



Projektbericht

Simulationsmethoden (MECH-B-4-SIM-SIM-ILV)

DC Motor mit Drehzahlregelung und Richtungswechsel

Bachelor Studium - Mechatronik

4. Semester

Lektor: Andreas Albrecht

Gruppe: BA-MECH-19-BB-2B

Autoren: Thomas Hofer, Thomas Wallner

16. Juli 2021

Inhaltsverzeichnis

1	Projektbeschreibung	1
2	Richtungswechsel	3
2.1	H-Brücke	3
2.2	Switches	5
3	Drehzahlregelung	7
3.1	Dynamo	7
3.2	Drehzahlregler	8
3.2.1	Rechteck- und Dreieck-Signal	9
3.2.2	PI-Regler	10
3.2.3	Vergleicher	10
3.3	Simulation	11
4	Gesamte Schaltung	12
5	Zusammenfassung	16
	Abbildungsverzeichnis	III
	Literaturverzeichnis	IV

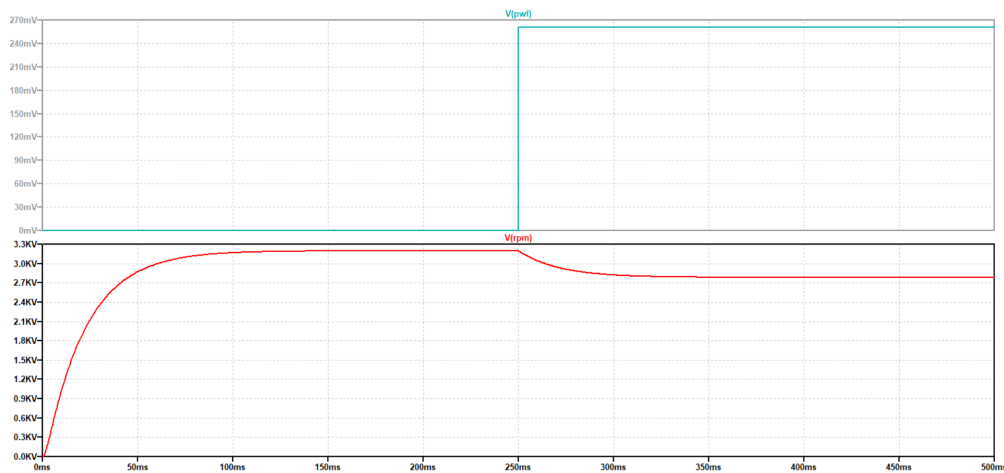


Abbildung 1.3: Simulation des DC-Motors

Für einen Richtungswechsel muss in der Simulation eine negative Spannung an den Motor angeschlossen werden. In Abbildung 1.4 ist die Drehzahl bei negativer Spannung abgebildet. Hier gilt es noch zu beachten, dass auch die Last negativ umgesetzt werden muss, da sonst die Drehzahl mit dem Lastwiderstand in die negative Richtung zunimmt.

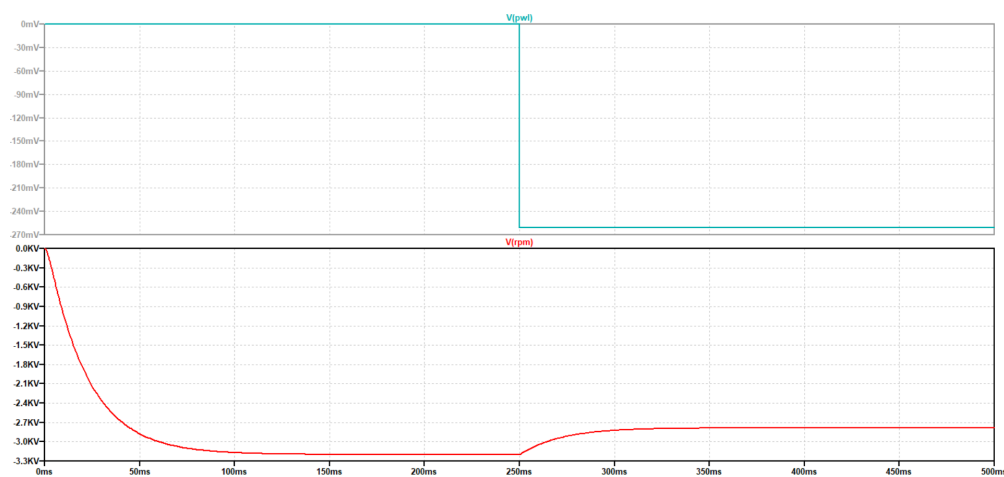


Abbildung 1.4: Richtungswechsel mit negativer Eingangsspannung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, einen Richtungswechsel und eine Drehzahlregelung des Motors zu implementieren. Der Richtungswechsel sollte dabei ohne Verwendung einer negativen Spannung umgesetzt werden. Die Drehzahlregelung sollte möglichst schnell auf eine eintretende Last reagieren und die Drehzahl immer konstant halten. Es soll eine Lösung mit realen Bauteilen angestrebt werden.

2 Richtungswechsel

Wie bereits in 1 beschrieben, wird nun ein Richtungswechsel ohne Verwendung einer negativen Spannung direkt am Motor umgesetzt. Dafür wird eine H-Brücke verwendet, mit der die Spannung am Eingang kontrolliert wird. Zum Ansteuern dieser H-Brücke werden im nächsten Schritt dann Switches verwendet.

2.1 H-BRÜCKE

Die H-Brücke wird wie in Abbildung 2.1 umgesetzt. Dafür werden 4 MOSFETs in einer H-Form angeordnet und zusätzlich parallel zu jedem MOSFET werden Dioden geschaltet. Durch diese Anordnung können zu jeder Zeit verschiedene MOSFETs angesteuert werden und dadurch kann zwischen A und B die gewollte Spannung erzeugt werden.

Für eine Vorwärtsdrehung des Motors wird der rechte untere MOSFET mit 30V immer durchgeschaltet und der linke obere mit einem PWM Signal gesteuert. Links unten und rechts oben wird keine Spannung an die MOSFETs angelegt. Dieser Zustand ist in Abbildung 2.3 dargestellt.

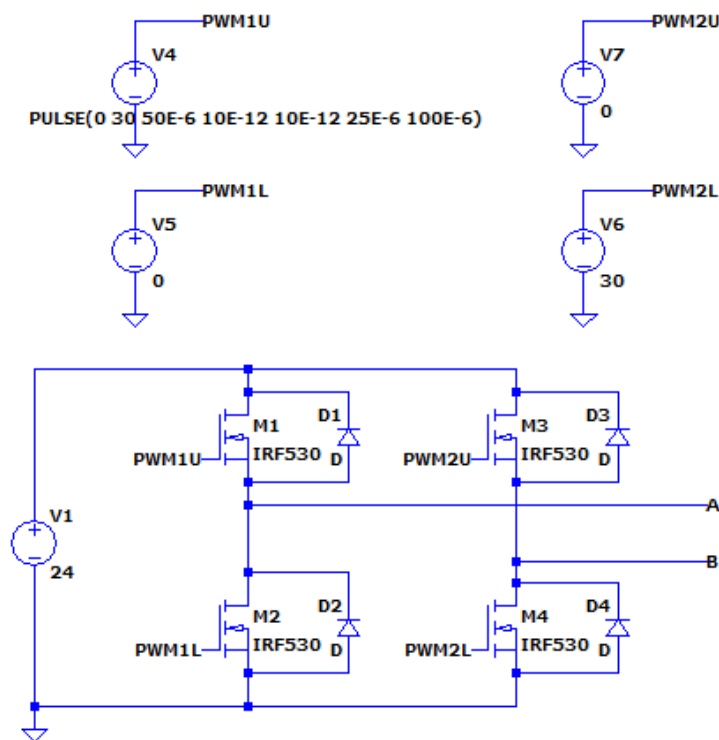


Abbildung 2.1: Vorwärtslaufen mit H-Brücke

Durch diesen Schaltungsaufbau wird am Ausgang zwischen A und B ein positives PWM Signal erzeugt. Abbildung 2.2 zeigt die Spannungswerte der einzelnen MOSFETs-Eingänge (1-4) und die Ausgangsspannung zwischen A und B ($V(a, b)$). Im untersten Plot ist noch die Drehzahl des Motors abgebildet um zu zeigen, dass diese auch positiv ist.

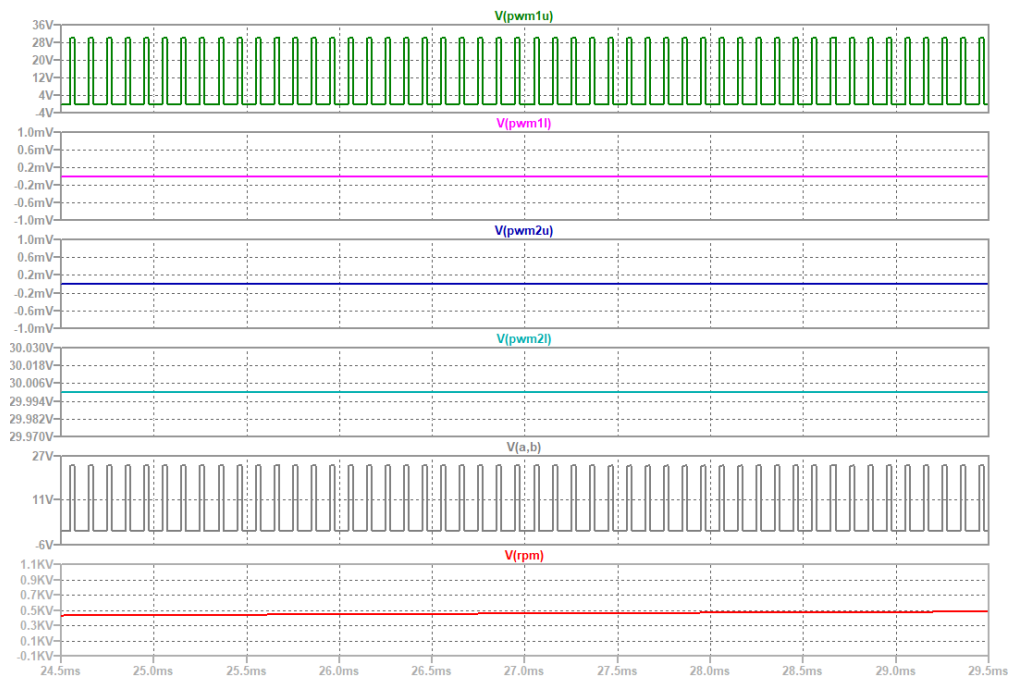


Abbildung 2.2: Vorwärtslaufen mit H-Brücke

Um nun eine negative Spannung zwischen A und B zu erhalten, müssen die diagonal anderen zwei MOSFETs angesteuert werden. Das bedeutet links oben und rechts unten werden auf 0V gelegt, links unten wird das PWM-Signal angelegt und rechts oben wird mit 30V durchgeschaltet. Abbildung 2.1 zeigt diesen Aufbau der H-Brücke.

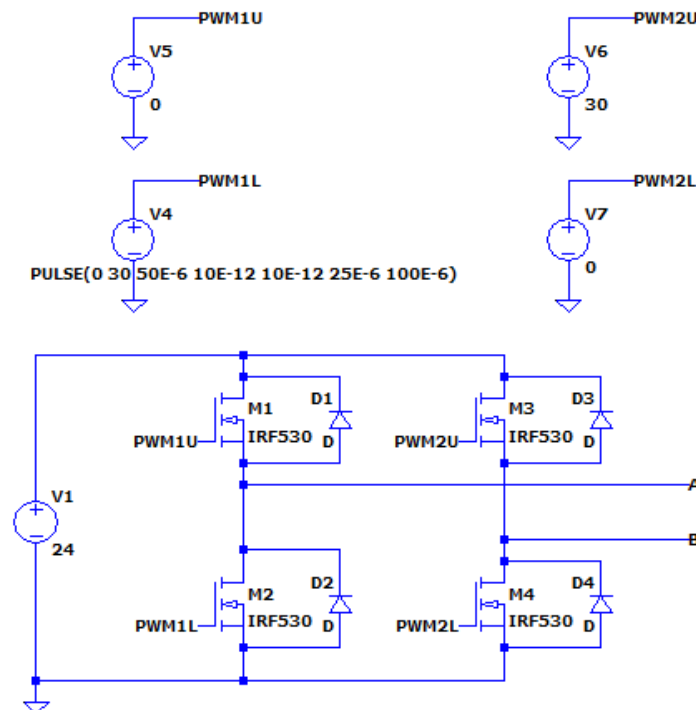


Abbildung 2.3: Rückwärtslaufen mit H-Brücke

Wird diese Schaltung nun simuliert erhält man das Ergebnis in Abbildung 2.4. Es ist erkennbar, dass hier eine negative Spannung zwischen A und B ($V(a,b)$) vorhanden ist und dass die Drehzahl des

Motors im untersten Plot nun auch negativ ist. Jedoch ist die Eingangsspannung bei der H-Brücke positiv.

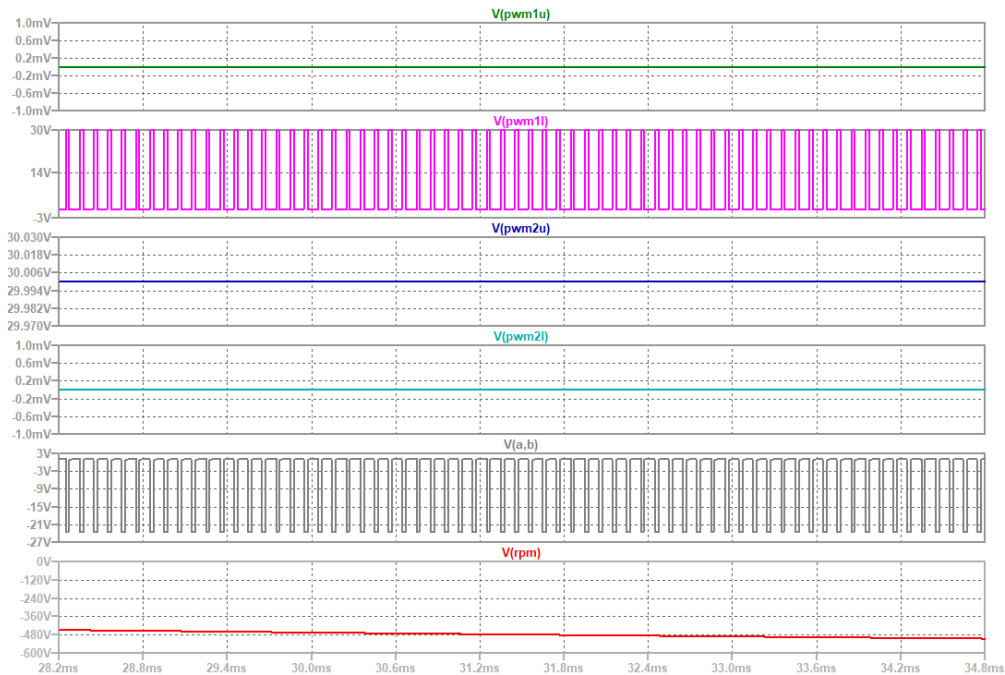


Abbildung 2.4: Rückwärtslaufen mit H-Brücke

2.2 SWITCHES

Im nächsten Schritt muss diese H-Brücke und der damit verbundene Richtungswechsel noch gesteuert werden. Dafür werden Switches verwendet, welche die einzelnen MOSFETs der H-Brücke ansteuern.

Dafür wird die Schaltung wie in Abbildung 2.5 aufgebaut. Die vier Switches sind so angeordnet, dass immer die zwei diagonal liegenden gleichzeitig schalten wenn das Signal aus der Direction (*Dir*) positiv oder 0 ist. Das Signal der Direction wird mit einem Pulse erzeugt, welches zu Beginn 1V ist und nach 200ms auf 0V wechselt. Somit schalten für 200ms die Switches *S2* und *S4* und dann wechseln diese und *S1* und *S3* schalten.

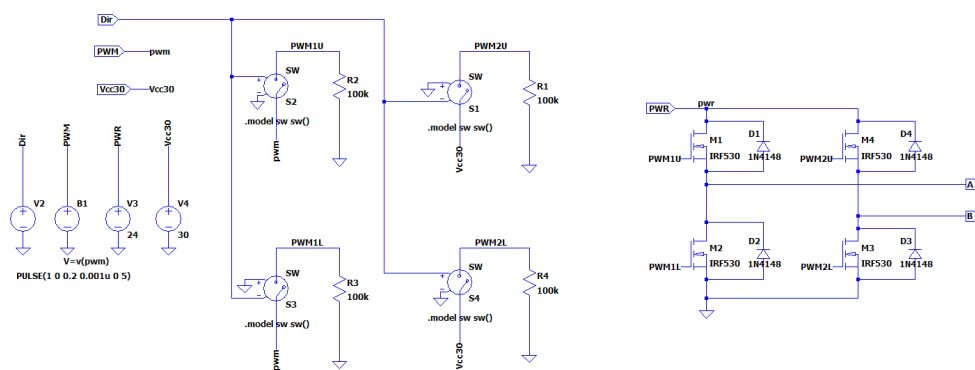


Abbildung 2.5: Steuerung der H-Brücke mit Switches

Da bei den Switches *S2* und *S3* unser PWM-Signal und bei den Switches *S1* und *S4* jeweils 30V anliegen, erhalten wir hier an der H-Brücke genau die Signale wie oben erläutert. Durch diese Switches ist der Richtungswechsel nun zeitgesteuert. Abbildung 2.6 zeigt die Simulation der gesamten Schaltung. Der Motor läuft nun 200ms vorwärts und dann rückwärts (*rpm*). Auch die Spannung zwischen *A* und *B* wechselt von einem positiven PWM-Signal zu einem negativen.

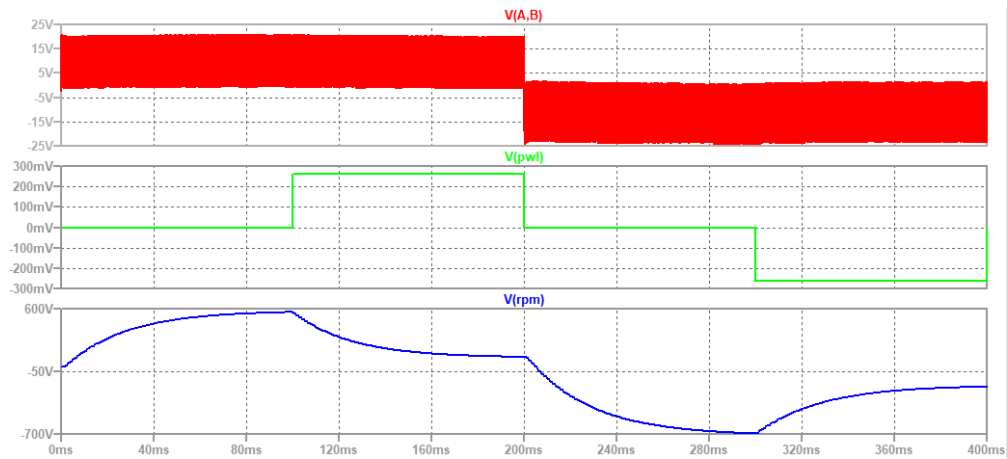


Abbildung 2.6: Steuerung der H-Brücke mit Switches

Der Richtungswechsel ist nun vollkommen zeitgesteuert und mit einer positiven Spannung am Eingang umgesetzt. Jedoch bleibt noch das Problem der Drehzahlregelung. In Abbildung 2.6 wurde die Last nach 100 ms Vorwärtslauf positiv dazu geschaltet und nach 100 ms Rückwärtslauf wird diese auch negativ zugeschaltet.

3 Drehzahlregelung

Für die Drehzahlregelung muss am Ausgang des Motors eine Referenzspannung abgenommen werden. Da hier nur eine Drehzahl zur Verfügung steht, ist die Idee, dass mit Hilfe eines Dynamos die Drehzahl in eine Spannung umgewandelt wird.

3.1 DYNAMO

Da jeder Motor auch ein Dynamo ist, wird für die Implementierung eines Dynamos das selbe Modell wie für den Motor verwendet [6]. Hier muss nur der Ausgang der mechanischen Arbeit des Motors als Ausgangsbedingung (*ic*) des Dynamos angeschlossen werden. Dadurch kann zwischen den Ausgängen $M+$ und $M-$ die Referenzspannung abgenommen werden. Abbildung 3.1 zeigt den selben Aufbau wie beim Motor, jedoch mit $M+$ und $M-$ als Ausgang und *ic* als Eingang.

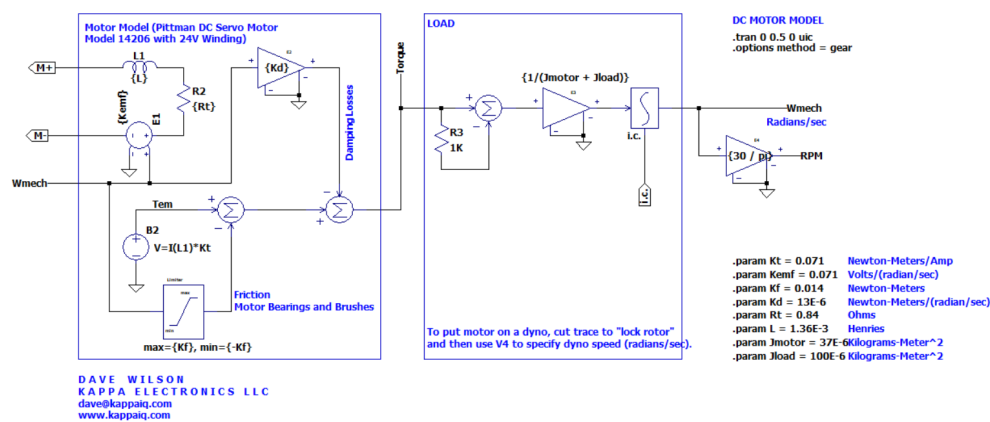


Abbildung 3.1: Schaltungsaufbau Dynamo

Zur Veranschaulichung wird der Motor mit konstanten 24V betrieben und der Ausgang W_{mech} wurde dann direkt an i_c des Dynamos gelegt. Das Symbol als auch der Testaufbau sind in Abbildung 3.2 ersichtlich.

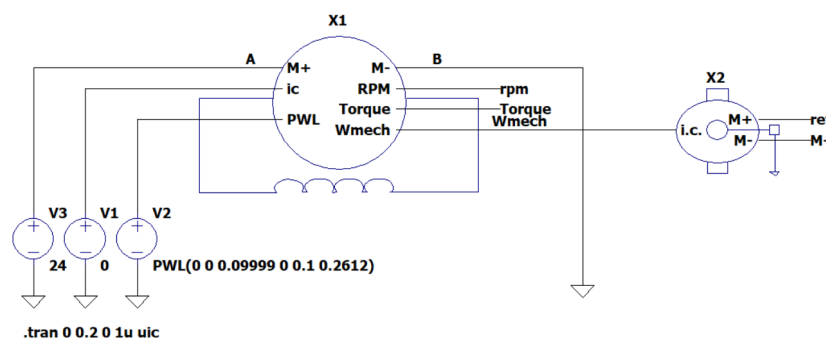


Abbildung 3.2: Symbol Dynamo

Abbildung 3.3 zeigt die Eingangsspannung des Motors von 24V, die Drehzahl des Motors und die Referenzspannung des Dynamos zwischen $M+$ und $M-$. Es ist gut zu erkennen, dass die Drehzahl bis zum Maximum ansteigt und dann durch das Eintreten der Last wieder sinkt. Genau deckungsgleich steigt die Referenzspannung beinahe bis zu 24V an bevor sie durch den Lastwiderstand auch wieder sinkt. Somit ist im ersten Schritt eine Referenzspannung vorhanden, die nun geregelt werden kann.

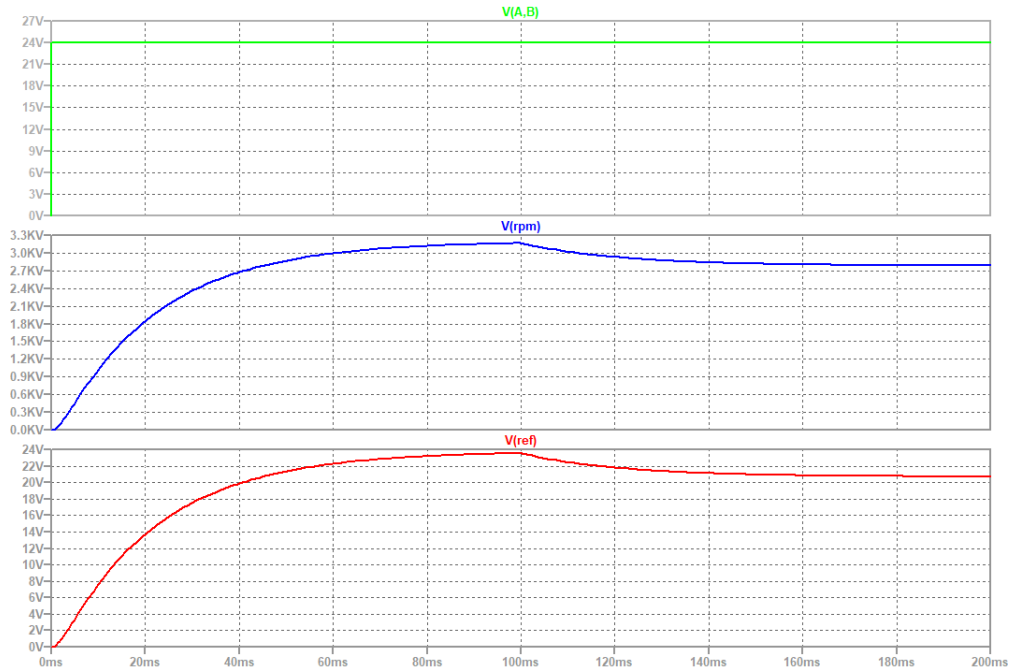


Abbildung 3.3: Simulation Dynamo

3.2 DREHZAHLREGLER

Die Drehzahlregelung vergleicht nun die Referenzspannung *signal*, welche mittels Spannungsteiler von $V(ref)$ definiert ist, mit einer Vorgabespannung *DAC*, welche mittels Spannungsteiler abgenommen wird. Dies könnte auch ein Microcontroller mit einem DAC-Ausgang sein, dann wäre der Spannungsteiler nicht notwendig.

Das *signal* und *DAC* werden nun mittels PI-Regler verglichen. Nur die Änderungen werden dabei zeitverzögert am Ausgang des PI Regler widerspiegelt. Der Ausgang des PI Reglers wird anschließend mit Hilfe eines Komparators mit einem Dreieck-Signal verglichen. Dadurch wird der Duty Cycle bestimmt. Das Dreiecksignal leitet sich von einem Rechtecksignal ab. Beide Blöcke werden mit echten Hardwarekomponenten aufgebaut. Alternativ könnte in der Praxis auf die Rechteckgenerierung verzichtet werden und stattdessen eine PWM eines Microcontrollers verwendet werden.

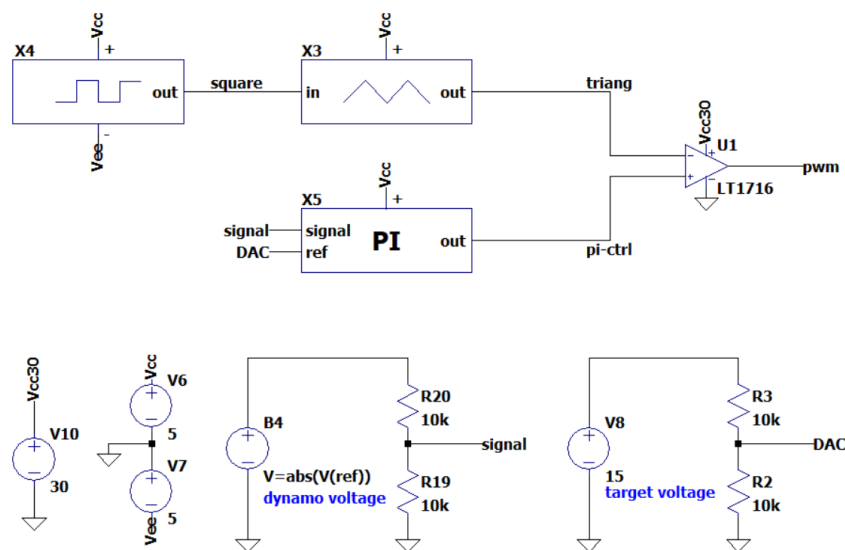


Abbildung 3.4: Schaltungsaufbau Drehzahlregler

3.2.1 Rechteck- und Dreieck-Signal

Die Rechteck-Generierung erfolgt mit der Oszillatorschaltung wie in Abbildung 3.5. [1]

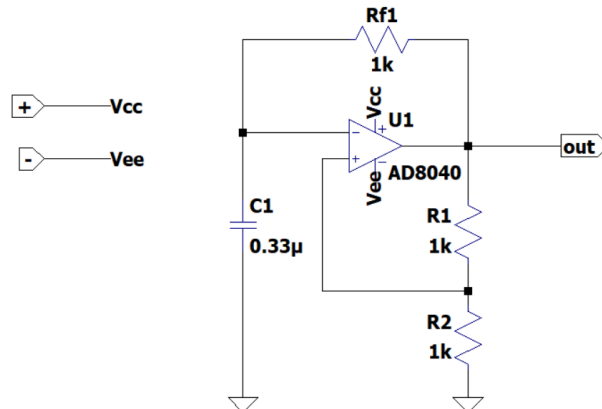


Abbildung 3.5: Rechteck-Signal

Legt man an einen Integrator wie in Abbildung 3.6 ein Rechtecksignal, erhält man ein Dreiecksignal. Um das Sättigungsproblem des Kondensators bei niedrigeren Frequenzen zu verzögern, wird parallel dazu noch ein Widerstand verwendet. [1]

Um ein stabiles Dreiecksignal am Ausgang zu erhalten muss folgender Zusammenhang erfüllt sein:

$$5R_1C_1 > \frac{T}{2} \quad (1)$$

Dabei entspricht T der Periodendauer des Rechtecksignals. [1]

Mit den Widerständen R_1 und R_2 kann die Verstärkung des Integrators angepasst werden. Das Verhältnis wird so gewählt, sodass das Dreiecks-Signal innerhalb der Versorgungsspannung liegt, dieses bestmöglich ausnutzt und dennoch bei 0 V ein komplettes ausschalten, sowie bei 5 V ein komplettes einschalten möglich ist. Damit das Dreiecksignal nicht auf GND hinunter geht wird am positiven Eingang des OPVs noch ein kleiner DC-Offset mittels Spannungsteiler generiert. Ohne DC-Offset, ist es zu unschönen Spitzen gekommen.

Für beide Teilschaltungen wird der Operationsverstärker AD8040 von Analog Devices gewählt. Dieser zeichnet sich vor allem mit seiner hohen Slew Rate von $60 \text{ V}/\mu\text{s}$ und Rail-to-Rail Fähigkeit aus. Versorgt werden kann er mit bis zu 12 V im Single-Supply, als auch im Dual-Supply Betrieb. [2]

Für den Aufbau werden nur Kondensstoren und Widerstandswerte der E12-Reihe gewählt.

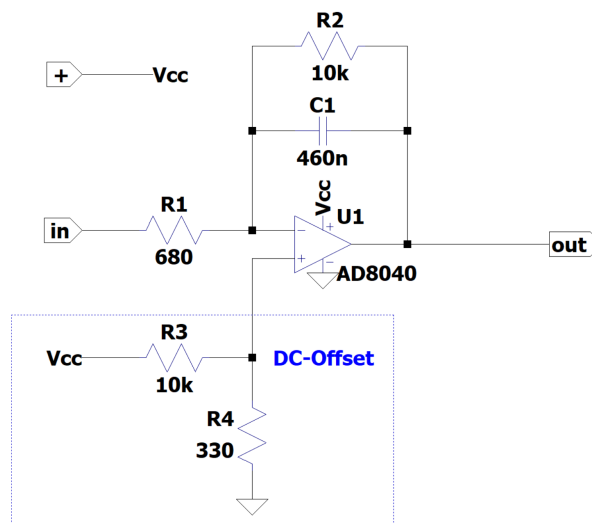


Abbildung 3.6: Dreieck-Signal

Nach ein paar Anpassungen konnte eine Periodendauer T von 0,6 ms gemessen werden. Dies entspricht einer Frequenz f von 1,67 kHz, welche für unsere Anwendung ausreichend ist. Eine höhere Frequenz würde nur einen höheren Simulationsaufwand bedeuten. Gängige Frequenzen zur Ansteuerung von Motoren liegen für gewöhnlich über 20 kHz, um außerhalb des Hörbereichs zu liegen. Die Simulation in Abbildung 3.7 zeigt die generierten Rechteck- und Dreieckssignale.

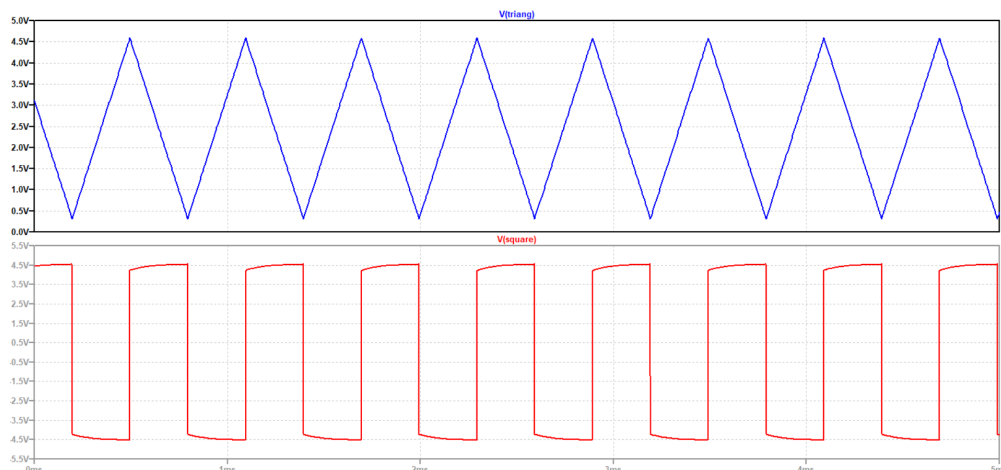


Abbildung 3.7: Rechteck- und Dreieck-Signal

3.2.2 PI-Regler

Der PI-Regler in Abbildung 3.8 nutzt ebenfalls den AD8040 mit einer Single-Supply. Um Bauteile zu sparen, erfolgt die PI-Regelung und der Vergleich mit demselben OPV. Dabei wird das Signal mit der Referenz verglichen. Ist das Signal größer als die Referenz sinkt der Ausgang zeitverzögert. Umgekehrt steigt der Ausgang. Die Reaktionszeit wird mit dem Kondensator $C1$ bestimmt. Je kleiner, desto schneller reagiert der PI-Regler auf Veränderungen. Ist dieser zu langsam, kommt es zu einem Overshot, der sehr lange zum Ausregeln braucht. Ist er zu schnell wirken sich auch Störungen auf die Regelung aus. [3]

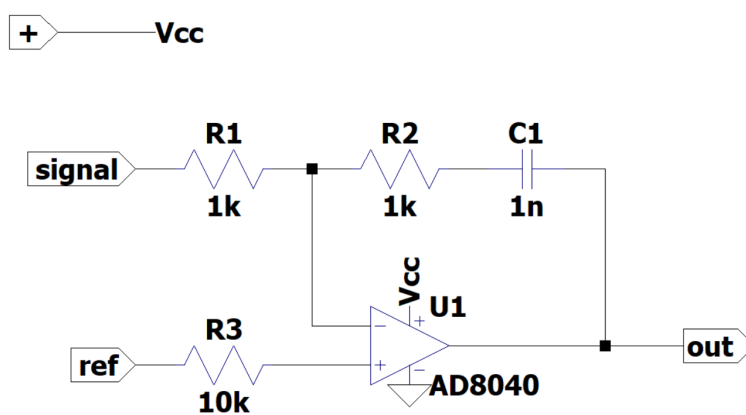


Abbildung 3.8: Schaltungsaufbau PI-Regler

3.2.3 Vergleicher

Die PWM-Generierung zur MOSFET-Ansteuerung erfolgt letztendlich mithilfe eines Komparators. Ersichtlich in Abbildung 3.9. Dazu wird der LT1716 von Analog Devices verwendet. Dieser ist geeignet für eine Versorgungsspannung von bis zu 44 V, welche für die MOSFET-Ansteuerung notwendig ist. [4]

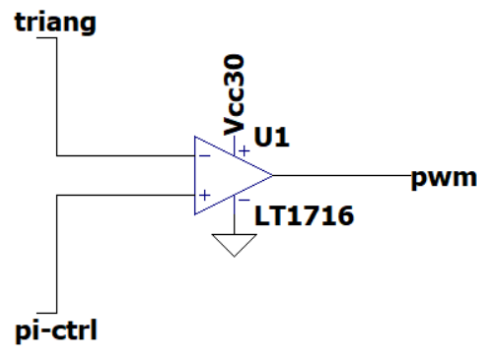


Abbildung 3.9: Schaltungsaufbau Vergleichler

3.3 SIMULATION

Verwendet man nun in Abbildung 3.4 anstatt der Dynamo-Spannung einen Sinus von 15 Hz mit einer Amplitude von 0,5 V und einem DC-Offset von 15 V lässt sich das Verhalten der Drehzahlregelung sehr schön beobachten.

Abbildung 3.10 zeigt die Simulation der Drehzahlregelung. Überschreitet die Sinusspannung, die Referenzspannung beginnt die Spannung des PI-Reglers abzusinken. Je nach Spannungswert am Ausgang des PI-Reglers hat dies Auswirkung auf den Duty-Cycle der PWM. Je weiter die Spannung des PI-Reglers wird, desto kleiner wird der Duty Cycle. Sinkt jedoch die Sinus-Spannung wieder unterhalb der Referenzspannung, wird wieder hochgeregelt.

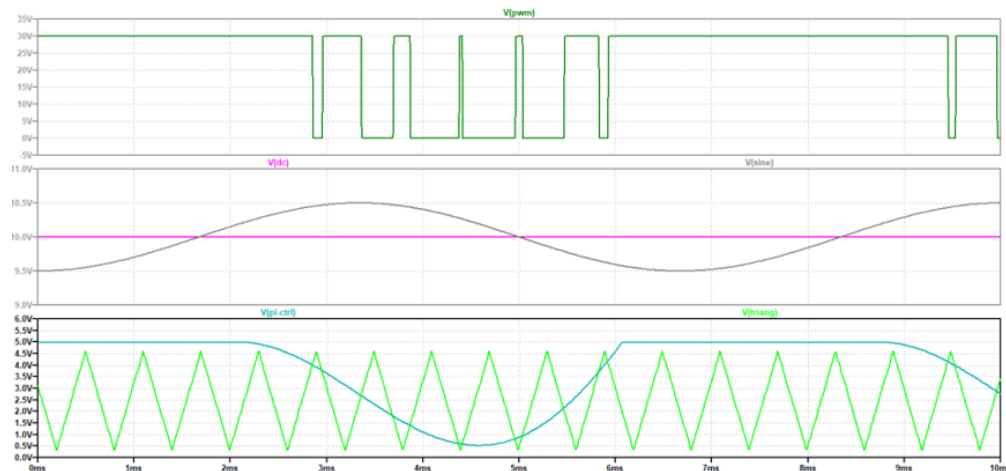


Abbildung 3.10: Simulation der Drehzahlregelung

4 Gesamte Schaltung

Die gesamte Schaltung wird wie in Abbildung 4.1 aufgebaut. Diese ist in drei Blöcke unterteilt. Der erste Block generiert das PWM-Signal, welches von der generierten Referenzspannung am Dynamo abhängig ist. Dieser Block ist für die Drehzahlregelung verantwortlich. Der zweite Block besteht aus der H-Brücke und ist für den Richtungswechsel verantwortlich. Dieser erzeugt die positive oder negative Spannung am Motoreingang, abhängig von der Zeit in dieser Simulation. Der dritte Block besteht aus dem Motor und den Dynamo, sowie Berechnungen der Leistungen.

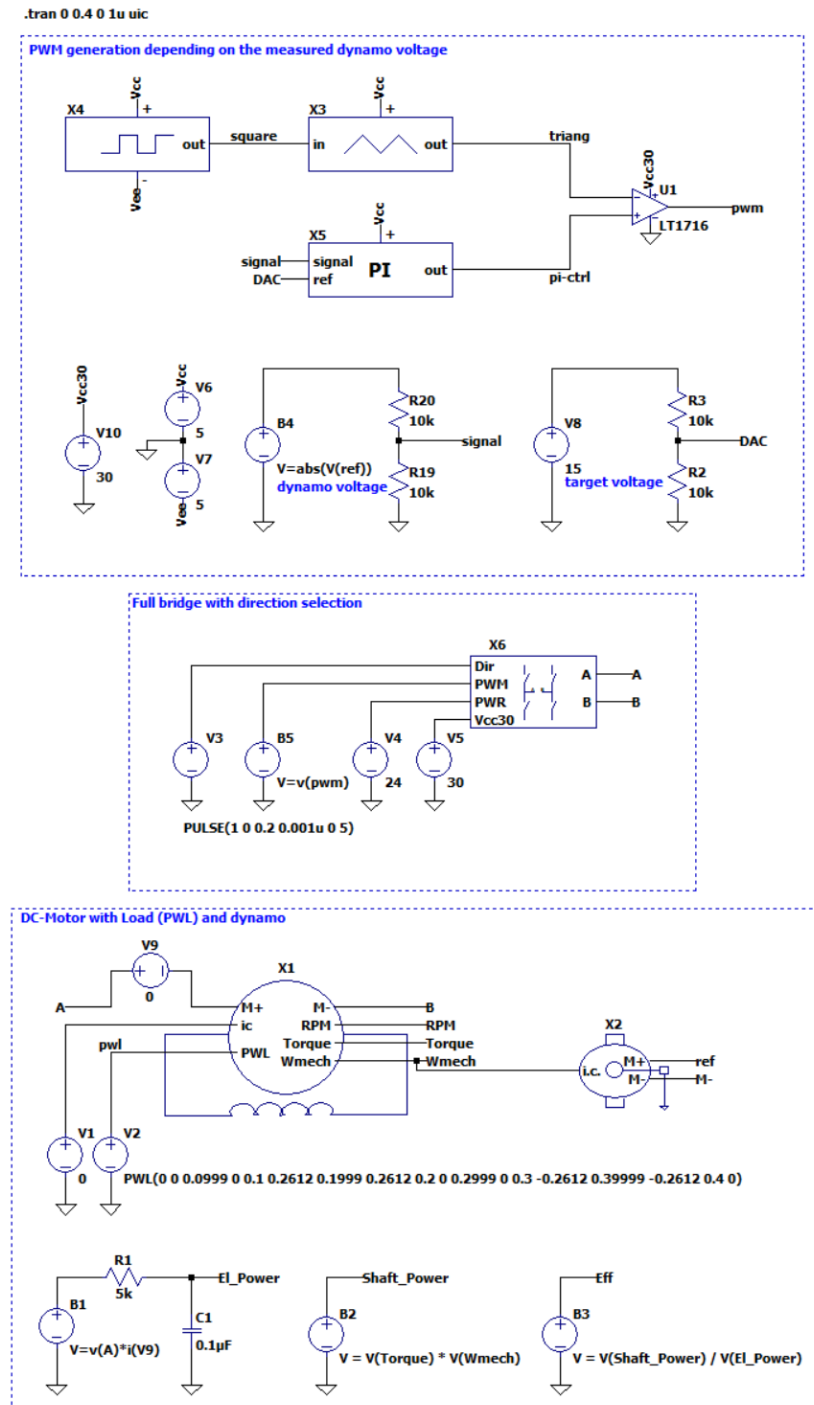


Abbildung 4.1: Gesamte Schaltung

Für die Simulation wird der Motor für 200 ms vorwärts betrieben, wobei nach 100 ms eine Last von ca. 26 Nm eingreift. Nach den 200 ms wird die Richtung gewechselt und die Last entfernt. Dieselbe Last wird dann wieder nach 100 ms in entgegengesetzter Richtung zugeschaltet. Der Motor wird auf 15 V ausgeregelt, was in etwa einer Drehzahl von 2000 Umdrehungen pro Minute entspricht.

In Abbildung 4.2 ist die Simulation der Gesamtschaltung abgebildet. Folgende Werte sind darin von oben nach unten dargestellt:

- Lastsprung in Nm
- Referenzspannung am Dynamo
- Drehzahl des Motors in rpm
- Dreieckssignal in hellblau und die PI-Regler Steuerung in dunkelblau
- Spannung $V(A, B)$ am Ausgang der H-Brücke / Eingang des Motors
- Geregeltetes PWM-Signal am Eingang der H-Brücke

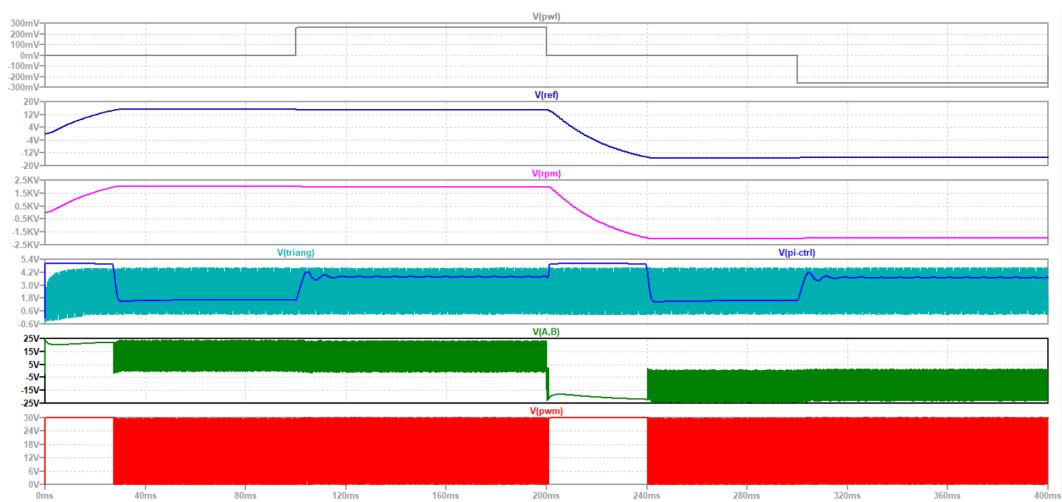


Abbildung 4.2: Simulation der gesamten Schaltung

Es lässt sich sehr schön erkennen wie der PI-Regler arbeitet. Während dieser zunächst voll aussteuert, lässt er den Motor auslaufen wenn die Drehzahl erreicht wird. Sobald die Last eintritt, regelt er nach und hält die Drehzahl konstant. Das Einschwingverhalten ist deutlich zu erkennen. Ab den Richtungswechsel erfolgt die Versorgung $V(A, B)$ in negativer Richtung, wodurch sich auch die Drehrichtung des Motors ändert und auf die negative Drehzahl geregelt wird. Auch hier ist das Einschwingen des PI-Reglers bei Lastenritt deutlich zu erkennen.

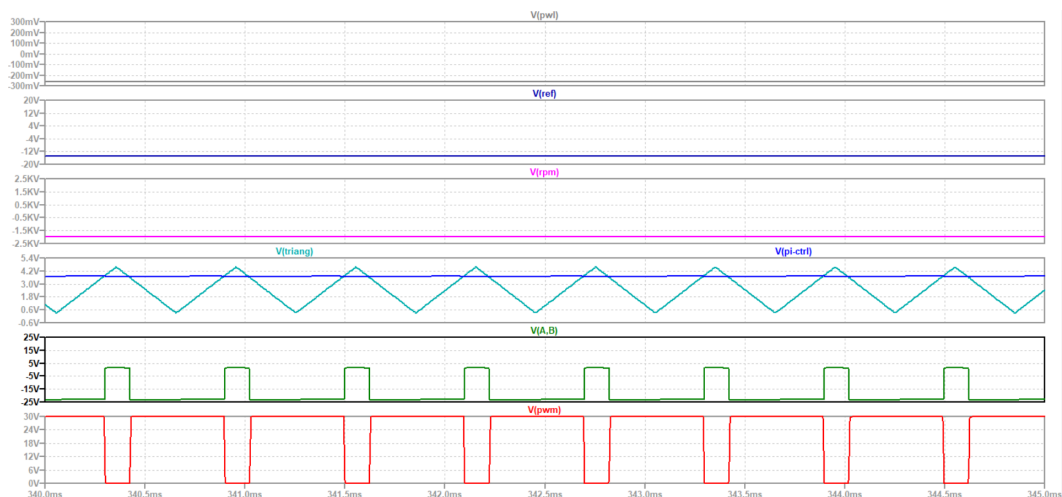


Abbildung 4.3: Simulation der gesamten Schaltung Ausschnitt

In Abbildung 4.3 wird der Abschnitt zwischen 340 und 345 ms genauer betrachtet. Dabei handelt es sich um den Steady State Zustand des DC-Motors bei negativer Drehrichtung und nach Lasteintritt. Es lässt sich eine Periodendauer $T = 0,6 \text{ ms}$ heraus messen. Die Einschaltzeit t_{on} beträgt $0,475 \text{ ms}$, was einem Duty Cycle von 79% entspricht. Es ist sehr schön zu erkennen, dass die PWM immer dann aktiv ist, wenn das generierte Dreieckssignal über der Referenzspannung vom Dynamo liegt.

Die weitere Simulation betrachtet den Strom und die dazugehörige Leistung in den entsprechenden Stufen. Aufgrund der sich ändernden Zustände erfolgt die Messung der Leistung über verhaltensbezogenen Spannungsquellen. Der Strom wird mithilfe einer idealen Spannungsquelle mit 0 V gemessen.

In Abbildung 4.4 werden die berechneten Leistungen betrachtet. Folgende Werte sind von oben nach unten aufgezogen:

- Lastsprung in Nm
- Spannung $V(A, B)$ am Ausgang der H-Brücke / Eingang des Motors
- Strom $I(V9)$ durch den Motor
- Wellenleistung (Shaft.Power) in W
- Elektrische Leistung (El.Power) in W
- Verhältnis Wellenleistung zu elektrischer Leistung

Es fällt auf, dass zu Beginn, bis der Sollzustand erreicht wird, das System eine hohe Stromaufnahme besitzt. Aufgrund der konstanten Spannung findet auch eine entsprechend hohe Leistungsaufnahme statt. Ist das System auf Drehzahl wird kaum noch Leistung aufgenommen, da noch keine Last aktiv ist. Erst wenn diese hinzu kommt, steigt der Strom leicht an. Beim Umschalten der Drehrichtung wird wieder viel Leistung umgesetzt bei einem maximalen Strom von 35 A . Auch die Wellenleistung hat hier einen deutlichen Peak. Dieses Verhalten ließe sich etwas zurückschrauben, wenn man vor dem Richtungswechsel den Motor erst auslaufen lässt.

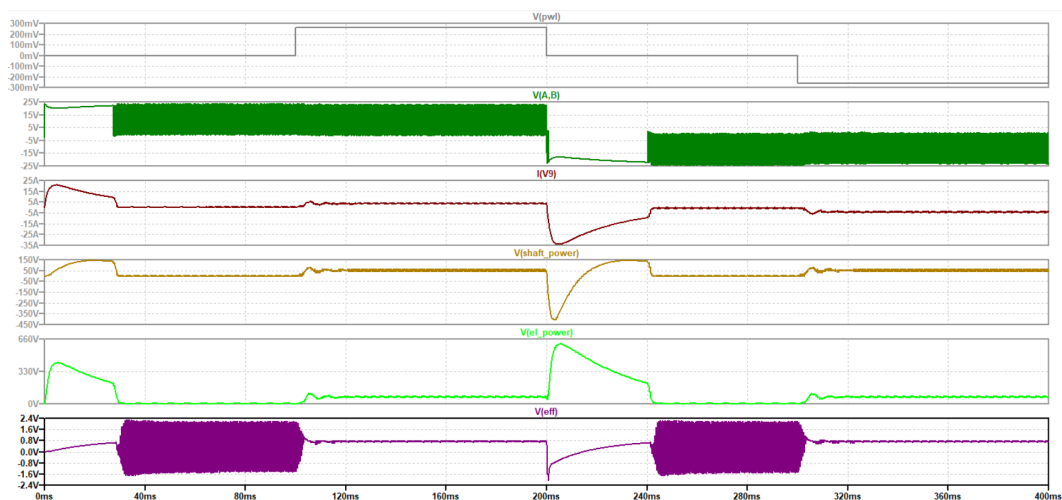


Abbildung 4.4: Simulation der gesamten Schaltung, Leistungen

Sieht man sich den Detailabschnitt zwischen 340 und 345 ms in Abbildung 4.5 an, erkennt man dass der Strom entsprechend der PWM schwankt. Dabei spricht man von einem Rippelstrom. Dieser liegt bei etwa $1,7 \text{ A}$. Die Wellenleistung setzt sich aus dem Produkt der Torque und W_{mech} zusammen. Diese bewegt sich bei 60 W herum. Die elektrische Leistung schwankt um 70 W herum.

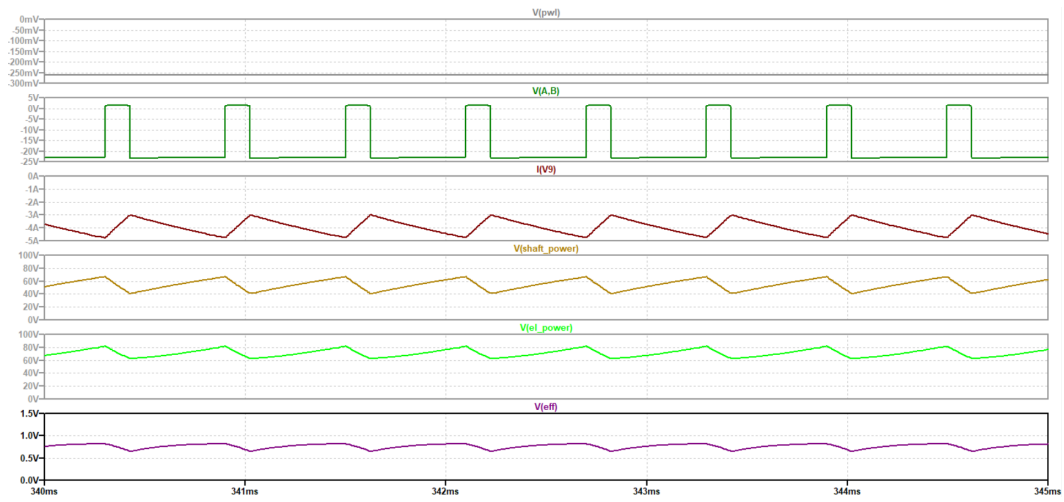


Abbildung 4.5: Simulation der gesamten Schaltung, Leistungen Abschnitt

5 Zusammenfassung

Mithilfe des errungenen Wissens aus Simulationsmethoden [5] konnte das Verhalten des DC-Motors mithilfe von wenigen Bauteilen deutlich verbessert werden. Die Last sorgt nicht mehr für einen Drehzahleinbruch, die Drehzahl lässt sich mittels Spannungswert einstellen und ein Richtungswechsel ist ebenfalls möglich.

Die Projektarbeit beschäftigte sich vor mit dem DC-Motor-Modell [6], welches letztendlich auch als Dynamo eingesetzt wurde. Weiters konnten Schalter, eine H-Brücke mit MOSFETs, Pulsweitenmodulation, Oszillatoren und Reglern mit OPVs realisiert und implementiert werden und decken so ein weites Spektrum ab.

Die größte Schwierigkeit stellte die OPV-Wahl dar. Erste Versuche der Rechteck-Generierung führten zu Dreiecks-Signalen da die Slew-Rate zu langsam war. Ebenfalls kritisch war die Ansteuerung der MOSFETs. Hier galt es vor allem Komponenten zu finden, welcher für 30 V spezifiziert sind. Hierfür eignete sich letztendlich der gewählte Komparator am besten.

Während der Großteil bereits aus realen Bauteilen besteht, gibt es dennoch Erweiterungspotential für einen realen Aufbau. Um auf die symmetrische Spannungsversorgung von $\pm 5\text{ V}$ zu verzichten, könnte die Generierung der Rechteckspannung für den Dreieck-Generator mithilfe einer PWM eines Microcontrollers erfolgen. Mithilfe eines DAC Ausgangs ließe sich die Drehzahl auch während dem Betrieb ändern. Die Drehrichtung könnte auch vom Microcontroller bestimmt werden. Möchte man auf die 30 V für die H-Brücken Ansteuerung verzichten, könnte man die beiden oberen n-Kanal MOSFETs mit p-Kanal MOSFETs ersetzen. Die Ansteuerung der p-Kanal MOSFETs erfolgt dann mittels Spannungsteiler und Open-Drain-Ausgang. Die Spannungsmessung am Dynamo wird derzeit mit einer verhaltensbezogenen Spannungsquelle gleichgerichtet. Hier ließe sich noch eine Gleichrichterschaltung umsetzen. In der Praxis würde man nichtsdestotrotz eher einen Encoder zur Messung verwenden.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Schaltungsaufbau des DC-Motors	1
1.2	Symbol der Motorschaltung	1
1.3	Simulation des DC-Motors	2
1.4	Richtungswechsel mit negativer Eingangsspannung	2
2.1	Vorwärtslaufen mit H-Brücke	3
2.2	Vorwärtslaufen mit H-Brücke	4
2.3	Rückwärtslaufen mit H-Brücke	4
2.4	Rückwärtslaufen mit H-Brücke	5
2.5	Steuerung der H-Brücke mit Switches	5
2.6	Steuerung der H-Brücke mit Switches	6
3.1	Schaltungsaufbau Dynamo	7
3.2	Symbol Dynamo	7
3.3	Simulation Dynamo	8
3.4	Schaltungsaufbau Drehzahlregler	8
3.5	Rechteck-Signal	9
3.6	Dreieck-Signal	9
3.7	Rechteck- und Dreieck-Signal	10
3.8	Schaltungsaufbau PI-Regler	10
3.9	Schaltungsaufbau Vergleicher	11
3.10	Simulation der Drehzahlregelung	11
4.1	Gesamte Schaltung	12
4.2	Simulation der gesamten Schaltung	13
4.3	Simulation der gesamten Schaltung Ausschnitt	13
4.4	Simulation der gesamten Schaltung, Leistungen	14
4.5	Simulation der gesamten Schaltung, Leistungen Abschnitt	15

Literaturverzeichnis

- [1] [Online]. <https://www.eeeguide.com/triangular-wave-generator-using-op-amp/>, Abruf am 12.07.2021.
- [2] Analog Devices, *AD8040 - Low Power, High Speed, Rail-to-Rail Input/Output Amplifier - Datasheet*, 2012.
- [3] [Online]. <https://rn-wissen.de/wiki/index.php/Regelungstechnik#PI-Regler>, Abruf am 12.07.2021.
- [4] Analog Devices, *LT1716 - SOT-23, 44V, Over-the-Top, Micropower, Precision, Rail-to-Rail Comparator - Datasheet*, 2019.
- [5] Andreas Albrecht, Maurizio Incurvati, "Simulation Methods, 4th Semester Bachelor," MCI, 2021.
- [6] [Online]. <http://www.kappaiq.com/>, Abruf am 12.07.2021.