtungen ist der Einfluss umgekehrt wie im Sekundärkreis: Ein Laden der Batterie erhöht die Spannung im Sekundärkreis und senkt die Spannung im Primärkreis. Das Entladen der Batterie hat den umgekehrten Effekt.

Frage 2.3.2: Simulation ohne Kennlinie. Untersuchen Sie die Funktion der Schaltung in der Simulation. Verzichten Sie hierbei auf eine Kennlinie für den Ladestrom.

Lösungsbeispiel: siehe folgende Abbildung.

Die Schaltung zeigt das erwartete Verhalten. Im Bereich negativer Ladeströme i_{bat} wird der Fahrzeugbatterie Leistung entnommen: Die Spannung u_{bat} sinkt. Dem Primärkreis wird die entnommene Leistung zugeführt: Die Spannung u_{dc} steigt an. Im Nulldurchgang $i_{bat} = 0$ werden die Nennspannungen erreicht.

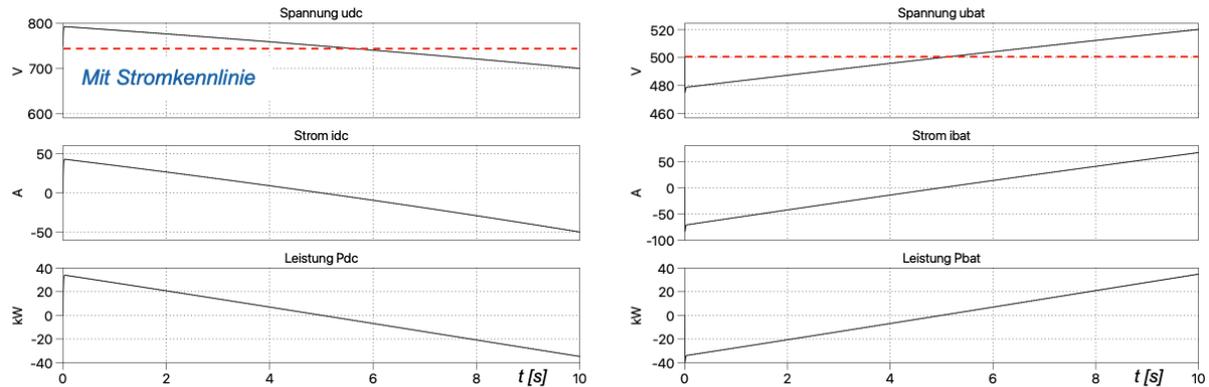
Während des Ladens der Batterie kehren sich wegen des nun positiven Ladestroms i_{bat} die Verhältnisse um. Im Beispiel beträgt die Nennspannung im Primärkreis 750 V , die Nennspannung der Batterie 500 V . Während die Leistungen (bis auf das Vorzeichen) identisch sind, sind die Ströme somit unterschiedlich.



Wegen der Leistungsbilanz $P_1 = P_2$ gilt $u_{dc} \cdot i_{dc} = u_{bat} \cdot i_{bat}$. Für Spannungen und Ströme ergibt sich somit das Übersetzungsverhältnis $\bar{u} = u_{bat} / u_{dc} = i_{dc} / i_{bat}$. Wegen der Kopplung über die Leistung fallen im Primärkreis bei sinkender Spannung u_{dc} der Strom i_{dc} größer aus als bei einem linear Verlauf.

Frage 2.3.3: Simulation mit Kennlinie. Ergänzen Sie das Modell um eine Stromkennlinie vergleichbar mit Aufgabe 2.2. Hinweis: Die Kennlinie muss auf der Sekundärseite wirken, jedoch die Eigenschaften der Primärseite berücksichtigen.

Lösung: Wenn man das Übersetzungsverhältnis \bar{u} für den Strom berücksichtigt, lässt sich die Kennlinie aus Aufgabe 2.2 übernehmen. Folgende Abbildung zeigt einen Simulationslauf.



Mit Hilfe der Stromkennlinie wird der Ladestrom i_{bat} reduziert und somit die Ladeleistung. Daher fällt auch die Belastung der Primärseite geringer aus. Die Kennlinie berechnet sich nach Aufgabe 2.2 aus

$$i_2 = i_0 - \ddot{u} \cdot \frac{(u_0 - u)}{R_d}$$

Im Beispiel wurden für das Übersetzungsverhältnis \ddot{u} die Leerlaufspannungen u_{0dc} und u_{0bat} verwendet: $\ddot{u} = u_{0bat}/u_{0dc}$. Mit den gegebenen Werten wird der Batteriestrom hierdurch nach unten korrigiert.

Frage 2.3.4: Kurzschlussverhalten. Welchen Einfluss haben primärseitige oder sekundärseitige Kurzschlüsse auf den Wandler?

Lösung: Keine. Als Stromquelle mit Stromregelung sind die Wandler kurzschlussfest. Die Sekundärseite ist außerdem von der Primärseite galvanisch getrennt: Fehler pflanzen sich nicht von einer auf die andere Seite fort.

Für den Batteriespeicher sind Kurzschlüsse allerdings höchst kritisch: Im Falle einer Fahrzeugbatterie ist die Sekundärseite des Wandlers unmittelbar mit der Batterie verbunden. Sekundärseitige Kurzschlüsse führen zu einer spontanen Entladung der Batterie, die nur durch eine Sicherung im Fahrzeug verhindert werden kann. Idealerweise ist der Laderegler direkt im Fahrzeug verbaut, so dass kein direkter Zugang zur Batterie möglich ist.

Der Netzbildner auf der Primärseite sollte trotz seiner Ersatzschaltung als Spannungsquelle mit Innenwiderstand keine Batterie darstellen, sondern eine spannungsgeregelte Stromquelle mit Strombegrenzung. Dies wäre der Fall bei dem in Aufgabe 2.1 beschriebenen Netzbildner. Physikalisch kommt für ein solches System ein Batteriesystem mit einer DAB als Spannungsregler in Frage, oder ein ans AC-Netz angeschlossener Konverter mit Stromquellen-Charakteristik und Strombegrenzung (z.B. AC/DC-Wandler mit DC-Steller, bzw. leistungselektronische Transformatoren).

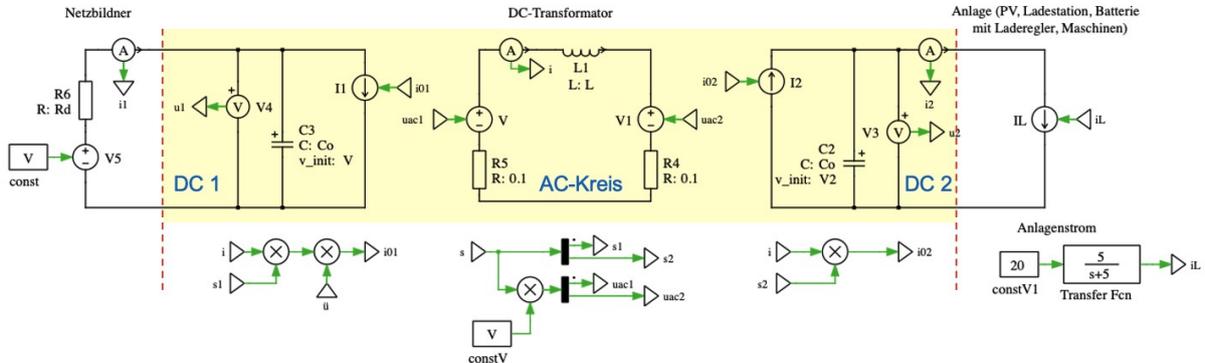
2.4. DC-Transformator

Im AC-Netz werden passive Transformatoren verwendet, um z.B. einen Kraftwerksgenerator an das Übertragungsnetz anzubinden, bzw. eine Last oder eine Einspeisung an eine höhere Spannungsebene. Ortsnetztransformatoren beispielsweise verbinden Verbraucher und Erzeuger aus dem Niederspannungsnetz mit der Mittelspannung.

DC-Netze mit mehreren Spannungsebenen sind noch wenig verbreitet. Allerdings besteht bei DC-Netzen in der Niederspannung unter Umständen die Notwendigkeit, Einspeiseanlagen oder Bezuganlagen an die Spannung des DC-Netzes anzupassen. Diese Anpassung kann durch Hochsetzsteller bzw. Tiefsetzsteller erfolgen. In diesem Abschnitt soll zu diesem Zweck ein DAB-Wandler im Transformatorbetrieb verwendet werden.

Als Anlagen kommen PV-Anlagen, Ladestationen, Energiespeicher mit Laderegler, bzw. Maschinen mit Frequenzumrichter in Frage. In letzterem Fall wird der maschinenseitige Umrichter mit dem Regler der Maschine direkt an das DC-Netz angeschlossen.

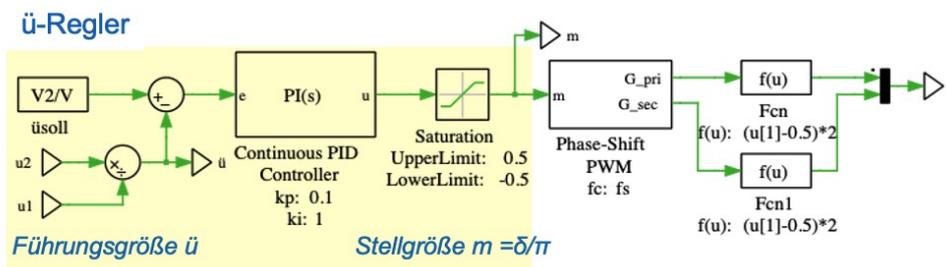
Frage 2.4.1: Funktionsweise. Folgende Abbildung zeigt das Modell. Erläutern Sie die Funktionsweise.



Lösung: Es wird das vollständige Mittelwertmodell des DAB-Wandlers verwendet. Stellgröße ist hierbei der Modulationsgrad $m = \delta/\pi$ des AC-Kreises (d.h. die Phasenverschiebung beider Spannungsquellen). Primärseitig ist der Wandler an den Netzbildner angeschlossen, sekundärseitig an eine stromgeführte Anlage.

Die Ströme im Primärkreis und Sekundärkreis gehen aus dem Strom im AC-Kreis hervor. Im Modell wurde außerdem der primärseitige Strom um das Übersetzungsverhältnis \bar{u} korrigiert. Diese Korrektur berücksichtigt den Einsatz eines Transformators im AC-Kreis, bzw. die Regelung des Übersetzungsverhältnisses \bar{u} . Es gilt $\bar{u} = u_2 / u_1 = i_1 / i_2$.

Frage 2.4.2: Regelungskonzept. Folgende Abbildung zeigt den Aufbau des Reglers. Stellgröße des Reglers ist der Modulationsgrad der DAB, Führungsgröße das Übersetzungsverhältnis. Erläutern Sie die Funktionsweise und untersuchen Sie die Schaltung in der Simulation. Worin besteht der größte Unterschied zu einem spannungsgeführten bzw. stromgeführten Wandler? Welche Auswirkungen ergeben sich auf den Regler der angeschlossenen Anlage?

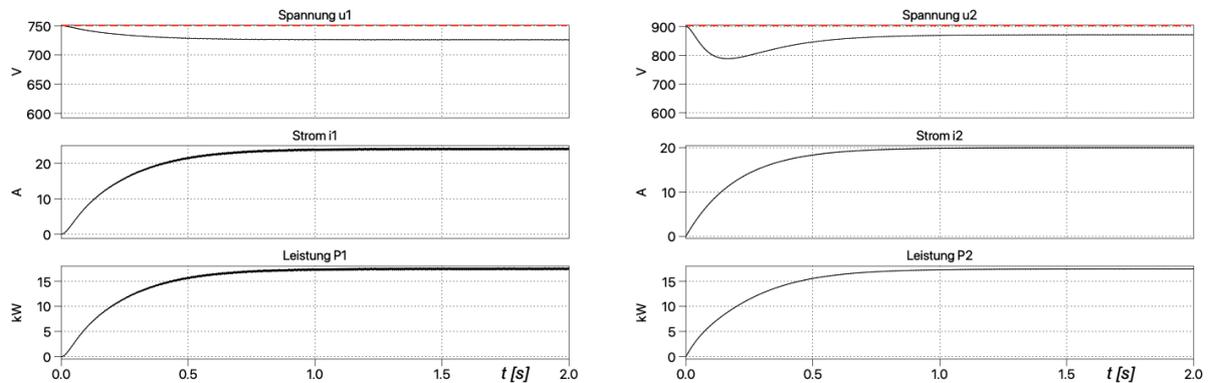


Lösung: Der Sollwert des Übersetzungsverhältnisses \bar{u} wird aus den Sollwerten der primärseitigen und sekundärseitigen Spannungen festgelegt: $\bar{u}_{\text{soll}} = u_{02} / u_{01}$. Der Istwert wird aus den gemessenen primärseitigen und sekundärseitigen Spannungen berechnet: $\bar{u} = u_2 / u_1$. Grundsätzlich kann das Übersetzungsverhältnis aus den Strömen berechnet werden, oder aus den Spannungen. Hier wurden die Spannungen verwendet, da diese die schaltungsbedingt die stabileren Werte liefern.

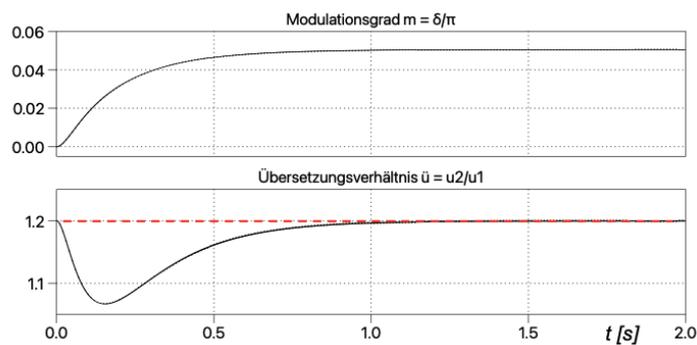
Der Istwert von \bar{u} wird zur Korrektur des primärseitigen Stromes verwendet (siehe Frage 2.4.1 und die Abbildung dort). Aus der Abweichung von Sollwert und Istwert führt der Regler den Modulationsgrad m als Stellgröße: Die Phase im AC-Kreis wird so verschoben, dass sich das gewünschte Übersetzungsverhältnis \bar{u} einstellt.

Hierdurch ist der Wandler weder spannungsgeführt noch stromgeführt. Die Regelung wirkt gleichzeitig auf die Primärseite und die Sekundärseite. In der gegebenen Anordnung zwischen Netzbildner und

stromgeführter Anlage wäre die konventionelle Methode der Regelung die Führung der sekundärseitigen Spannung. Folgender Simulationslauf zeigt, dass tatsächlich nur das Übersetzungsverhältnis geregelt wird, nicht die Spannung.

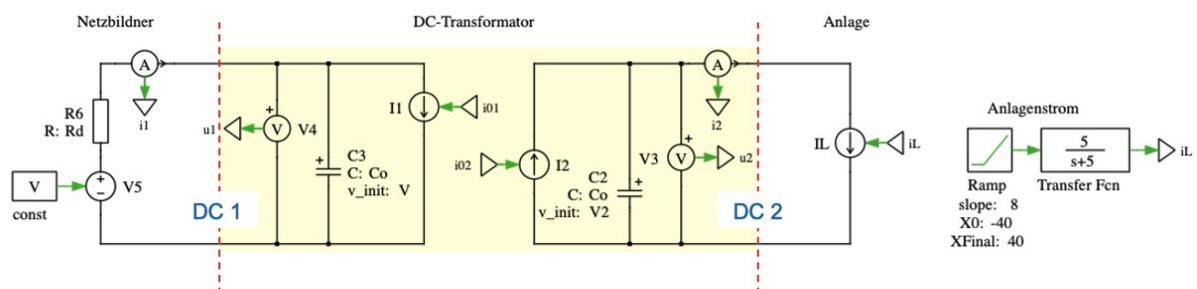


Auf diese Weise bildet die Regelung die primärseitige Spannung auf die Sekundärseite ab: Der Spannungseinbruch bei Last setzt sich auf der Sekundärseite fort. Die Schaltung verhält sich somit wie ein AC-Transformator sich in einem AC-Netz verhalten würde. Folgende Abbildung zeigt den Verlauf der Stellgröße m und der Führungsgröße \ddot{u} .



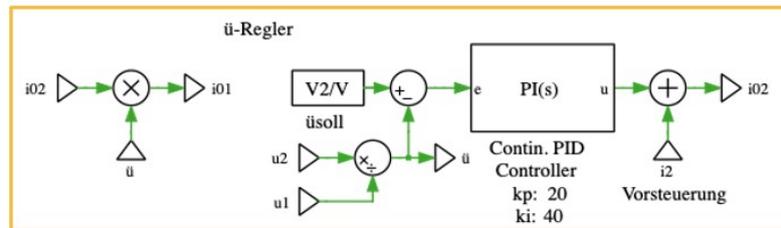
Im Beispiel war die Leerlaufspannung primärseitig auf 750 V festgelegt. Aus einer Sekundärspannung von 900 V folgt das Übersetzungsverhältnis $\ddot{u}_{\text{sol}} = 1,2$. Die Sekundärspannung dient hierbei nur als Hilfsgröße zur Ermittlung des Sollwertes \ddot{u}_{sol} . Geregelt wird nur das Übersetzungsverhältnis, nicht die Spannung.

Frage 2.4.3: Vereinfachte Ersatzschaltung. Im vollständigen Mittelwertmodell des DAB-Wandlers ist die Stellgröße der Modulationsgrad m , Führungsgröße das Übersetzungsverhältnis \ddot{u} . In der vereinfachten Ersatzschaltung fehlt der AC-Kreis mit der Möglichkeit zur Modulation. Folgende Abbildung zeigt die vereinfachte Ersatzschaltung. Wie könnte eine \ddot{u} -Regelung mit dem vereinfachten Modell realisiert werden? Untersuchen Sie die Schaltung in der Simulation.

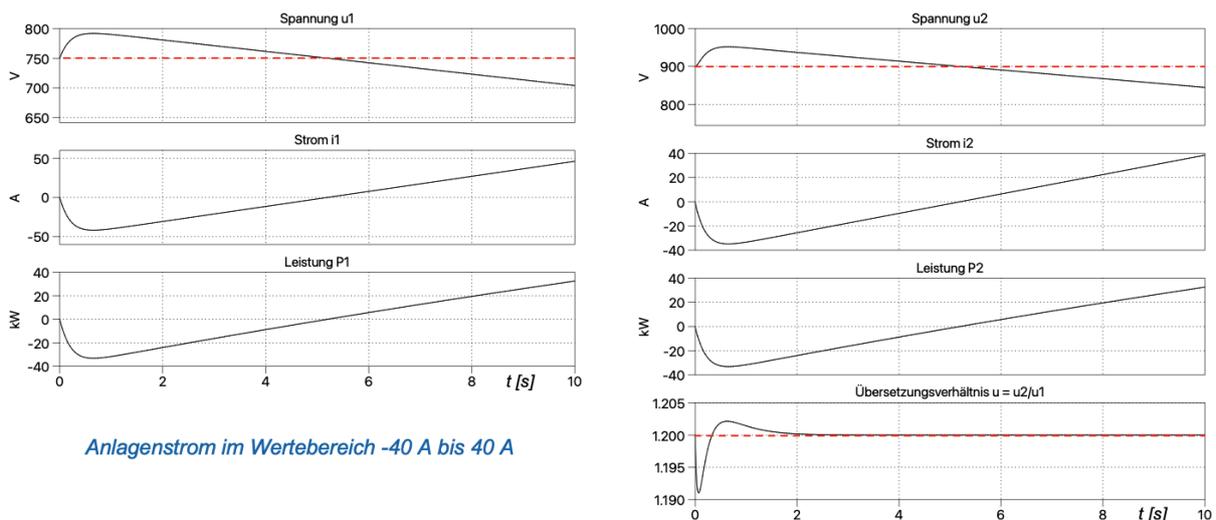


Lösung: Führungsgröße bleibt das Übersetzungsverhältnis \ddot{u} . Es gilt $\ddot{u} = u_2 / u_1 = i_1 / i_2$. In der vereinfachten Ersatzschaltung stehen als Stellgrößen die Ströme i_{01} und i_{02} der primärseitigen und sekundärseitigen Stromquellen zur Verfügung. Hierbei lässt sich einer der Ströme durch das Übersetzungsverhältnis vorgeben: $i_{01} = \ddot{u} i_{02}$. Hiermit ist der Primärstrom i_{01} an den Sekundärstrom i_{02} gekoppelt.

Als Stellgröße verbleibt der Sekundärstrom i_{02} . Der Sollwert des Übersetzungsverhältnisses wird fest vorgegeben. Der Istwert des Übersetzungsverhältnisses wird aus den gemessenen Spannungen u_1 und u_2 ermittelt: $\ddot{u} = u_2 / u_1$. Folgende Abbildung zeigt den Aufbau des Reglers.



Der Regler reagiert auf Abweichungen vom Sollwert des Übersetzungsverhältnisses und führt den Strom i_{02} . Aus dem Sekundärstrom i_{02} folgt der Primärstrom i_{01} . Folgende Abbildung zeigt einen Simulationslauf, in dem der Anlagenstrom über den Wertebereich -40 A bis 40 A variiert wurde.



Anlagenstrom im Wertebereich -40 A bis 40 A

Man erkennt, dass im Leerlauf ($i_L = 0$) die Eingangsspannung ihren Leerlaufwert von 750 V erreicht. Die Ausgangsspannung folgt der Eingangsspannung im gewünschten Übersetzungsverhältnis. Hierbei wird der Spannungsverlauf der Primärseite unter Last auf die Sekundärseite gespiegelt: Bei hoher Einspeisung steigt die Spannung (bedingt durch den Innenwiderstand R_d des Netzbildners), bei hohem Leistungsbezug sinkt die Spannung.

Durch die \ddot{u} -Regelung verhält sich der DC-Transformator regelungstechnisch neutral: Er ist weder stromgeführt noch spannunggeführt. Die Eigenschaften des Reglers der Anlage auf der Sekundärseite werden auf die Primärseite übertragen. Ebenso wird das Verhalten des Netzbildners auf der Primärseite auf die Sekundärseite übertragen. Es gilt $\ddot{u} = u_2 / u_1 = i_1 / i_2$.

Frage 2.4.4: Verhalten im Kurzschlussfall. Welche Eigenschaften hat der DC-Transformator im Kurzschlussfall? Welche Möglichkeiten bieten sich zur Anbindung von Anlagen an ein DC-Netz?

Lösung: Im Kurzschlussfall behält der Wandler primärseitig und sekundärseitig seine Stromquellencharakteristik: Ströme lassen sich begrenzen. Allerdings spiegelt die Regelung einen Kurzschluss auf die gegenüberliegende Seite, vergleichbar einem AC-Transformator: Ein anlagenseitiger Kurzschluss

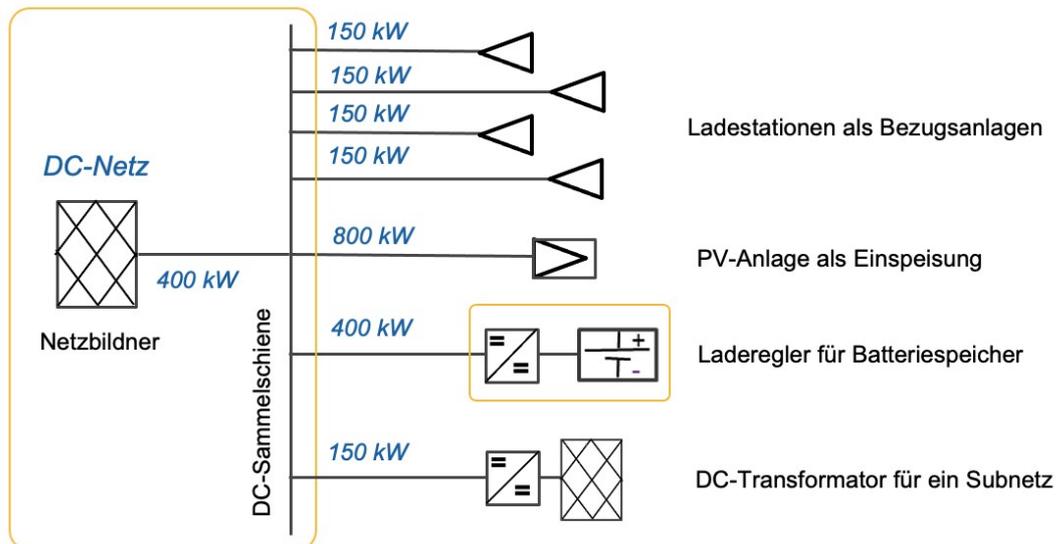
auf der Sekundärseite würde wegen der Kopplung der Ströme zu einem Kurzschluss auf der Primärseite führen. In AC-Netzen ist dieses Verhalten erwünscht und führt zu einer primärseitigen Schutzauslösung, sofern der sekundärseitige Schutz nicht vorher auslöst.

In einem DC-Netz besteht die Möglichkeit, dass der DC-Transformator den Fehler detektiert und abschaltet, bzw. die Kurzschlussströme begrenzt. Hierfür lässt sich die \ddot{u} -Regelung mit Hilfe von Kennlinien bzw. Tabellen mit Hilfe der primärseitig und sekundärseitig gemessenen Spannungen und Ströme geeignet anpassen. Als Indikatoren dienen somit die Werte $\{u_1, i_1, u_2, i_2\}$.

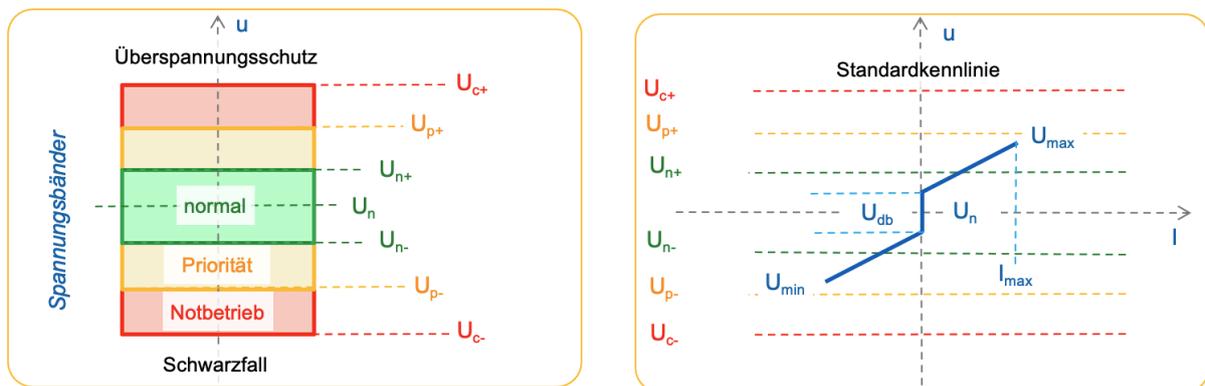
Auf diese Weise lässt sich das Schutzkonzept eines DC-Netzes in den DC-Transformator integrieren. Anpassungen der sekundärseitig angeschlossenen Anlage sind hierfür nicht erforderlich. Neben der neutralen Anbindung der Anlagenregler kann der DC-Transformator die neutrale Anbindung an das Schutzkonzept im DC-Netz übernehmen.

3. Betrieb von Anlagen am DC-Netz

Als Musternetz sollen eine PV-Anlage in Kombination mit 4 Schnellladestationen über einen DC-Netzbildner mit dem AC-Netz verbunden werden. Folgende Abbildung zeigt das Netz. Die Verbindung zum AC-Netz ist hierbei nicht dargestellt. Da das AC-Netz die Leistung der Solaranlage von 800 kW nicht aufnehmen kann, ist im Netz ein Batteriespeicher mit einer Anschlussleistung von 400 kW vorgesehen, der Solarenergie aufnehmen und abends bereitstellen kann. Die Ladestationen werden mit einer Spitzenleistung von jeweils 150 kW angenommen.



Außerdem verfügt das Netz über ein Subnetz, das wahlweise als Last oder Quelle betrieben werden kann. Der Batteriespeicher arbeitet normalerweise stromgeführt als Puffer für Solarstrom, ist aber in der Lage, das Netz zu bilden, falls der Netzbildner ausfällt. In diesem Fall soll die Betriebsart des Batteriespeichers von stromgeführten Betrieb in den spannunggeführten Betrieb umschalten. Das Netz soll mit einer symmetrischen Spannung von ± 750 V betrieben werden.



Für die Spannungen werden Spannungsbänder eingeführt, wie in der Abbildung oben dargestellt. Innerhalb eines Bereiches $\{U_n, U_n, U_{n+}\}$ um die Nennspannung U_n soll der normale Betrieb der Anlagen stattfinden. Sinkt die Spannung unter den unteren Wert dieses Bereichs, dürfen nur noch priorisierte Lasten betrieben werden. Bei Einspeiseanlagen gilt die Priorisierung für den Bereich oberhalb des normalen Bereichs.

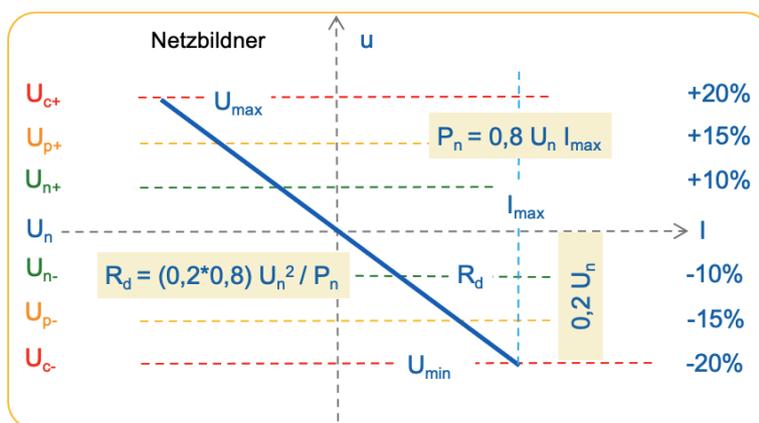
Insgesamt ist der Betrieb priorisierter Anlagen innerhalb des Bereichs $\{U_p, U_{p+}\}$ erlaubt. Wird der priorisierte Bereich unterschritten bzw. überschritten, befindet sich das Netz in einem kritischen Zustand. Im Bereich $\{U_c, U_{c+}\}$ sind nur noch Anlagen im Notbetrieb erlaubt. Außerhalb dieses Bereichs fällt das Netz schwarz bzw. es wirkt der Überspannungsschutz.

Diese Definition der Spannungsbändern dient der Illustration der Funktionsweise der Anlagen am Netz und kann in der Praxis verfeinert werden um weitere Geräteklassen. Anlagen lassen sich mit diesem einfachen Modell in die Klassen normal, priorisiert und kritisch einteilen. Abhängig von der Gerätekategorie lassen sich Kennlinien mit den Parametern $\{U_n, U_{max}, U_{min}, U_{db}\}$ parametrisieren, wobei U_n die Nennspannung bedeutet, U_{max} den oberen erlaubten Wert der Spannung, U_{min} den unteren erlaubten Wert der Spannung, und U_{db} ein optionales Totband um die Nennspannung.

3.1. Netzbetrieb ohne Solareinspeisung

In einem ersten Schritt sollen nur der Netzbildner und die Ladestationen in Betrieb genommen werden. Der Netzbildner ist mit seiner Leistung von 400 kW alleine nicht in der Lage, alle Ladestationen gleichzeitig mit voller Leistung zu versorgen ($4 \times 150 \text{ kW} = 600 \text{ kW}$). Die Leistungsbegrenzungen sollen durch Kennlinien in den Anlagen hinterlegt werden.

Frage 3.1.1: Kennlinie des Netzbildners. Wie ist die Voltage-Droop-Kennlinie des Netzbildners auszulegen, wenn der Netzbildner auf folgenden Arbeitspunkt ausgelegt wird: bei einem Spannungseinbruch von 20% der Nennspannung U_n ist die untere kritische Grenze erreicht. An diesem Punkt soll die Nennleistung P_n erbracht werden. Verwenden Sie folgende Abbildung.

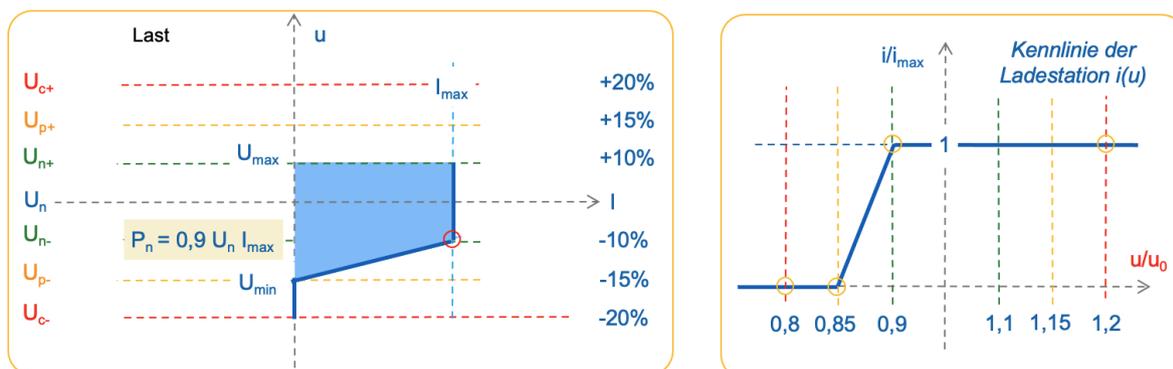


Lösung: Die Steigung $R_d = \Delta U / I_{max}$ der Voltage-Droop-Kennlinie berechnet sich aus dem Spannungsabfall $\Delta U = 0,2 U_n$ und dem Strom I_{max} . Wenn im genannten Arbeitspunkt die Nennleistung P_n erbracht wird, gilt $P_n = 0,8 U_n * I_{max}$. Hieraus folgt R_d nach der in der Abbildung dargestellten Gleichung.

Im genannten Arbeitspunkt beträgt die Spannung $U = 0,8 U_n = 1200 \text{ V}$, der Strom $I_{max} = 333 \text{ A}$ und die Leistung $P_n = 400 \text{ kW}$. Der Netzbildner ist hier an seiner Grenze. Über diese Grenze hinaus darf er nicht belastet werden.

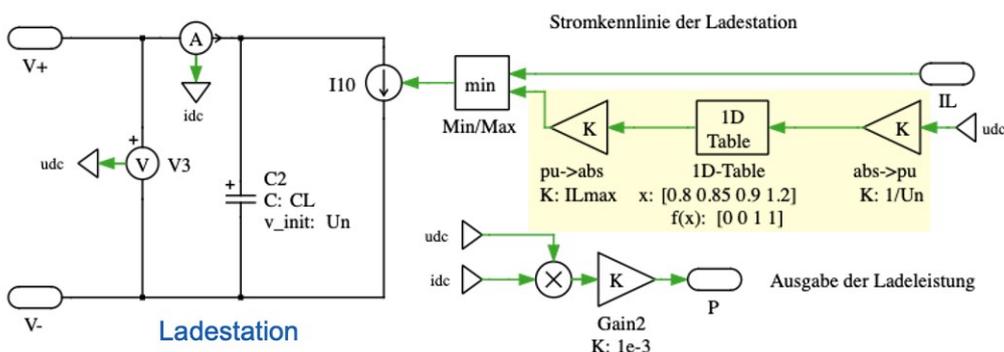
Frage 3.1.2: Kennlinien der Lasten. Die Ladestationen sollen im Betriebsbereich $\{U_n \text{ bis } U_{n+}\}$ betrieben werden. Für den Spannungsbereich werden $U_{n-} = 0,9 U_n$ und $U_{n+} = 1,1 U_n$ angenommen. Erstellen Sie die Kennlinien der Lasten und untersuchen Sie die Schaltung in der Simulation.

Lösung: Für die Ladestationen sei der Arbeitsbereich wie in folgender Abbildung dargestellt.



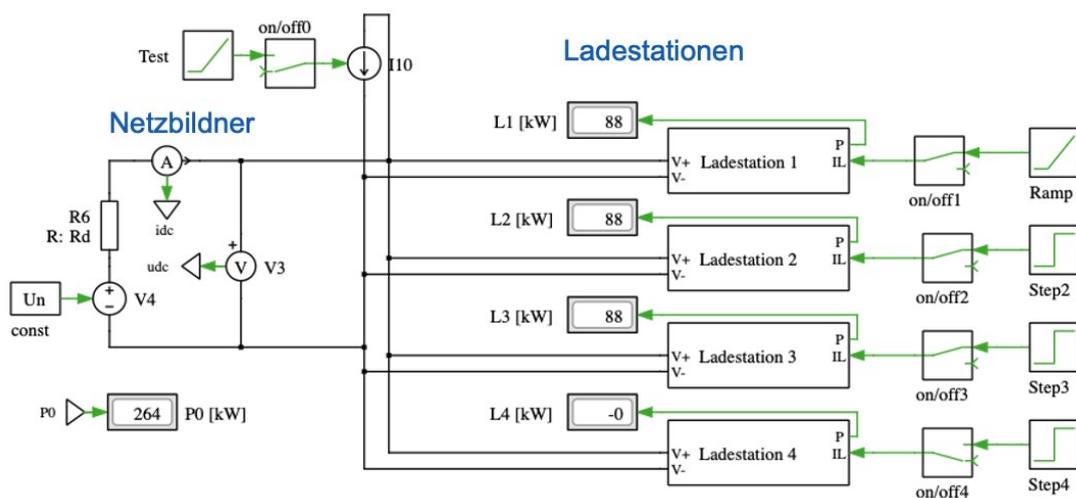
Die Ladestation soll noch bei 0,9 der Nennspannung ihre Nennleistung P_n zur Verfügung haben. Aus diesem Arbeitspunkt berechnet sich der maximale Ladestrom $I_{L,max} = P_n / (0,9 U_n)$. Der Ladestrom bleibt im gesamten Arbeitsbereich auf diesen Wert begrenzt. Unterhalb der Spannung 0,9 U_n soll der Strom bis zur Spannung $U_{min} = 0,85 U_n$ linear auf Null reduziert werden.

Statt eines Ersatzwiderstandes R_L für den linearen Teil der Kennlinie (wie in Aufgabe 2.2), soll die Kennlinie insgesamt direkt in einer Tabelle vorgegeben werden. Hierzu wird die Darstellung auf der rechten Seite der Abbildung verwendet, bei der als Eingangsgröße die normierte Spannung verwendet wird, und als Ausgangsgröße der auf den Maximalwert normierte Ladestrom. Die Eckwerte der Kennlinie lassen sich direkt in die Tabelle einfügen, die lineare Interpolation wird automatisch berechnet. Folgende Abbildung zeigt die Ladestation mit der Kennlinie.



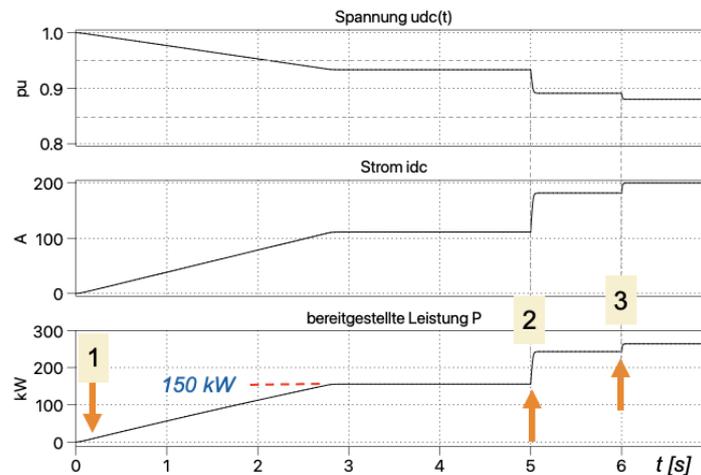
Jeweils ein Wertepaar $\{x, f(x)\}$ in der Tabelle sind einander zugeordnet, zwischen den Wertepaaren wird linear interpoliert. Bleibt der Funktionswert $f(x)$ zwischen zwei Wertepaaren gleich, ergibt sich eine Gerade mit Steigung Null. Die in der Abbildung dargestellten Eckpunkte repräsentieren die gewünschte Lastkennlinie in der Abbildung darüber.

Da die Kennlinie die obere Grenze des Ladestrome repräsentiert, wird für den Ladestrom I_{L0} das Minimum aus dem gewünschten Ladestrom I_L und dem aus der Kennlinie ermittelten Wert ausgewählt. Ist der gewünschte Ladestrom unterhalb der Grenzkurve, so zählt dieser Wert. Auf diese Weise ergibt sich der in der Abbildung weiter oben blau unterlegte Arbeitsbereich.



Die Kennlinie wurde in normierter Schreibweise vorgegeben. Hierzu wird die an den Anschlussklemmen gemessene Spannung auf die Nennspannung U_n bezogen; der normierte Ausgangsstrom der Kennlinie wird auf den Bezugswert $I_{L,max}$ skaliert. Aus Klemmenspannung und Ladestrom wird die Ladeleistung berechnet und ausgegeben. Das in der Abbildung oben dargestellte Modell verwendet 4

Ladestationen. Der Netzbildner ist als Spannungsquelle mit Innenwiderstand R_d abgebildet. Eine Testschaltung ermöglicht die Überprüfung der Voltage-Droop-Kennlinie des Netzbildners nach der Berechnung aus Aufgabe 3.1.1 Ein Simulationslauf zeigt folgendes Verhalten der Anlage.

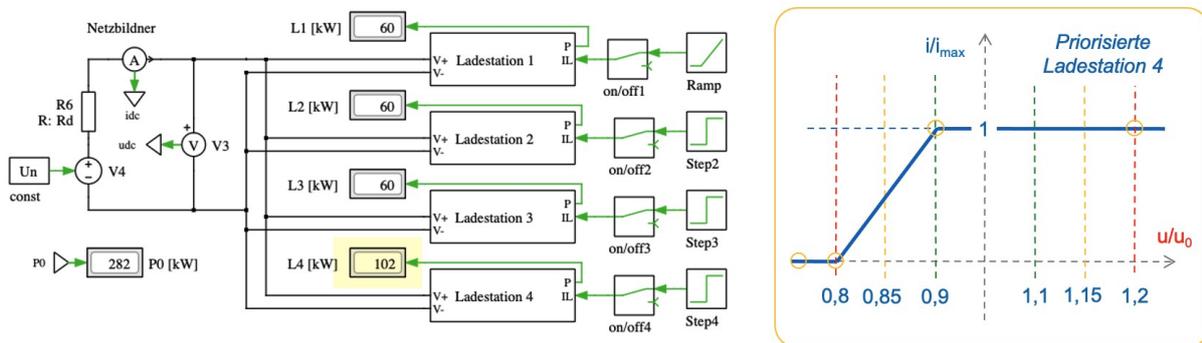


Zum Beginn der Simulation fährt Ladestation 1 auf die maximale Ladeleistung von 150 kW hoch. Die Spannung im Netz sinkt hierbei durch die Kennlinie des Netzbildners. Eine Begrenzung durch die Kennlinie der Ladestation erfolgt nicht, da die Spannung über $0,9 U_n$ bleibt.

Zum Zeitpunkt $t_2 = 5$ s schaltet Station 2 dazu, wobei die volle Ladeleistung gewünscht wird. Man erkennt, dass die insgesamt bereitgestellte Leistung unter 300 kW bleibt. Grund hierfür ist die unter dem Wert von $0,9 U_n$ wirksame Kennlinie beider Ladestationen, die den Ladestrom begrenzt. Beide Stationen teilen sich die Leistung zu gleichen Teilen.

Nach Zuschalten der Station 3 zum Zeitpunkt $t_3 = 6$ s fällt der Anstieg der insgesamt bereitgestellten Leistung noch geringer aus, alle Stationen teilen sich diese Leistung zu gleichen Teilen (88 kW pro Station, siehe Anzeigen im Modell in der Abbildung darüber). Die Spannung im Netz liegt nun unterhalb $0,9 U_n$.

Frage 3.1.3: Priorisierung der Lasten. Eine der Ladestationen soll gegenüber der anderen Anlagen priorisiert werden in dem Sinne, dass sie im Parallelbetrieb mit anderen Anlagen einen größeren Anteil der verfügbaren Leistung bekommen. Hierzu wird folgende Kennlinie verwendet.



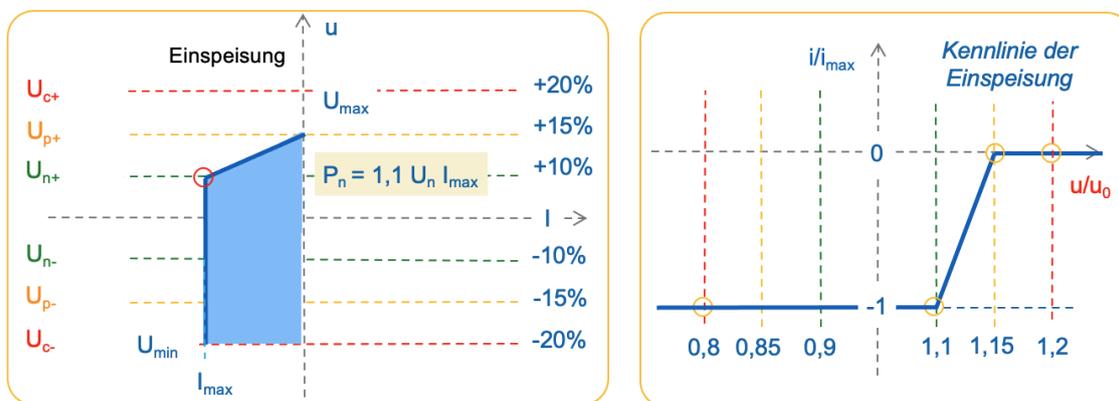
Erläutern Sie die Funktionsweise und untersuchen Sie das Verhalten in der Simulation.

Lösung: Die Anlage arbeitet in einem erweiterten Spannungsbereich ab $0,8$ pu („per unit“ bezogen auf U_n). Im Bereich $\{0,8$ bis $0,9\}$ der Nennspannung wird der Ladestrom reduziert. Die die Spannung im Parallelbetrieb aller Ladestationen unter $0,9$ pu sinkt, sich jedoch noch oberhalb des Schwellwertes $0,85$ für die anderen drei Ladestationen befindet, erhält Anlage 4 den größeren Ladestrom. Die Priorisierung erfolgt durch die Kennlinie der Ladestationen.

sierung gegenüber den anderen Anlagen bleibt erhalten, sobald die Spannung unter den oberen Schwellwert 0,9 sinkt.

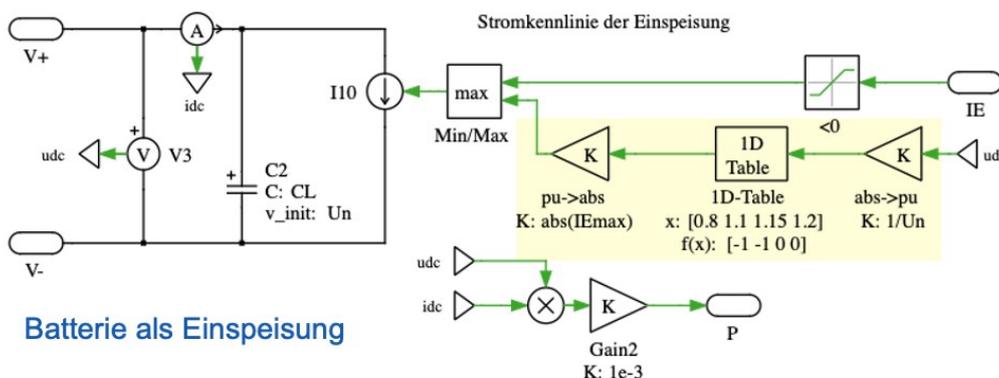
Frage 3.1.4: Führung des Batteriespeichers. Welchen Einfluss hat der Batteriespeicher als zusätzliche Einspeisung? Untersuchen Sie das Verhalten mit ausgewählten Einspeiseleistungen. Welche Kennlinie ist zur Führung des Batteriespeichers im Bereich der Einspeisung sinnvoll?

Lösung: siehe folgende Abbildung.



Am Ende des normalen Bereiches bei $1,1 U_n$ soll die Einspeisung noch mit voller Nennleistung P_n arbeiten. Hieraus folgt der maximale Einspeisestrom I_{max} . Oberhalb des normalen Bereiches $\{1,1 \text{ bis } 1,15\}$ soll der Einspeisestrom auf Null reduziert werden. Unterhalb des normalen Bereiches kann der Einspeisestrom den Maximalwert behalten und so das Netz stützen.

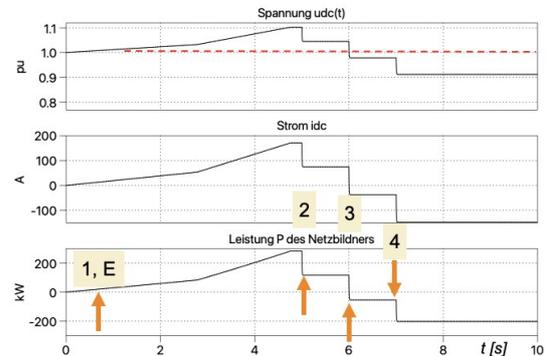
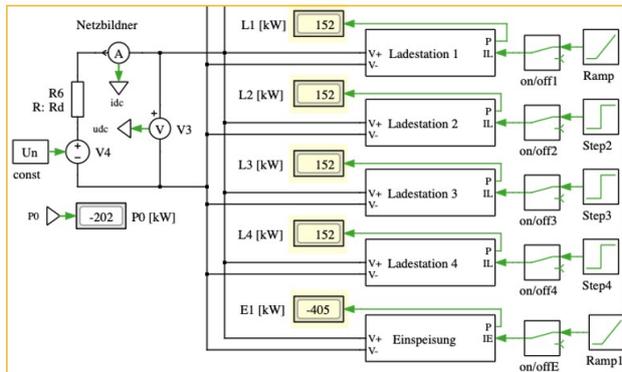
Die Eckwerte der Kennlinie in normierter Form (siehe rechter Teil der Abbildung oben) lassen sich direkt in eine Tabelle eingeben. Folgende Abbildung zeigt die Einspeisung mit Kennlinie.



Die Eckwerte lassen sich direkt in die normierte Form der tabelle übernehmen. Der Einspeisestrom hat negatives Vorzeichen und wird im Spannungsbereich $\{1,1 \text{ bis } 1,15\}$ auf Null reduziert. Die Kennlinie stellt hierbei eine untere Grenzkurve für den Ladestrom I_{10} dar, der Ladestrom darf oberhalb der Grenzkurve liegen (wobei er als Einspeisung im negativen Bereich bleibt). Folglich wird das Maximum des gewünschten Ladestroms und der Grenzkurve als Vorgabe für den Ladestrom I_{10} verwendet.

Die Einspeisung aus dem Batteriesystem besitzt die gleiche Leistung wie der Netzbildner (jeweils 400 kW). Somit sollte die insgesamt verfügbare Leistung nun ausreichen, um alle 4 Ladestationen mit voller Leistung zu betreiben. Folgende Abbildung zeigt einen Simulationslauf, bei dem am Ende alle Anlagen in Betrieb sind. Mit der Ladestation 1 wird die Einspeisung hochgefahren (mit eine Rampe bis in den Bereich der Grenzströme). Zu den Zeitpunkten $t_2 = 5 \text{ s}$, $t_3 = 6 \text{ s}$ und $t_4 = 7 \text{ s}$ werden die verbliebenen 3 Ladestationen zugeschaltet. Alle Anlagen sind nun in Betrieb.

Die Zeitverläufe der Spannung im Netz zeigt eine Abweichung nach oben bei überwiegender Einspeisung, und Abweichungen nach unten bei überwiegender Last. Auf diese Weise dient die Spannung im Netz zur Kommunikation des Lastzustandes zwischen den Anlagen.



Ebenfalls dargestellt ist der Strom am Netzbildner. Dieser repräsentiert nur den Anteil des Netzbildners am gesamten Strom. An der DC-Sammelschiene und ggf. in einigen Abgängen sind die Ströme insgesamt größer. Auch die Leistung im Zeitverlauf repräsentiert nur den Anteil des Netzbildners. Insgesamt wird im DC-Netz deutlich mehr Leistung umgesetzt.

Bemerkung: Die Richtung der Strommessung am Netzbildner erfolgt nun ebenfalls so, dass eine positive Leistung aufgenommene Leistung bedeutet (ein Strom, der in die Spannungsquelle fließt, führt zu einer Leistungsaufnahme). Alle Leistungsmessungen sind nun im Verbraucherzählpfeilsystem. Die Verwendung eines einheitlichen Zählpfeilsystems vereinfacht die Lesbarkeit der Leistungsanzeigen: Aufgenommene Leistungen sind stets positiv, abgegebene Leistungen stets negativ.

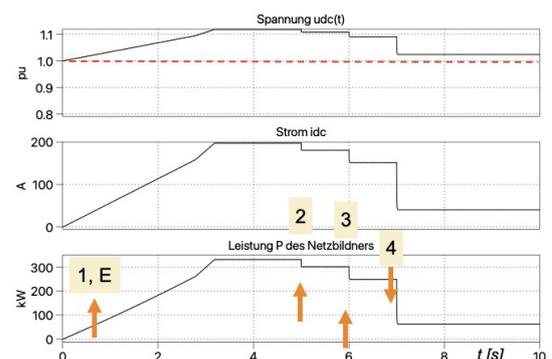
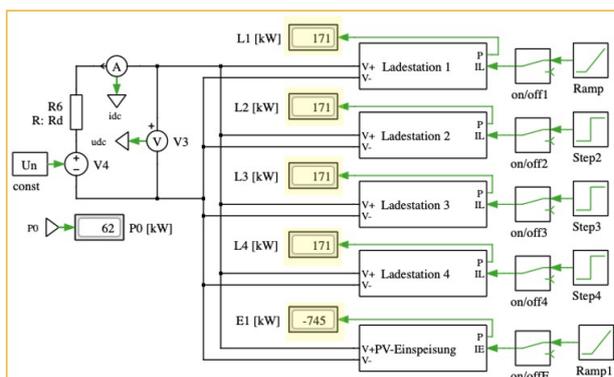
In der Abbildung oben links erkennt man, dass alle Anlagen mit Nennleistung laufen: Die Ladestationen mit 150 kW, die Einspeisung aus der Batterie mit 400 kW (negativer Wert für Leistungsabgabe). Die Differenz von ca. 200 kW gleicht der Netzbildner aus (auch hier ein negativer Wert als Indikator für angegebene Leistung). Die Rolle des Ausgleichs der Leistungsbilanz ist eine Folge des netzbildnenden Betriebs, d.h. des Betriebs als Spannungsquelle. Alle anderen Anlagen sind stromgeführt.

3.2. Netzbetrieb mit Solareinspeisung

Das Netz soll nun mit PV-Einspeisung betrieben werden. In dieser Betriebsart soll der Batteriespeicher bidirektional arbeiten: Bei einem Überangebot an Solarenergie soll er Leistung aufnehmen, bei einem Unterangebot soll er Leistung abgeben.

Frage 3.2.1: Kennlinie der Einspeisung. Nehmen Sie zunächst nur die PV-Einspeisung mit 800 kW in Betrieb. Passen Sie die Kennlinie an und untersuchen Sie die Schaltung in der Simulation.

Lösung: siehe folgende Abbildung.

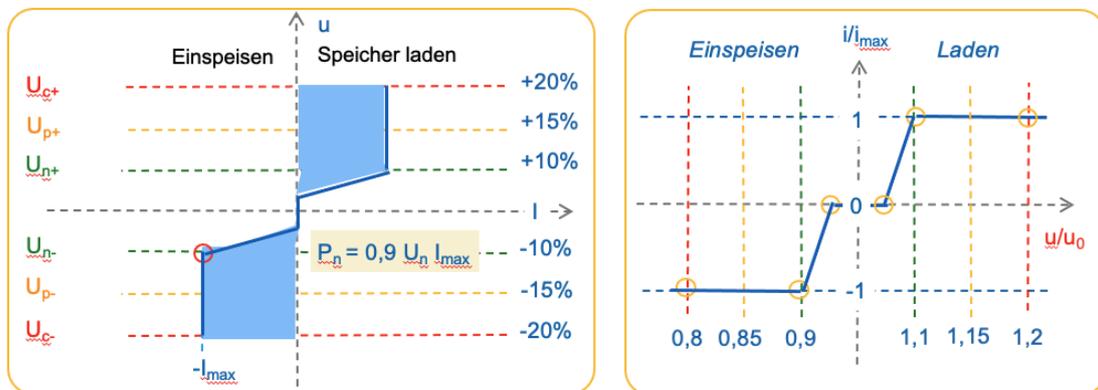


Die Kennlinie aus Aufgabe 3.1 4 bleibt unverändert: $\{x = 0.8, 1.1, 1.15, 1.2; y = -1, -1, 0, 0\}$, da diese auf die Nennspannung und den maximalen Strom normiert wurde. Allerdings muss der maximale Strom neu berechnet werden. Als Vorgabe hierfür wird $P_n = 1,1 U_n \cdot I_{max}$ gewählt, d.h. bei 1,1 der Spannung darf noch die maximale Leistung von 800 kW abgegeben werden. Aus dieser Vorgabe folgt der maximale Einspeisestrom.

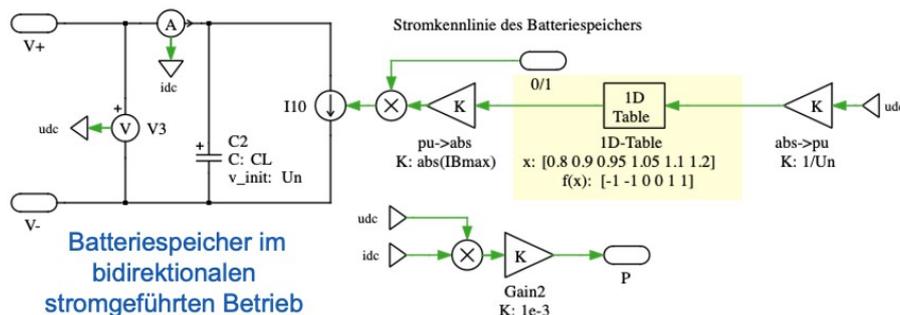
Der Simulationslauf in der Abbildung oben zeigt die Anlage im Betrieb mit voller Einspeisung und allen Ladestationen bei maximaler Leistung. Da die Spannung unter $1.1 U_n$ bleibt, fällt die Einspeiseleistung der PV-Anlage etwas geringer aus als 800 kW. Die Leistung der Ladestationen bei maximalem Ladestrom ist wegen der erhöhten Spannung etwas höher. Die Leistungsdifferenz nimmt der Netzbildner auf. Somit ist die Anlage auch ohne Unterstützung des Batteriespeichers funktionsfähig.

Frage 3.2.2: Batteriespeicher. Ergänzen Sie den Batteriespeicher mit einer Kennlinie zur Aufnahme und zur Abnahme elektrischer Leistung. Erläutern Sie die Funktionsweise des Speichers mit Hilfe der Kennlinie.

Lösung: siehe folgende Abbildungen.



Die Kennlinie ist so gewählt, dass eine Einspeisung bis $0,95 U_n$ erfolgt, wobei der Arbeitspunkt maximaler Leistung auf $0,9 U_n$ gelegt wird. Hieraus berechnet sich der maximale Strom.



Ab der Spannung $1,05 U_n$ erfolgt die Aufnahme von Leistung: Der Speicher wird geladen. Der maximale Strom ist ab $1,1 U_n$ erreicht. Die Eckpunkte der Kennlinie lassen sich unmittelbar in die Tabelle der Stromvorgabe des Speichers übernehmen. Eine weitere Vorgabe des Stromes gibt es in diesem Fall nicht: Der Speicher arbeitet selbständig auf Basis der an seinen Eingangsklemmen gemessenen Spannung: Ist diese zu hoch, wird Leistung aufgenommen; ist diese zu niedrig, wird das Netz durch Einspeisung unterstützt.

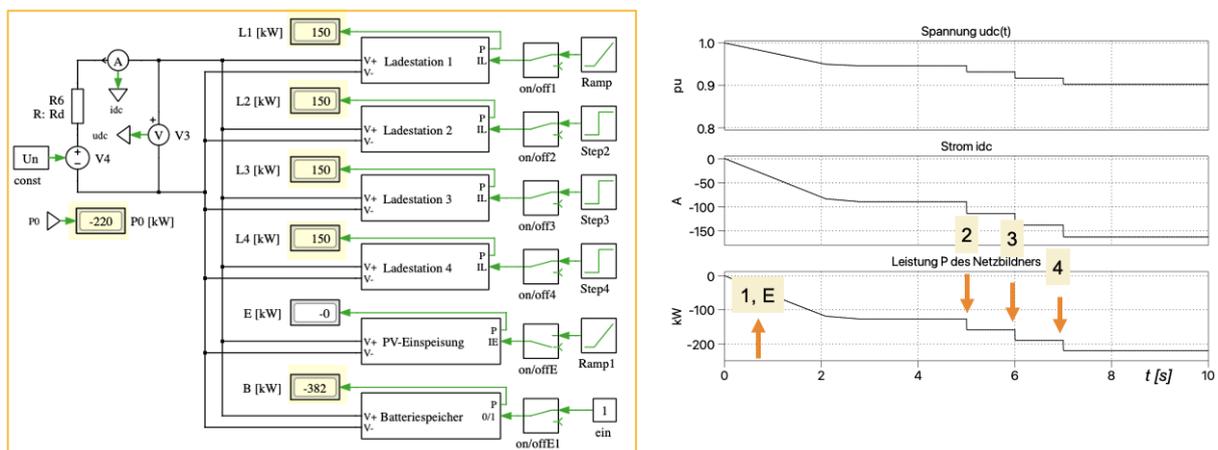
Im Bereich zwischen $\{0,95 \text{ und } 1,05\}$ findet sich ein Totband für den Strom: In diesem Bereich bleibt der Speicher inaktiv. Die Spannungsregelung in diesem Bereich wird ausschließlich dem Netzbildner

überlassen. Auf diese Weise wird eine unerwünschte Wechselwirkung der Regler verhindert. Der Netzbildner sollte mit der kürzesten Zeitkonstante arbeiten, wobei der Netzbildner durch die Kapazität in seinem Ausgangskreis und die Eingangskapazitäten der Anlagen unterstützt wird. Diese stellen die Momentanreserve für den Regler bereit, in dem sie die benötigte Leistung sofort bereitstellen bzw. überschüssige Leistung sofort aufnehmen. Der Spannungsregler reagiert auf die resultierende Spannungsänderung über der Kapazität und gleicht die Abweichung durch Primärregelung aus.

Bemerkung: AC-Netze arbeiten vergleichbar: Dort besitzen größere stromgeführte Anlagen Kennlinien der Form $P(f)$ mit einem Totband um die Netzfrequenz f_n . Innerhalb des Totbandes der Frequenz arbeiten die Primärregler der netzbildenden Anlagen. Die Momentanreserve besteht bei konventionellen AC-Netzen aus der Schwungmasse der Generator-Turbinensätze. Abweichungen von der Drehzahl gleicht der Drehzahlregler der Anlagen durch Primärleistung aus.

Frage 3.2.3: Führung des Batteriespeichers in der Simulation. Untersuchen Sie die Schaltung für ausgewählte Lastfälle in der Simulation.

Lösungsbeispiel: siehe folgende Abbildung.



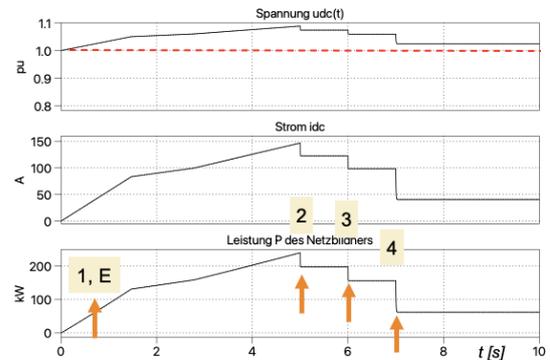
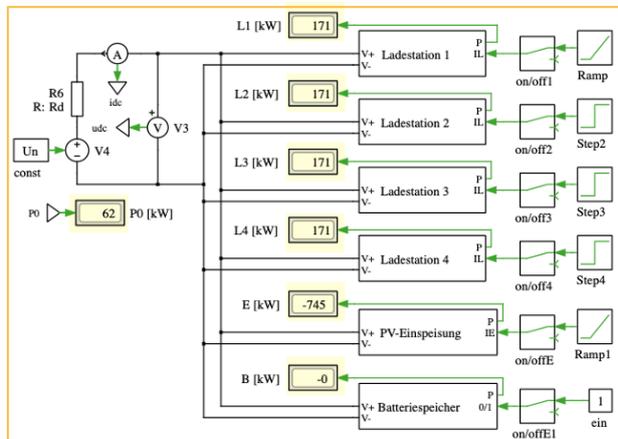
Im Beispiel wurde die PV-Einspeisung deaktiviert. Der Batteriespeicher unterstützt nun den Netzbildner bei der Bereitstellung der benötigten Leistung. Das Beispiel zeigt, dass nun der Betrieb aller Ladestationen mit voller Leistung möglich ist. Im resultierenden Arbeitspunkt von annähernd $0,9 U_n$ arbeitet der Batteriespeicher annähernd mit voller Leistung. Die restliche benötigte Leistung stellt der Netzbildner bereit.

Der Batteriespeicher arbeitet hierbei völlig selbständig auf Basis seiner spannungsabhängigen Stromkennlinie: Eine Vorgabe des Stromes gibt es nicht. Der Batteriespeicher lässt sich nur über ein „Enable“-Signal aktivieren oder deaktivieren. Aktiviert man die PV-Einspeisung, ergibt sich folgendes Bild.

Während des Hochlaufens der PV-Einspeisung nimmt der Batteriespeicher und der Netzbildner überschüssige Leistung auf. Sobald alle Ladestationen mit voller Leistung arbeiten, erfolgt deren Versorgung ausschließlich aus der PV-Einspeisung. Der Überschuss der PV-Einspeisung wird in den Netzbildner abgeführt.

Der Leistungsbeitrag des Batteriespeichers an diesem Arbeitspunkt ist Null. Grund hierfür ist die ausgeglichene Netzspannung, die innerhalb des Totbandes der Kennlinie des Batteriespeichers liegt. Da die spannung als Indikator für die Leistungsbilanz im Netz dient, wird der Bereich $\{0,95 \text{ bis } 1,05\}$ gemäß der Kennlinie als Bereich mit ausgeglichener Leistungsbilanz interpretiert: Hier ist ein Einsatz des Batteriespeichers zur Stützung des Netzes nicht erforderlich.

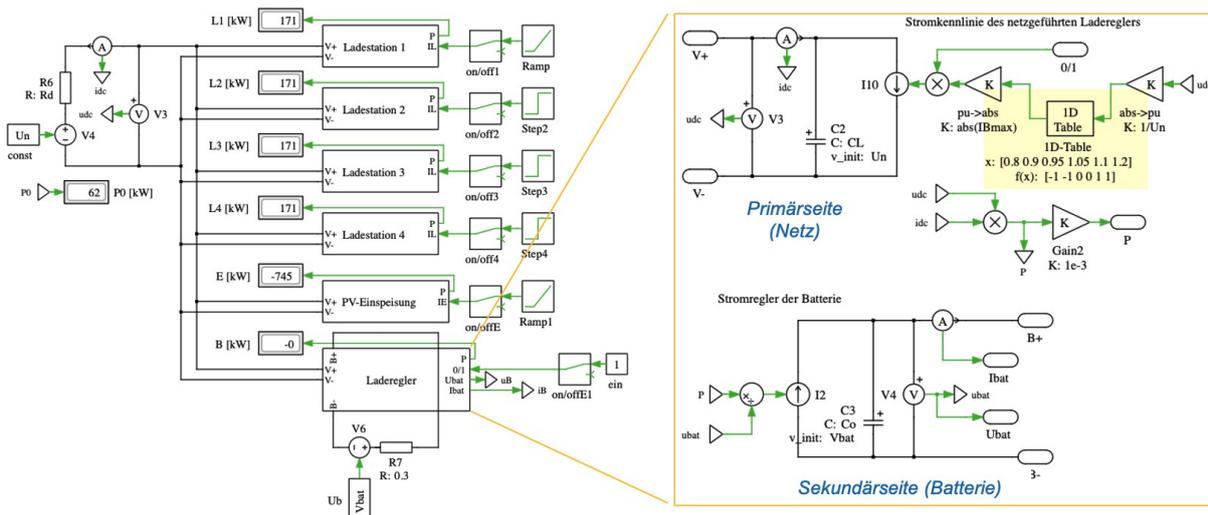
Der Beitrag des Netzbildners bleibt in diesem Arbeitspunkt mit einer Leistungsaufnahme von 62 kW gering. Im Verlauf der Simulation erkennt man, dass der Netzbildner beim Hochfahren der PV-Leistung durchaus mehr Leistung aufnimmt.



In diesem Bereich steigt daher die Netzspannung über das Totband des Batteriespeichers hinaus: Der Batteriespeicher beteiligt sich an der Aufnahme der PV-Leistung. Das Netz ist nun in der Lage, mit Hilfe der Kennlinien der Anlagen stabil zu funktionieren. Störgrößen im Sinne der Regelung sind hierbei die Lastvorgaben der Ladestationen, sowie die Einspeisung der PV-Anlage. Der Netzbildner sorgt mit Unterstützung des Batteriespeichers für den Ausgleich der Leistung und für eine stabile Spannung im Netz.

Frage 3.2.4: Erweitertes Modell mit Laderegler für die Batterie. Verwenden Sie das Modell aus Aufgabe 2.3 zur Realisierung eines Ladereglers für den Batteriespeicher. Das Modell besteht nun aus dem Laderegler mit Anschluss für eine Batterie und der separaten Batterie, wobei die Batteriespannung von der Spannung im DC-Netz abweichen darf.

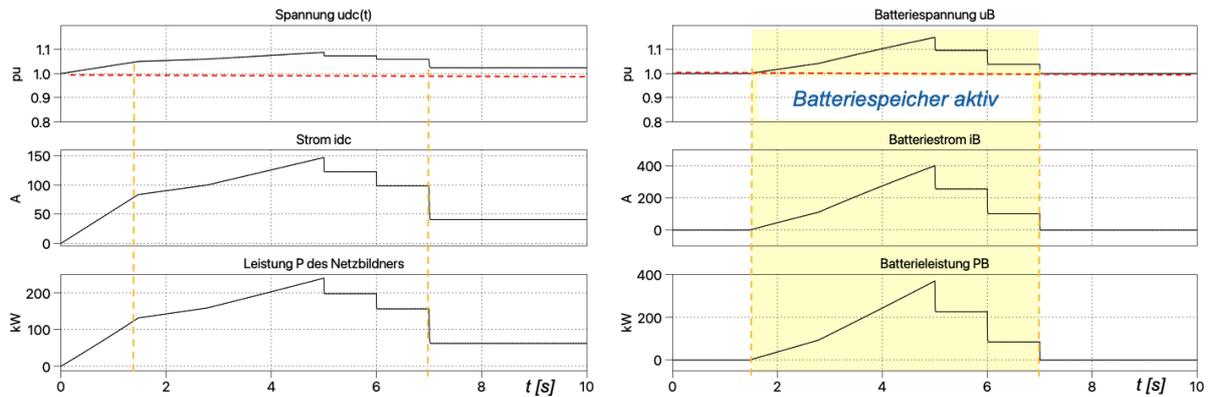
Lösung: siehe folgende Abbildung.



Die Primärseite des Ladereglers kann unverändert aus dem Modell des Batteriespeichers übernommen werden. Für den Anschluss der Batterie werden zwei zusätzliche Eingangsklemmen und ein Stromregler benötigt. Da der Batteriespeicher netzgeführt bleiben soll (also abhängig von der Spannung im DC-Netz), ist die Führungsgröße des Ladereglers der Primärstrom auf der Netzseite.

Der Batteriestrom an den sekundären Klemmen folgt dem Batteriestrom über die netzseitig aufgenommene bzw. abgegebene Leistung $P_2 = U_{\text{bat}} \cdot I_{\text{bat}} = P_1$. An den sekundären Anschlussklemmen des Ladereglers wird die Batteriespannung U_{bat} gemessen. Mit Hilfe der vorgegebenen Leistung folgt hieraus die Vorgabe des Batteriestroms.

Folgender Simulationslauf zeigt, dass das Verhalten an den netzseitigen Klemmen mit Einsatz des Ladereglers für die Batterie unverändert bleibt.



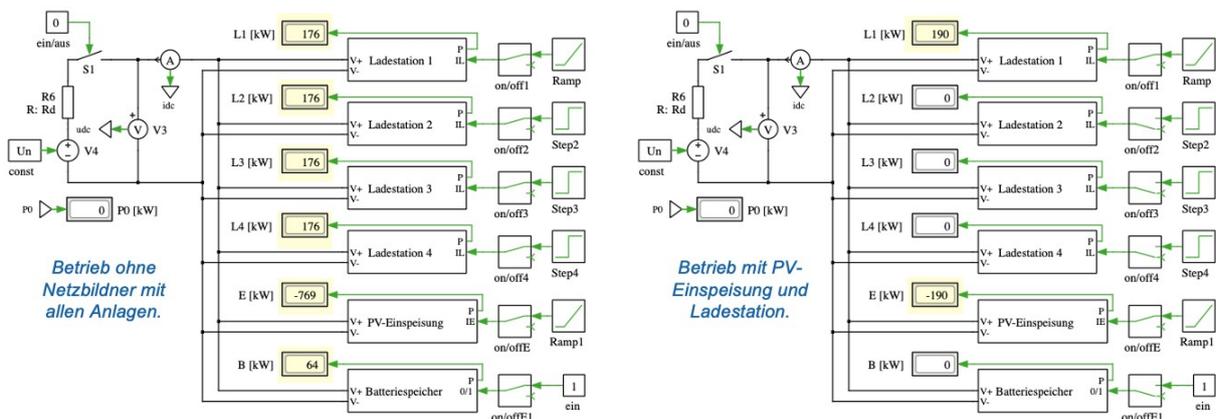
An den Klemmen der Batterie ist zu erkennen, dass der Batteriespeicher den Netzbildner unterstützt: Der Verlauf von Spannung, Strom und Leistung ist ähnlich. Allerdings wird der Batteriespeicher erst außerhalb seines Totbandes aktiv, d.h. außerhalb des Bereichs $\{0,95 \text{ bis } 1,05\}$ der Netzspannung. Es ist ebenfalls zu erkennen, dass der Batteriespeicher beim Zuschalten der Ladestationen einen größeren Teil der Leistung übernimmt als der Netzbildner: Die Versorgung erfolgt also vorzugsweise aus dem lokalen DC-Netz. Die Spannung der Batterie im Beispiel wurde mit 800 V gewählt. Aus diesem Grund ist der Batteriestrome bei vergleichbarer Leistung deutlich höher als der Strom im DC-Netz.

3.3. Inselnetzbetrieb aus dem Batteriespeicher

Mit dem Batteriespeicher besteht die Möglichkeit für einen den Inselnetzbetrieb, d.h. den Betrieb unabhängig von dem Netz, dass der Netzbildner bereitstellt. In diesem Fall wechselt der Batteriespeicher vom stromgeführten Betrieb in den spannungsgeführten Betrieb: Seine Aufgabe ist die Bereitstellung der Spannung im DC-Netz, und somit die Netzbildung.

Frage 3.3.1: Betrieb ohne Netzbildner. Untersuchen Sie die Funktion des Netzes, wenn man auf den Netzbildner verzichtet. Welches sind die Konsequenzen?

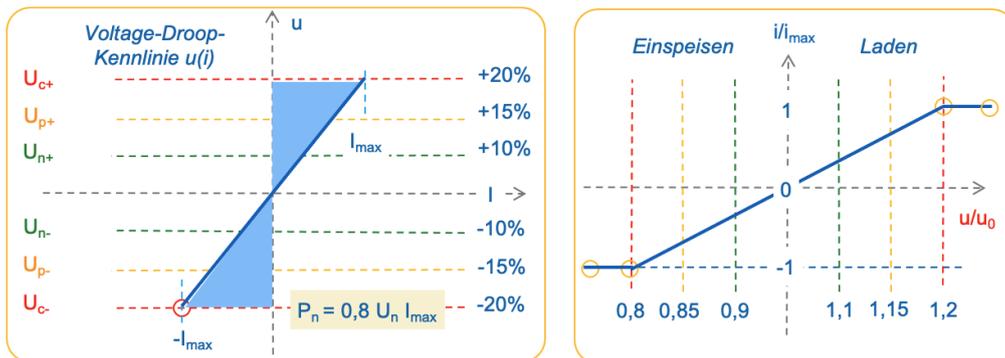
Lösung: Wenn man den Netzbildner trennt, funktioniert das Netz in den simulierten Lastfällen ebenfalls. Grund hierfür sind die Stromquellen und die Anlagenkapazitäten.



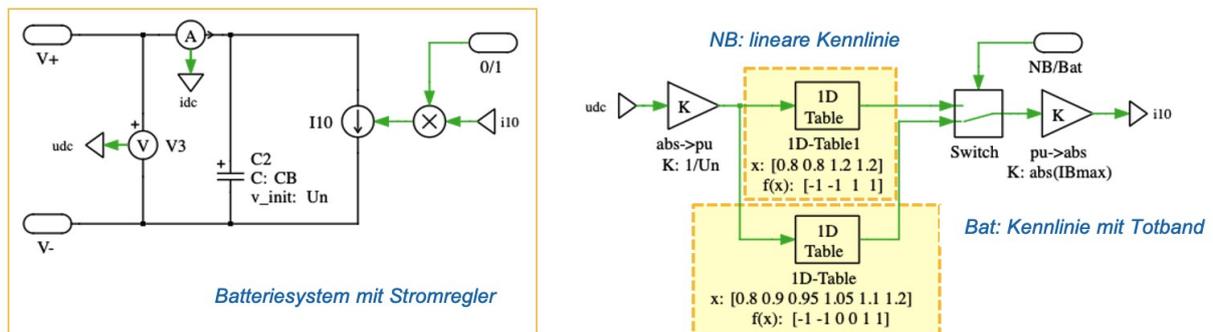
Die Kapazität des Netzbildners steht nach dem Abtrennen nicht mehr zur Verfügung. Allerdings haben alle Anlagen Eingangskapazitäten. Diese starten in einem vorgeladenen Zustand, so dass die Kennlinien der Anlagen weiterhin gelten. Stromeinspeisung und Stromabfluss finden über die Kennlinien entweder ein Gleichgewicht innerhalb des erlaubten Spannungsbandes, oder treiben das Spannungsband an die untere oder obere Grenze, wo die Anlagenströme der Einspeisung bzw. der Bezugsanlagen auf Null reduziert werden. Sind Bezugsanlagen und Einspeiseanlagen vorhanden, findet sich ein stabiler Betriebspunkt.

Frage 3.3.2: Netzbildender Betrieb des Batteriespeichers. Führen Sie den Batteriespeicher als Spannungsquelle mit einer Kennlinie $u(i)$. Definieren Sie eine hierfür passende Kennlinie.

Lösung: Folgende Abbildung zeigt die Kennlinie für den netzbildenden Betrieb des Batteriespeichers.



Anstelle der gestuften Kennlinie mit Totband wird eine lineare Kennlinie verwendet. Die Kennlinie repräsentiert die Reaktion des Batteriespeichers auf einen Spannungsabfall im Netz, bzw. auf eine Spannungsüberhöhung im Netz. Im ersten Fall soll zur Stützung des Netzes eingespeist werden, im zweiten Fall soll Leistung entnommen werden. Auf der rechten Seite dargestellt ist der Zusammenhang $i(u)$ zur Führung des Batteriestromes in Abhängigkeit der Netzspannung.

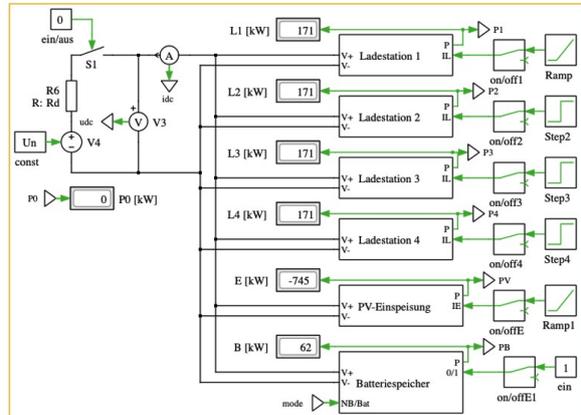
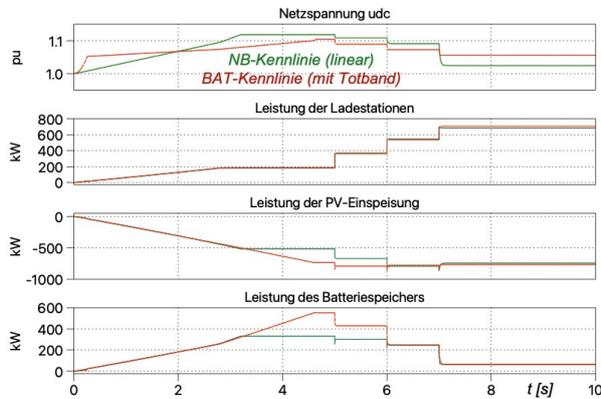


In der Form $i(u)$ lässt sich die Kennlinie zur Führung des Batteriespeichers übernehmen. Der rechte Teil der Abbildung oben zeigt beide Kennlinien mit einer Umschaltmöglichkeit. In der Betriebsart „NB“ für Netzbildner wird die lineare Kennlinie ausgewählt, in der Betriebsart „Batteriebetrieb“ die Kennlinie mit Totband.

Da der Laderegler des Batteriespeichers eine Stromquelle darstellt, genügt die Vorgabe des Ladestroms zur Stabilisierung der Spannung über der Eingangskapazität des Speichers (und den parallel geschalteten Kapazitäten der Anlagen). Hierbei wird die Momentanreserve durch die Kapazitäten bereitgestellt, was zu Spannungsabweichungen $u(P)$ führt. Der Regler unterstützt diese durch eine lineare Stromzufuhr bei Spannungsabweichungen, also um $P(u)$ bzw. $I(u)$.

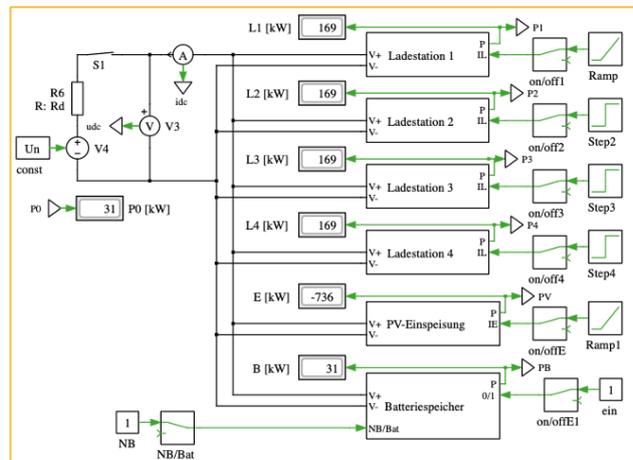
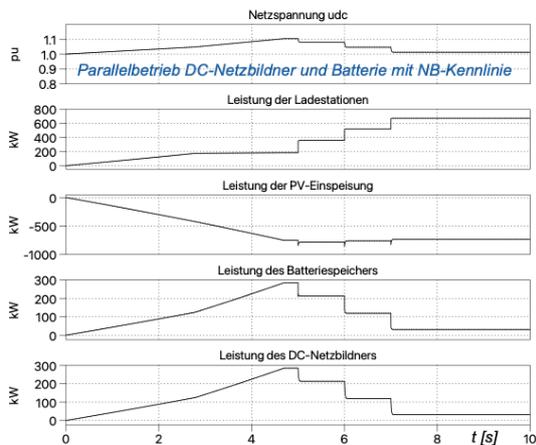
Frage 3.3.3: Simulation des Inselnetzbetriebs. Untersuchen Sie die Schaltung in der Simulation.

Lösungsbeispiel: Folgende Abbildung zeigt die beiden Kennlinien des Batteriespeichers im Vergleich. In beiden Fällen ist der DC-Netzbildner abgeschaltet. Man erkennt, dass die lineare Kennlinie (grüne Linien in der Grafik links in der Abbildung) die Spannung kontinuierlicher halten und das Batteriesystem und die PV-Anlage kontinuierlicher führen. Für die Ladestationen ergibt sich in diesem Fall kein Unterschied.

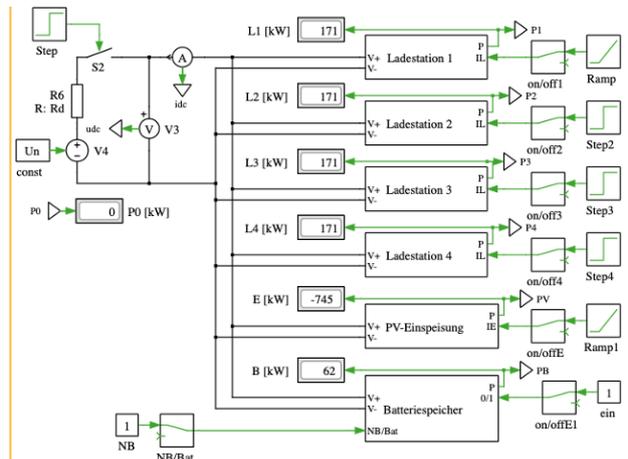
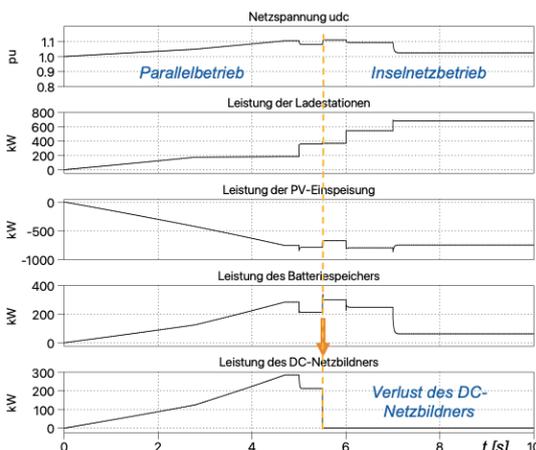


Frage 3.3.4: Parallelbetrieb zweier Netzbildner. Untersuchen Sie den Parallelbetrieb des Batteriesystems mit linearer Kennlinie mit dem DC-Netzbildner in der Simulation.

Lösung: Wie folgender Simulationslauf zeigt, können der DC-Netzbildner und der Batteriespeicher im netzbildenden Betrieb ohne Probleme parallel laufen. Übe die Kennlinien stellt sich ein stabiler Arbeitspunkt ein. Beide Anlagen teilen sich die Leistung untereinander auf.



Bei Verlust des DC-Netzbildners übernimmt der Batteriespeicher nahtlos.

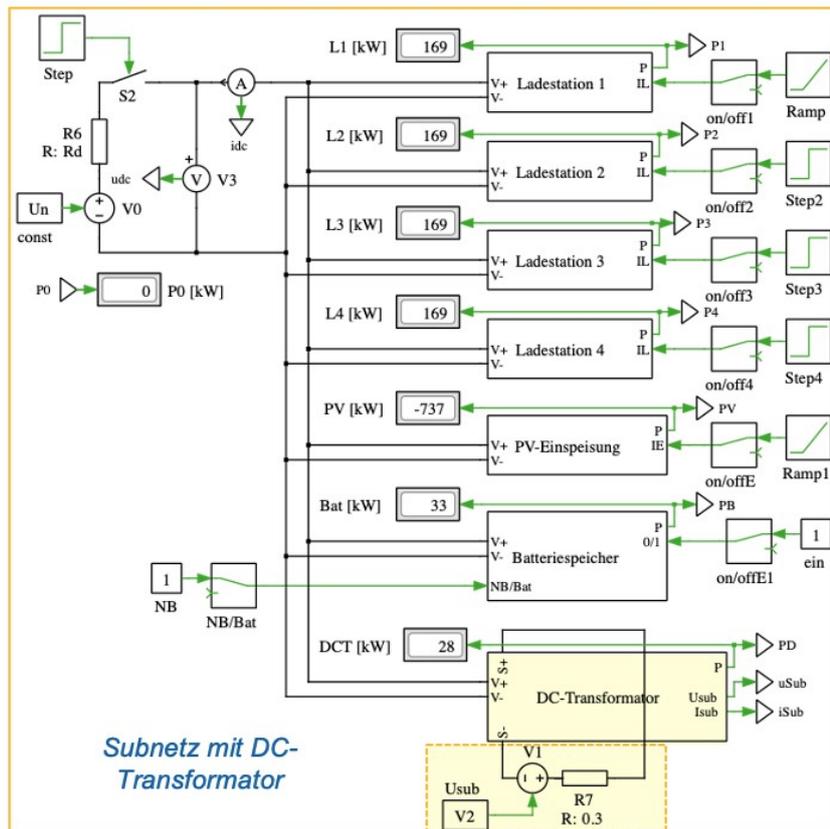


3.4. Betrieb mit Subnetz

Es soll ein weiteres DC-Netz mit einer anderen Betriebsspannung als Subnetz angeschlossen werden. Der Anschluss soll über einen DC-Transformator erfolgen. Aufbau und Funktionsweise des DC-Transformators finden sich in Abschnitt 2.4 dieses Arbeitsblattes.

Frage 3.4.1: Ergänze Sie das Modell um das Subnetz und den DC-Transformator. Das Subnetz kann im einfachsten Fall mit Hilfe einer Spannungsquelle mit Innenwiderstand realisiert werden.

Lösung: siehe folgende Abbildung.



Für das Subnetz wurde eine Betriebsspannung von $V_2 = 800 \text{ V}$ angenommen. Der DC-Transformator besitzt das passende Übersetzungsverhältnis für den Anschluss ans DC-Netz.

Frage 3.4.2: Welche Funktionen übernimmt das Subnetz im erweiterten Modell? Mit welchen Kennlinien erfolgt der Anschluss an das DC-Netz?

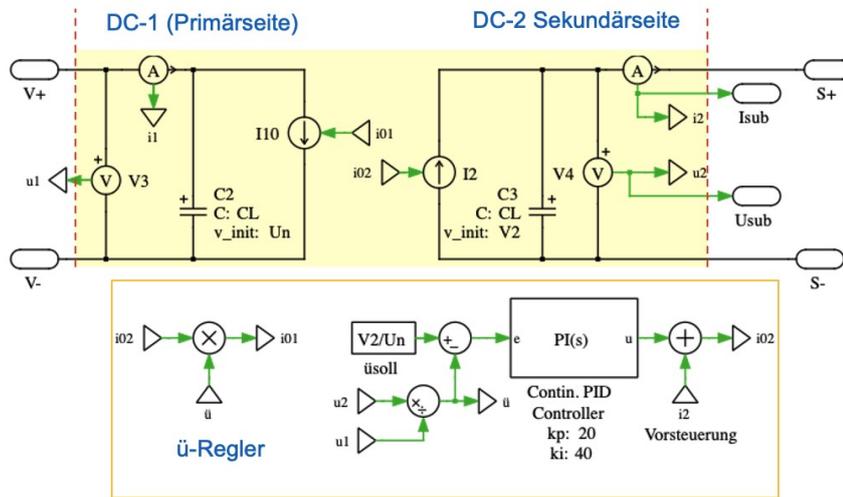
Lösung: Das Subnetz arbeitet ebenfalls netzbildend, da es eine eigene Spannungsquelle bereitstellt. Kennlinien: Der Vorteil eines DC-Transformators zum Anschluss besteht darin, dass man keine Kennlinien definieren muss. Beide Netze sind über das Übersetzungsverhältnis des DC-Transformators miteinander verbunden, wobei der DC-Transformator eine galvanische Trennung bietet.

Frage 3.4.3: Aufbau des DC-Transformators. Ergänzen Sie das Modell des DC-Transformators.

Lösung: Es wird das vereinfachte Modell aus Abschnitt 2.4 dieses Arbeitspapiers verwendet. Folgende Abbildung zeigt den Aufbau des DC-Transformators.

Am primärseitigen Anschluss werden die Klemmenspannung u_1 und der Strom i_1 gemessen. Ebenso erfolgt auf der Sekundärseite die Messung der Klemmenspannung u_2 und des Stroms i_2 . Der Transformator besitzt Kapazitäten am Eingang und Ausgang, die hier in der Größe der Kapazitäten der Ladestationen gewählt wurden, also im Vergleich zum DC-Netzbildner, zur PV-Anlage und zum Batterie-

speicher vergleichsweise klein. Der DC-Transformator kann in dieser Auslegung keinen wesentlichen Beitrag zur Momentanreserve liefern, sondern muss zum Ausgleich von Strömen auf seinen Regler zurückgreifen.

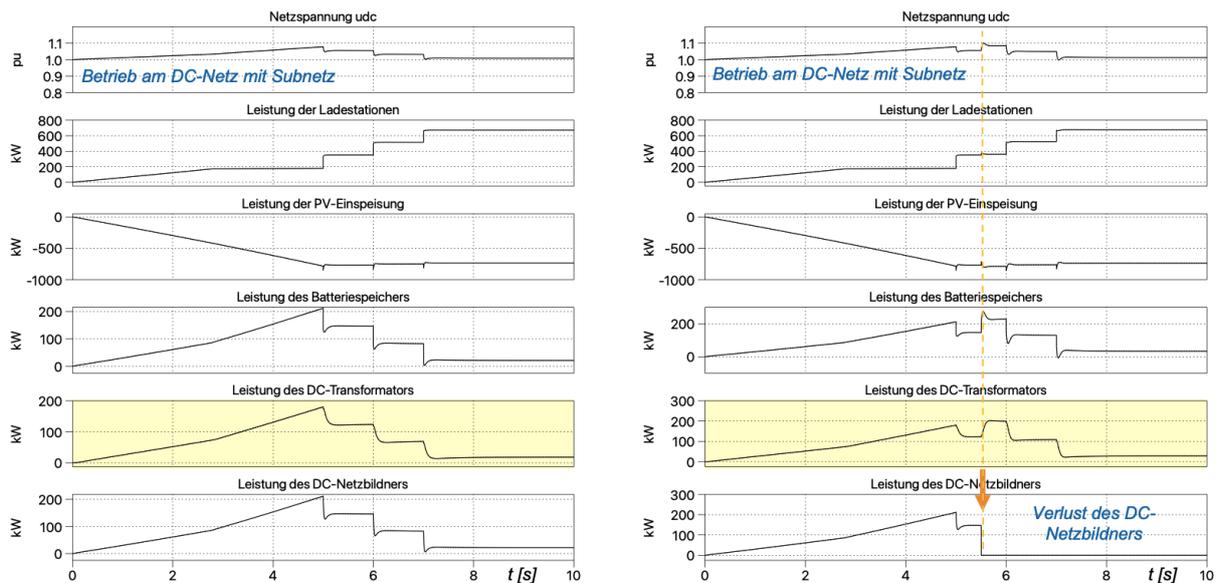


Fest vorgegeben ist nur das Übersetzungsverhältnis des DC-Transformators, hier das Verhältnis der Sekundärspannung V_2 zum Nennwert U_n der Primärspannung. In der vereinfachten Schaltung fehlt der AC-Kreis einer DAB mit dem passenden Mittelfrequenztransformator. Für diesbezügliche Details wird auf die Abschnitte 1 und 2 dieses Arbeitspapiers verwiesen.

Der Istwert des Übersetzungsverhältnisses \hat{u} wird aus dem Verhältnis der Klemmenspannungen u_2/u_1 ermittelt. Das Übersetzungsverhältnis ist Führungsgröße des PI-Reglers, Stellgröße ist im Beispiel der Sekundärstrom i_{02} im Subnetz. Der Strom im DC-Netz auf der Primärseite folgt dem Primärstrom mit dem Übersetzungsverhältnis \hat{u} . Bei dieser Art der Regelung kann auf Kennlinien verzichtet werden.

Frage 3.4.4: Untersuchen Sie den Betrieb mit angeschlossenem Subnetz in der Simulation.

Lösungsbeispiel: siehe folgende Abbildung.



Im linken Teil der Abbildung sind DC-Netzbildner, Batteriespeicher und das mit Hilfe des DC-Transformators angeschlossene Subnetz im netzbildenden Betrieb. Man erkennt, dass sich diese Anlagen die Leistung untereinander aufteilen. Am Ende des Simulationslaufes sind PV-Einspeisung (mit ca. -800

kW) und Ladestationen (mit ca. 600 kW) annähernd im Gleichgewicht, die verbliebene Leistung nehmen die 3 netzbildenden Anlagen auf. Im Simulationslauf im rechten Teil der Abbildung wird der DC-Netzbildner zum Zeitpunkt $t_1 = 5.5$ s vom DC-Netz getrennt.

An den Ladestationen und an der PV-Einspeisung ist der Verlust nicht erkennbar, jedoch am Anstieg der Spannung (im Vergleich zum linken Teil der Abbildung). Batteriespeicher und das über den DC-Transformator angeschlossene Subnetz nehmen den Anteil des DC-Netzbildners auf.

Der Anteil des DC-Transformators hängt hierbei vom Innenwiderstand (bzw. von der Droop-Kennlinie) des angeschlossenen Subnetzes ab. Der DC-Transformator benötigt keine eigene Kennlinie, da er das Verhalten an seinen Anschlüssen spiegelt.

An den geschalteten Übergängen zeigen die Zeitverkäufe Lastspitzen, auch bei der PV-Einspeisung. Diese kommen durch die Beiträge der Anlagenkapazitäten zur Momentanreserve zustande. Der DC-Transformator und die Ladestationen zeigen keine nennenswerte Beiträge, da ihre Kapazitäten vergleichsweise gering sind (im Beispiel 1/10 der Kapazitäten der PV-Anlage, des Netzbildners und des Batteriespeichers).

In dieser Auslegung kann der DC-Transformator keine nennenswerte Momentanreserve beisteuern, sondern Primärregelleistung aus dem Subnetz mit Hilfe seines \ddot{u} -Reglers. Als Alternative zur Anbindung des Subnetzes mit Hilfe des den DC-Transformators käme der in Abschnitt 2.3 beschriebene Ladederegler für ein Batteriesystem in Frage, in einer Ausführung vergleichbar dem erweiterten Modell des Batteriespeichers aus Aufgabe 3.2.4.