

2 Grundlagen

Die Grundlagen für die weitere Arbeit umfassen eine kurze Einführung in die Funktionsweise eines Pulswechselrichters, die im Betrieb anfallenden Verlustleistungen und die daraus resultierende Notwendigkeit der Temperaturüberwachung. Hierfür werden auch alternative Methoden kurz erläutert und die in dieser Arbeit zentrale Methode, die beobachterbasierte Temperaturüberwachung, im Detail eingeführt. Abgeschlossen wird dieses Kapitel mit der Beschreibung des Versuchsträgers, der für die Durchführung der Experimente verwendet wurde.

2.1 Pulswechselrichter

Aufgabe eines Wechselrichters ist die Wandlung zwischen Gleichspannung und Wechselspannung. Im elektrischen Antriebsstrang eines Fahrzeugs stellt er damit die Verbindung zwischen Hochvolt-Traktionsbatterie und elektrischer Maschine dar [94].

Funktionsweise

Wechselrichter mit dreiphasigem Ausgang können durch verschiedene Schaltungstopologien realisiert werden [58]. Der in dieser Arbeit verwendete Wechselrichter basiert auf einer Brückenschaltung, wie sie in Abbildung 2.1 dargestellt ist.

Dabei ist U_{dc} die Gleichspannungsquelle und jeweils zwei Leistungsschalter (Transistoren, beispielsweise S_1 und S_2) mit den zugehörigen Freilaufdioden stellen eine Halbbrücke dar. Die Schaltelemente, Transistor und Diode, mit Anbindung an den Pluspol werden als HighSide-Schalter bezeichnet, diejenigen mit Anbindung an den Minuspol entsprechend LowSide-Schalter [12]. Diese Schaltung hat für viele praktische Anwendungen die größte Bedeutung [58].

Durch eine geeignete Ansteuerung der Schalter S_1 bis S_6 wird am Ausgang des Wechselrichters ein sinusförmiger Spannungsverlauf erzeugt, der sich für den

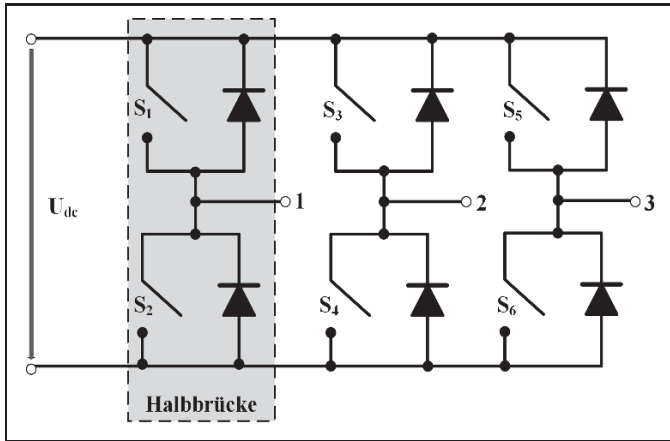


Abbildung 2.1: Aufbau eines dreiphasigen Wechselrichters in Brückenschaltung.

Betrieb einer an die Ausgänge 1, 2, 3 angeschlossenen elektrischen Maschine eignet. Häufig wird für die Ansteuerung ein pulsweitenmoduliertes (PWM) Signal verwendet [74].

Verlustleistung

Als Verlustleistung wird die als Wärme umgesetzte Leistung beschrieben [56]. Sie entspricht der Differenz zwischen aufgenommener und abgegebener Leistung [91]. Im motorischen Betrieb, wenn die elektrische Maschine das Fahrzeug antreibt bzw. beschleunigt, ist die Verlustleistung des Wechselrichters durch die Differenz zwischen der von der Hochvoltbatterie aufgenommenen und der an die elektrische Maschine abgegebenen Leistung beschrieben. Umgekehrt kann der elektrische Antriebsstrang auch zum Bremsen des Fahrzeugs verwendet werden. Dabei wird die elektrische Maschine als Generator angesteuert, der die Bewegungsenergie des Fahrzeugs wiederum in elektrische Energie umwandelt [66]. Die Energie fließt dann über den Wechselrichter, der in dieser Situation die Funktion eines Gleichrichters übernimmt, zurück in die Batterie und lädt diese. In beiden Fällen, motorischer und generatorischer Betrieb, fällt der Großteil der Verlustleistungen in den Leistungshalbleitern (Transistoren und Dioden) des Wechselrichters an [58] und führt dort zu einer starken Erwärmung der Bauelemente. Für modellbasierte Temperaturüberwachung beschreiben die im Betrieb entstehenden Verlustleistungen den Eingang

der thermischen Modelle. Die Verlustleistungen hängen dabei im Wesentlichen von der Spannung am Halbleiter und der Stromstärke durch den Halbleiter ab [58]. Zu den weiteren Einflussgrößen zählen der Leistungsfaktor ($\cos(\phi)$), der Modulationsgrad, die Ansteuerfrequenz und die elektrische Frequenz f_{el} des Ausgangsstroms [90]. Da die konkrete Berechnung der Verlustleistung kein essenzieller Bestandteil dieser Arbeit ist, wird an dieser Stelle auf [90] verwiesen. Nur der Einfluss der elektrischen Frequenz f_{el} , der sich wesentlich auf die notwendige Komplexität der thermischen Modellbildung auswirkt, wird ausführlicher betrachtet.

Abbildung 2.2 zeigt, wie sich ein normierter, sinusförmiger Ausgangsstrom einer Halbbrücke auf die einzelnen Elemente der Brückenschaltung verteilt.

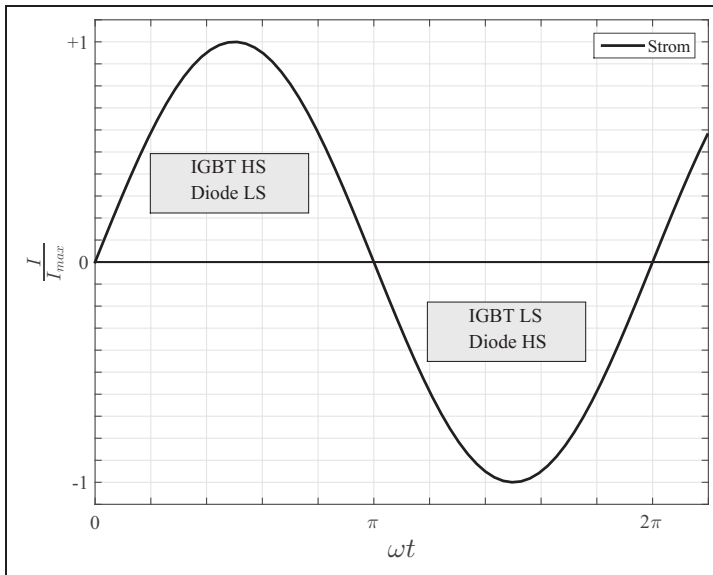


Abbildung 2.2: Normierter, sinusförmiger Stromverlauf am Phasenanschluss eines einzelnen Halbbrückenmoduls.

In der positiven Halbperiode fließt der Strom I über HighSide-IGBT und LowSide-Diode zur elektrischen Maschine und umgekehrt in der negativen Halbperiode über LowSide-IGBT und HighSide-Diode. Der zugehörige normierte Verlustleistungsverlauf der HighSide-IGBT bzw. LowSide-Diode in der positiven Halbwelle ist in Abbildung 2.3 dargestellt.

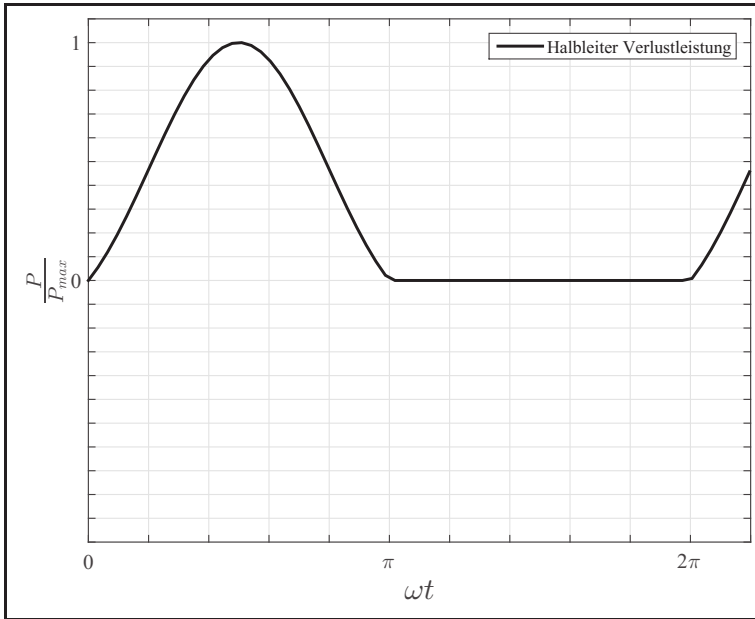


Abbildung 2.3: Normierter Verlauf der Verlustleistungen P von HighSide-IGBT bzw. LowSide-Diode während einer Periode bezogen.

Für die Halbleiter bedeutet dieser Verlauf der Verlustleistungen, dass die Temperatur in den aktiven Halbperioden steigt und in den inaktiven Halbperioden sinkt [58]. Jedoch wirkt die thermische Kapazität des Halbbrückenmoduls wie ein Tiefpassfilter auf den Temperaturverlauf [68]. Bei hinreichend hoher elektrischer Frequenz f_{el} geht die Amplitude dieser Temperaturosillationen ΔT folglich gegen 0 und es stellt sich eine konstante stationäre Halbleitertemperatur T_{stat} ein. Abbildung 2.4 zeigt einen entsprechenden Temperaturverlauf bei beispielsweise $f_{el} = 100\text{Hz}$, wenn die Halbleitererwärmung durch eine geeignete Sprungantwort abgeschätzt wird.

Es ist zu erkennen, dass nach Beginn der Belastung die Temperatur im Halbleiter steigt und sich asymptotisch einer stationären Temperatur T_{stat} nähert.

Bei sehr kleinen elektrischen Frequenzen ändert sich der Temperaturverlauf. Da die Periodendauer länger wird, steigen die Temperaturen der aktiven Bauteile merklich an und kühlen sich in der inaktiven Halbperiode entsprechend

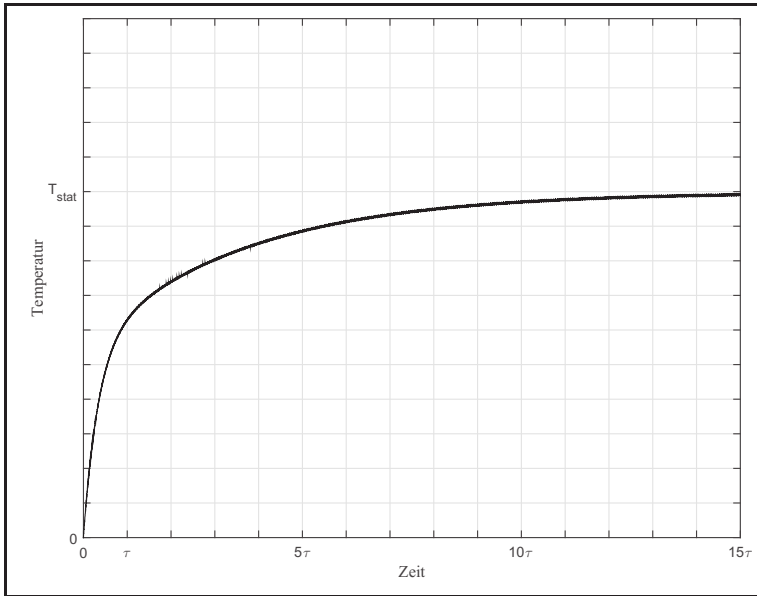


Abbildung 2.4: Sprungantwort bei $f_{el} = 100\text{Hz}$.

ab. Es stellt sich folglich eine Überlagerung eines periodischen Temperaturverlaufs und eines Anstiegs der mittleren Temperatur ein. Abbildung 2.5 zeigt einen beispielhaften Verlauf bei $f_{el} = 1\text{Hz}$.

Aus den Temperaturverläufen für verschiedene Frequenzen kann so der in Abbildung 2.6 dargestellte Amplitudengang abgeleitet werden, aus dem für einen vorgegebenen Lastpunkt die zugehörige periodische Belastung des Halbleiters abgeleitet werden kann.

Wenn davon ausgegangen werden kann, dass im Wesentlichen Temperaturamplituden oberhalb einer definierten Schwelle (beispielsweise $> 3\text{K}$ [38]) relevant für die Lebensdauerbelastung des Leistungsmoduls sind, kann aus der maximalen Verlustleistung P_{max} und dem Amplitudengang eine Grenzfrequenz f_g bestimmt werden. Im Betrieb oberhalb der Grenzfrequenz f_g sind die Temperaturoszillationen vernachlässigbar klein. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird dieser Fall $f_{el} > f_g$ als symmetrisch verteilte Verlustleistungen bezeichnet, der eine gewisse Vereinfachung des Temperaturmodells erlaubt. Bei kleineren Frequenzen mit $f_{el} < f_g$ (beispielsweise $< 60\text{ Hz}$ [10]) resultieren die asymmetrisch verteilten Verlustleistungen in merklich oszillierenden Temperaturam-

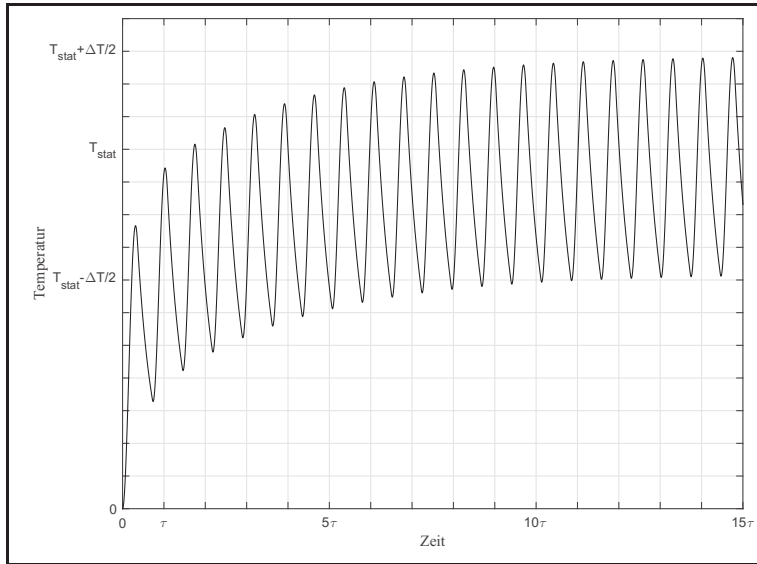


Abbildung 2.5: Sprungantwort bei $f_{el} = 1 \text{ Hz}$.

plituden und müssen im Rahmen der Temperaturüberwachung entsprechend berücksichtigt werden.

Für beide Fälle gilt, dass die Berechnung der jeweiligen Verlustleistung ebenso wie die Berechnung der Temperaturen echtzeitfähig sein muss. Häufig werden hierfür Kennfelder eingesetzt, die die Verluste an Hand der eingangs aufgelisteten Einflussgrößen bestimmen [49, 50, 96].

Motivation Temperaturüberwachung

Das vorrangige Ziel der Temperaturüberwachung des Wechselrichters ist der Schutz vor kritischen Überlastsituationen, die zu einer vorzeitigen Alterung oder unmittelbaren Schädigung der Komponente führen können [65]. Insbesondere müssen die Sperrschichttemperaturen der Leistungshalbleiter während des Betriebs unterhalb der spezifizierten Grenzen, z.B. 150°C [42], gehalten werden, um die Kurzschlussfestigkeit zu gewährleisten.

Des Weiteren trägt die Temperaturüberwachung zur Einhaltung der Zuverlässigkeitsziele über Lebensdauer bei, in dem nicht nur die bereits genannte Maxi-

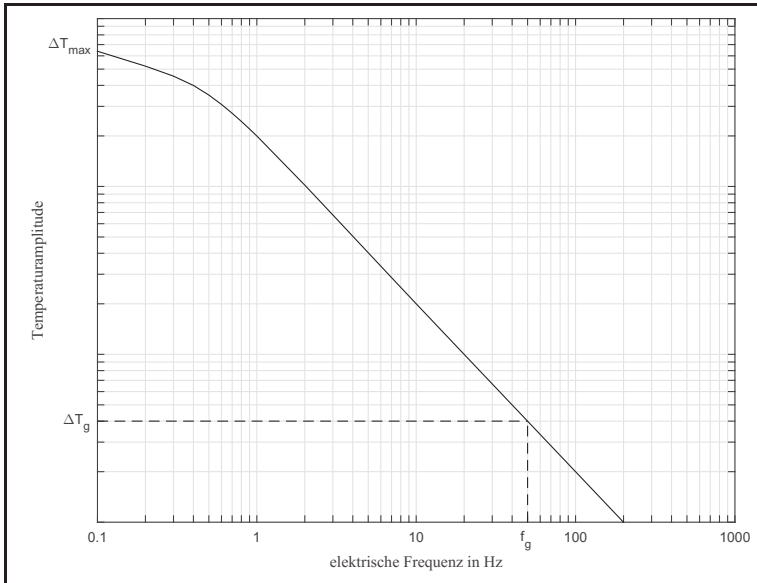


Abbildung 2.6: Zusammenhang zwischen Temperaturamplitude und elektrischer Frequenz.

maltemperatur der Halbleiter, sondern auch die mittlere Temperatur der Halbleiter und die Temperaturdifferenz zwischen Halbleiter und Kühler [92] überwacht werden. Letztere führt zu thermo-mechanischen Spannungen zwischen den einzelnen Bauteilen bzw. innerhalb der Aufbau- und Verbindungstechnik [56].

Erkennt die Temperaturüberwachung einen kritischen Zustand, können entsprechende Schutzmaßnahmen eingeleitet werden. Eine Möglichkeit bietet z.B. die Reduktion der Halbleiterverluste, in dem die Schaltfrequenz des Wechselrichters (vorübergehend) reduziert wird [10]. Diese Vorgehensweise bietet zwar den Vorteil, dass die angeforderte Ausgangsleistung des Wechselrichters aufrecht erhalten bleibt, allerdings erhöht die geringere Schaltfrequenz die Verlustleistung der elektrischen Maschine [46]. Eine weitere Möglichkeit, Halbleiterverluste zu reduzieren und damit die Lebensdauer zu erhöhen, bietet die Verwendung von speziellen Ansteuerverfahren [85, 86, 87, 88, 89]. Reichen diese Maßnahmen nicht aus, um die Temperaturen auf ein unkritisches Niveau zu senken, kann in einem weiteren Schritt der Ausgangsstrom des Wechselrichters beschränkt werden, was einer Leistungsbegrenzung des Antriebsstrangs

gleichkommt und damit einer Begrenzung der Verfügbarkeit [10]. Fortwährend kritische Temperaturen würden dann schließlich zur Abschaltung des Wechselrichters führen.

2.2 Stand der Technik - Alternative Methoden der Temperaturüberwachung

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über Methoden, die für die Temperaturüberwachung eines Wechselrichters eingesetzt werden können. Neben der direkten Messung der relevanten Temperaturen, wird eine indirekte Berechnung der Temperaturen mit Hilfe von temperaturabhängigen Halbleitereigenschaften erläutert. Abschließend wird der Einsatz von thermischen Kompaktmodellen beschrieben. Im Wesentlichen ist die beobachterbasierte Temperaturüberwachung, die im Fokus der Arbeit steht, eine Kombination aus thermischen Kompaktmodellen und Sensoren. Sie bedient sich somit aus zwei der im Folgenden vorgestellten Methoden.

Sensoren

Grundsätzlich könnte für die Erfassung der relevanten Temperaturen eine Vielzahl von Temperatursensoren verwendet werden. Für den in Abbildung 2.1 dargestellten Wechselrichter könnten beispielsweise 12 Temperatursensoren (1 je Bauelement) eingesetzt werden oder Halbleiter mit integrierten Temperatursensoren [36]. Ein solcher Ansatz ist natürlich nicht realitätsnah, da sowohl die Kosten für Sensoren und Auswertung sehr hoch wären, als auch der Verdrahtungsaufwand innerhalb und außerhalb der Module deutlich steigen würde. Des Weiteren sind manche Orte innerhalb des Wechselrichters nur schwer oder gar nicht zugänglich und machen damit eine direkte Temperaturerfassung unmöglich [7]. Kann ein Sensor nur *in der Nähe* eines temperaturkritischen Bauteils platziert werden, so muss zusätzlich die zeitliche Verzögerung zwischen Bauteil und Sensor berücksichtigt werden [79]. Grundsätzlich könnte diese Methode zwar bei großen Anlagen Anwendung finden, ist aber für einen kompakten Wechselrichter eher nicht praxisrelevant.

Temperaturbestimmung durch temperaturabhängige Halbleitereigenschaften

Die Nutzung von temperaturabhängigen Halbleitereigenschaften ergibt eine weitere Möglichkeit, relevante Temperaturen zu bestimmen [5]. Bei dieser Vorgehensweise werden die Halbleiter selbst als Temperatursensoren genutzt. Zu den temperaturabhängigen Eigenschaften der Halbleiter zählen beispielsweise der Spannungsabfall von Kollektor nach Emitter U_{ce} für einen bestimmten Strom, die Schwellenspannung des Gates, die Durchbruchsspannung und die maximale Änderung der Stromstärke [6]. Außerdem ist die Ein-/ Ausschaltzeit der Halbleiter temperaturabhängig [6, 15].

In [93] wird der Spannungsabfall U_{ce} im leitenden Zustand des IGBTs erfasst, um auf die Temperatur zu schließen. Hierfür sind zusätzliche Schaltungsaufwände zur Messung des Spannungsabfalls notwendig sowie eine entsprechende Kennlinie oder Funktion, die den Zusammenhang zwischen Spannungsabfall und Halbleitertemperatur beschreibt. Dieses Verfahren kommt z.B. bei der Temperaturüberwachung von Leistungsmodulen in Windkraftanwendungen zum Einsatz [33]. Es kann aber auch in Versuchen zur Lebensdauerevaluation [78] bzw. in Kombination mit einem speziellen Testpulsverfahren zur Lebensdauermodellierung [69] von Halbleitern in industriellen Anwendungen eingesetzt werden. Die auf diese Weise geschätzten Halbleitertemperaturen werden in [25, 26] verwendet, um mit Hilfe eines Kalmanfilters das thermische Verhalten der Leistungsmodule bezüglich Alterung und Degradation zu analysieren.

Nachteilig für die Anwendung des Verfahrens ist, dass die Spannung U_{ce} und damit die Temperatur nicht zu jedem beliebigen Zeitpunkt, sondern nur während der z.T. sehr kurzen leitenden Zustände der Halbleiter im PWM-Takt erfasst werden kann [93]. Zusätzlich ist der gemessene Spannungsabfall sehr störempfindlich, da er, je nach Einsatzgebiet der Halbleiter, im leitenden Zustand wenige mV beträgt gegenüber mehrerer kV im Sperrzustand [93] und zudem abhängig vom Strom durch den Halbleiter ist.

Thermische Kompaktmodelle

Eine breite Klasse an Methoden basiert auf dem Ansatz, das thermische Verhalten der Halbleiter bzw. der Leistungsmodule durch thermische Kompaktmo-

delle abzubilden, die gegenüber räumlich und zeitlich hochaufgelösten Finite-Element-Methode (FEM) Simulationen (vgl. ANSYS [1], COMSOL [18]) oder faltungsbasierten Ansätzen [70] einen deutlich geringeren Rechenaufwand aufweisen. Die Abbildung der Kompaktmodelle erfolgt häufig durch thermische Ersatznetzwerke mit thermischen Widerständen und thermischen Kapazitäten [60]. Durch eine Kopplung mit den entsprechenden elektrischen Modellen, z.B. PSpice [17] oder Saber [72], eignen sich die Modelle auch zur gekoppelten Simulation von elektrischem und thermischem Verhalten [54].

Für die Bestimmung der Halbleitertemperaturen werden die anfallenden Verlustleistungen berechnet und als Eingangsgröße für die Simulation der thermischen Kompaktmodelle verwendet. Der daraus errechnete Temperaturanstieg der Halbleiter wird anschließend zu einer gemessenen Temperatur des Kühlmediums bzw. der Umgebung addiert, um die absolute Halbleitertemperatur zu bestimmen [10, 31, 63, 96]. Werden mehrere Halbleiter innerhalb eines Leistungsmoduls thermisch belastet, muss bei der Verwendung von Kompaktmodellen der Einfluss der gegenseitigen Erwärmung der Halbleiter auf geeignete Weise berücksichtigt werden [29, 49, 50]. Die Parametrierung der Kompaktmodelle kann einerseits aus den physikalischen Größen der modellierten Komponente oder aus Messungen bestimmt werden [43].

Neben dem Einsatz zur echtzeitfähigen Temperaturüberwachung finden thermische Kompaktmodelle auch Anwendung in der Entwicklungsphase von Leistungsmodulen [16, 21, 37, 75]. Die kompakte Struktur ermöglicht gegenüber FEM-Simulationen eine deutlich schnellere Berechnung der Temperaturverläufe für unterschiedliche Lastprofile. Unter Verwendung von Lebensdauermodellen kann so untersucht werden, ob sich ein bestimmter Entwurf des Leistungsmoduls für den vorgesehenen Einsatz eignet oder ob das Risiko eines vorzeitigen Ausfalls besteht.

Alternativ zur Modellbildung mit Hilfe von thermischen Netzwerken gibt es als neue Methode Ansätze zur Modellordnungsreduktion (MOR) Verfahren von FEM-Modellen, um das Ein-/Ausgangsverhalten in eine kompakte Form zu überführen [2, 3, 19, 28, 64]. Nachteilig ist hierbei, dass die inneren Zustände des Modells ihre physikalische Interpretierbarkeit verlieren. Diese Information könnte aber beispielsweise genutzt werden, um bei einer beobachterbasierten Temperaturüberwachung das Einschwingverhalten einzelner innerer Zustände bestimmen zu können.

2.3 Beobachterbasierte Temperaturüberwachung

Im Fokus dieser Arbeit steht die beobachterbasierte Temperaturüberwachung, die ebenfalls auf thermische Kompaktmodelle aufbaut. Ein Beobachter im regelungstechnischen Sinn ist ein System zur Rekonstruktion von nicht messbaren Zustandsgrößen [53]. Innerhalb des Pulswechselrichters ist eine Vielzahl von Temperaturen zu überwachen. Um die Anzahl an Sensoren und somit Kosten so gering wie möglich zu halten, werden nur wenige Temperaturen direkt gemessen. Die verbleibenden nicht messbaren Temperaturen können unter bestimmten Voraussetzungen mit Hilfe eines Beobachters rekonstruiert bzw. geschätzt werden.

Dieser Abschnitt erläutert neben der Zustandsraumdarstellung, die für den Entwurf des Beobachters besonders geeignet ist, das Beobachterprinzip, das notwendige Kriterium der Beobachtbarkeit und den Beobachterentwurf. Abschließend wird erklärt, wie die Kühlwassertemperatur als Störgröße im Modell berücksichtigt werden kann.

Zustandsraumdarstellung

Die Zustandsraumdarstellung ist eine weitverbreitete Möglichkeit zur Beschreibung von dynamischen Systemen im Zeitbereich. Sie nutzt die Eigenschaft, dass jede Differenzialgleichung n -ter Ordnung in ein System von n 1-dimensionalen Differenzialgleichungen überführt werden kann [55]. Im Zustandsraum werden die Eingangsgrößen, Ausgangsgrößen und Zustandsgrößen als zeitlich veränderliche Vektoren $u(t), y(t), x(t)$ dargestellt. Ist das betrachtete System kontinuierlich und linear zeitinvariant, erfolgt die Darstellung anhand der Dynamikgleichung

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad \text{Gl. 2.1}$$

und der Ausgangsgleichung

$$y(t) = Cx(t) + Du(t). \quad \text{Gl. 2.2}$$

Bei einem System mit n Zuständen, m Eingangsgrößen und r Ausgangsgrößen sind die Vektoren und Matrizen folgendermaßen definiert:

- $x(t)$ Zustandsvektor, $x(t) \in \mathbb{R}^n$
- $\dot{x}(t)$ Ableitung des Zustandsvektors, $\dot{x}(t) \in \mathbb{R}^n$

- $u(t)$ Eingangsvektor, $u(t) \in \mathbb{R}^m$
- $y(t)$ Ausgangsvektor, $y(t) \in \mathbb{R}^r$
- A Systemmatrix/Dynamikmatrix, $\dim(A) = n \times n$
- B Eingangsmatrix, $\dim(B) = n \times m$
- C Ausgangsmatrix, $\dim(C) = r \times n$
- D Durchgriffsmatrix, $\dim(D) = r \times m$

Die thermischen Modelle dieser Arbeit werden ausschließlich in dieser Form dargestellt, wobei der Zustandsvektor $x(t)$ die modellierten Temperaturen enthält. Die Eingangsgrößen in $u(t)$ beschreiben die Verlustleistungen und die Ausgangsgrößen $y(t)$ sind definiert als alle messbaren Größen des Systems, d.h. alle Temperatursensoren. Zur vereinfachten Darstellung der zeitkontinuierlichen Modelle werden folgende Definitionen eingeführt:

$$x := x(t) \quad \text{Gl. 2.3}$$

$$\dot{x} := \dot{x}(t) \quad \text{Gl. 2.4}$$

$$u := u(t) \quad \text{Gl. 2.5}$$

$$y := y(t) \quad \text{Gl. 2.6}$$

Somit werden die Gleichungen 2.1 und 2.2 zu

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad \text{Gl. 2.7}$$

$$y = Cx + Du. \quad \text{Gl. 2.8}$$

In dieser Arbeit werden die Modelle in der Regel zeitkontinuierlich dargestellt; nur bei der Identifikation der Wärmekapazitäten und zur Bestimmung des Rechenaufwands werden zeitdiskrete Modellbeschreibungen benötigt, worauf gesondert hingewiesen wird.

Beobachterprinzip

Das Beobachterprinzip basiert auf einer Simulation des Modells mit fortlaufender Korrektur, indem die Abweichung eines oder mehrerer messbarer Ausgänge als gewichtete Korrektur zurückgeführt wird. Abbildung 2.7 zeigt ein Blockschaltbild eines Beobachters [95].

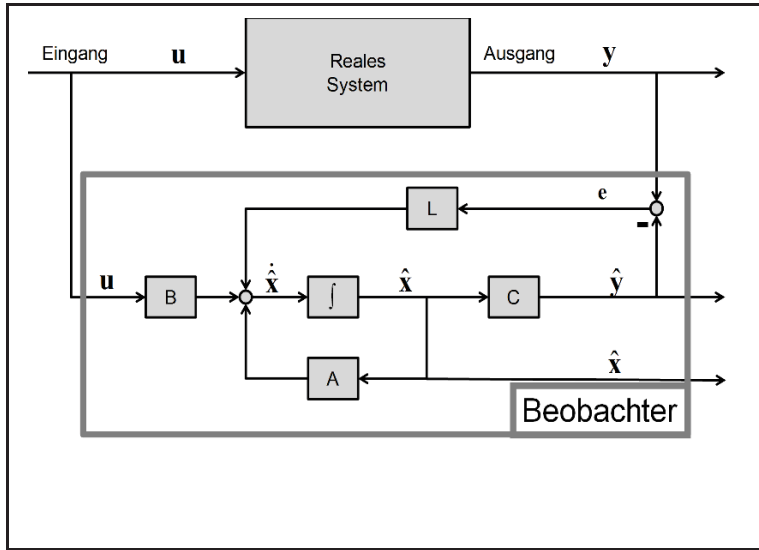


Abbildung 2.7: Blockschaltbild eines Luenberger Beobachters.

Die Matrizen A , B und C beschreiben den Simulationsteil gemäß den Definitionen aus der Zustandsraumdarstellung. Neben dem geschätzten Zustandsvektor $\hat{x}$ wird auch der geschätzte Ausgangsvektor $\hat{y}$ bestimmt, wobei „ $\hat{}$ “ die vom Beobachter geschätzten Zustandsgrößen kennzeichnet. Dieser wird kontinuierlich mit dem gemessenen Ausgangsvektor y des realen Systems verglichen. Die Differenz aus geschätztem und gemessenem Ausgangsvektor definiert den Beobachterfehler e :

$$e = y - \hat{y}. \quad \text{Gl. 2.9}$$

Zur Korrektur der Simulation wird der Beobachterfehler mit der Matrix L multipliziert und zurückgeführt, so dass sich für die resultierende Beobachterdynamik folgende Gleichung ergibt:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y}). \quad \text{Gl. 2.10}$$

Aus dieser Gleichung kann unter Zuhilfenahme der Dynamikgleichung aus 2.1 die Dynamikgleichung des Schätzfehlers $x - \hat{x}$

$$\dot{x} - \dot{\hat{x}} = (A - LC) \cdot (x - \hat{x}) \quad \text{Gl. 2.11}$$

hergeleitet werden. Sie bestimmt das Einschwing- und Stabilitätsverhalten des Beobachters bei Störungen bzw. Modellunsicherheiten [55]. Die Matrizen A

und C sind durch das verwendete Modell definiert und die Rückführmatrix L wird so bestimmt, dass der Schätzfehler $(x - \hat{x})$ ein asymptotisch stabiles Einschwingverhalten beschreibt. Voraussetzung ist jedoch das Kriterium der Beobachtbarkeit [55], das im nächsten Abschnitt vorgestellt wird.

Beobachtbarkeit

Als notwendige Bedingung für den Einsatz eines Beobachters ist zu prüfen, ob das zu verwendende Modell als beobachtbar klassifiziert werden kann [55]. Ein System ist genau dann beobachtbar, wenn aus den gemessenen Ausgangsgrößen unter Verwendung der Eingangsgrößen alle Systemzustände bestimmt werden können [55]. Für ein lineares zeitinvariantes System mit der Dynamikmatrix A und der Ausgangsmatrix C ist die Beobachtbarkeit nachgewiesen, wenn die sogenannte Beobachtbarkeitsmatrix O (engl.: observability) aus Gleichung 2.12 vollen Rang hat [55].

$$O = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 2.12}$$

Nach Prüfung dieser Bedingung kann der Beobachter gemäß folgendem Prinzip komplettiert werden.

Beobachterentwurf

Die Bestimmung der Rückführmatrix L ist vergleichbar mit dem Entwurf eines Zustandreglers, bei dem die Werte der Rückführmatrix durch Polvorgabe so bestimmt werden, dass die resultierende Fehlerdynamik des Beobachters gemäß Gleichung 2.11 stabil ist [55]. Hierbei ist im Allgemeinen zu beachten, dass die Fehlerdynamik schneller sein soll als die Dynamik der zu beobachtenden Strecke [53].

Eine andere weitverbreitete und auch in dieser Arbeit verwendete Methode ist die Bestimmung der Rückführmatrix L durch Ansätze aus der optimalen Rege-

lung [95], um einen optimalen Beobachter zu entwerfen [95]. Ziel ist es, ein skalar quadratisches Gütekriterium J_{beob} zu minimieren:

$$J_{beob} = \int_0^{\infty} (x - \hat{x})^T \cdot W \cdot (x - \hat{x}) \, dt, \quad \text{Gl. 2.13}$$

wobei für W eine positiv semidefinite Gewichtungsmatrix gewählt wird, die zumeist die Form einer Diagonalmatrix hat. Durch die Gewichtsmatrix wird das Einschwingverhalten der einzelnen Zustände vorgegeben. Je größer der Gewichtungsfaktor auf der Diagonalen, desto kürzer ist die Einschwingzeit des entsprechenden Zustands. Bei der Wahl von W sollte jedoch beachtet werden, dass zu hohe Gewichtungen zu Überspringen und Rauschverstärkung führen [53].

Störgrößenmodell

Für thermische Simulationen wird oft eine konstante Temperaturreandbedingung vorgegeben [61], beispielsweise eine konstante Kühlwassertemperatur. In Realität ist diese Einschränkung allerdings in der Regel nicht korrekt. Im Fahrzeug variiert die Kühlmitteltemperatur in Abhängigkeit von Umgebungstemperatur und Belastung. Wird die Kühlwassertemperatur, die im Beobachter als Störgröße wirkt, nicht berücksichtigt, würde sich ein bleibender Schätzfehler einstellen [55]. Um diesen unerwünschten Einfluss zu beheben, gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten. Einerseits kann dem Beobachter die notwendige Temperatur als Eingangssignal zugeführt werden, was voraussetzt, dass diese Temperatur durch zusätzliche Sensoren messbar ist. Andererseits kann der Beobachter die Temperatur mit Hilfe eines Störgrößenmodells schätzen, wenn die Störgröße beobachtbar ist. Dieser zweite Ansatz wird im weiteren Verlauf der Arbeit verwendet, indem das thermische Modell aus Gleichungen 2.1 und 2.2 um ein Störgrößenmodell erweitert wird. Die modellierte Störgröße ist auch relevant für die betrachteten Modelle die Kühlwassertemperatur unterhalb des modellierten Leistungsmoduls in Kapitel 4. Im darauffolgenden Kapitel 5 wird ein Verfahren vorgestellt, wie die Modellierung auf das thermische Verhalten des Kühlwassers zwischen Ein- und Auslass erweitert werden kann. Die Störgröße des erweiterten Modells ist dann die Kühlwassertemperatur am Einlass des Wechselrichters.

Bei der verwendeten Methodik wird davon ausgegangen, dass die Störgröße x_{St} kein dynamisches Verhalten aufweist:

$$\dot{x}_{St} = 0. \quad \text{Gl. 2.14}$$

D.h. die Störgröße ist unabhängig von den im Modell abgebildeten Zuständen bzw. Temperaturen. Allerdings ist bekannt, wie die Störgröße auf die modellierten Temperaturen wirkt. Über diesen Zusammenhang kann, in Kombination mit der Rückführung der gemessenen Temperaturen, die Störgröße geschätzt werden. Die erweiterte Zustandsraumdarstellung ist dann durch

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_{St} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & z \\ 0_{1,n} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_{St} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0_{1,m} \end{bmatrix} u \quad \text{Gl. 2.15}$$

$$y = \begin{bmatrix} C & 0_{r,1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_{St} \end{bmatrix} + Du \quad \text{Gl. 2.16}$$

gegeben, wobei $0_{i,j}$ Nullmatrizen mit i Zeilen und j Spalten sind. Der Vektor z beschreibt den Einfluss der Störgröße x_{St} auf die Zustände in x . Der Beobachterentwurf, also die Bestimmung einer geeigneten Rückführmatrix L , ist nur dann möglich, wenn auch das erweiterte Modell beobachtbar ist. Für das erweiterte Modell kann die Beobachtbarkeit mit Hilfe von Gleichung 2.12 und unter Verwendung der erweiterten Dynamik- und Ausgangsmatrix untersucht werden.

2.4 Versuchsträger

Dieser Abschnitt befasst sich mit dem experimentellen Setup, das in dieser Arbeit für Verifikationsmessungen verwendet wurde. Zunächst wird der Aufbau eines einzelnen realen Leistungsmoduls inklusive der Kühlanbindung beschrieben. Anschließend wird der Aufbau des Prüfstands erläutert, der zur Durchführung der Experimente verwendet wurde.

Aufbau von Leistungsmodul und Kühler

Der verwendete Pulswechselrichter besitzt drei getrennte Leistungsmodule. Jedes Leistungsmodul umfasst die Funktion einer Halbbrücke und hat zwei An-

schlüsse zur Traktionsbatterie und einen Phasenanschluss zur elektrischen Maschine. Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, umfasst ein Halbbrückenmodul einen HighSide- und einen LowSide-Schalter. Jeder Schalter wird dabei durch einen IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) und eine Freilaufdiode realisiert.

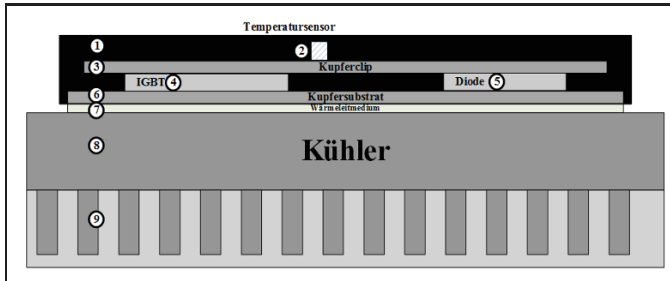


Abbildung 2.8: Querschnitt durch die LowSide des Leistungsmoduls.

Abbildung 2.8 zeigt einen Querschnitt durch den LowSide-Schalter des Leistungsmoduls. Die schwarze Kunststoffummantelung (Mold, (1)), die das Leistungsmodul umkapselt, erhöht einerseits die mechanische Stabilität des Leistungsmoduls und dient andererseits der elektrischen Hochvolt-Isolation. Auf dem Kupferclip (3) ist ein Temperatursensor (2) platziert, der die Temperatur in der Nähe der Halbleiter erfasst. Des Weiteren wird deutlich, wie die Halbleiter, IGBT (4) und Diode (5) oberseitig von einem Kupferclip (3) kontaktiert und auf das Kupfersubstrat (6) gelötet sind. Das Wärmeleitmedium (7) zwischen Leistungsmodul (1-6) und Kühlkörper (8) verbessert die thermische Leitfähigkeit und erfüllt zugleich die Funktion einer elektrischen Isolation gegenüber dem Kühlkörper. Für einen guten Wärmeübergang zwischen Kühler und Kühlwasser wird eine PinFin-Struktur eingesetzt [40], wobei die einzelnen Pins (9) vom Kühlwasser umströmt werden. Die PinFin-Struktur ist dabei so konstruiert, dass der Wärmeübergang α zwischen Kühler und Kühlwasser für einen nominal vorgegebenen Volumenfluss $\dot{V}_{KW,nom}$ optimal ist.

Abbildung 2.9 zeigt die schematische Anordnung auf der unteren Substratschicht und wie HighSide und LowSide in einem Leistungsmodul zusammengefasst sind. Zur Kühlung werden die drei Leistungsmodul für die drei Phasen auf einem gemeinsamen Kühlkörper befestigt. Abbildung 2.10 zeigt den schematischen Aufbau des Kühlers und veranschaulicht, wie die Leistungsmodul seriell vom Kühlwasser gekühlt werden.

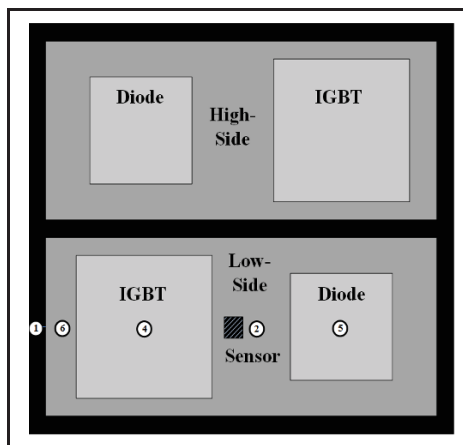


Abbildung 2.9: Anordnung von Halbleitern auf Kupfersubstrat.

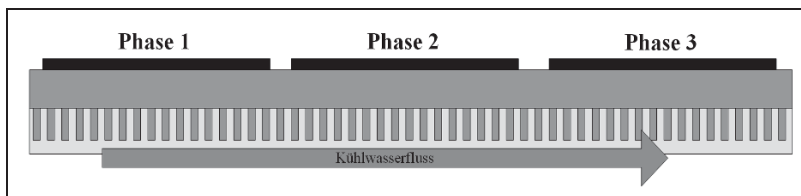


Abbildung 2.10: Querschnitt durch den Kühler des dreiphasigen Wechselrichters und Flussrichtung des Kühlwassers.

Das Leistungsmodul der Phase 1 befindet sich am Einlass des Kühlwassers und wird damit als erstes gekühlt. Das Leistungsmodul der Phase 3 ist entsprechend am Auslass und wird als letztes gekühlt.

Prüfstands Aufbau

Der Versuchsaufbau, der zur Verifikation der vorgestellten Modelle und Methoden verwendet wurde, ist in Abbildung 2.11 schematisch dargestellt. Der Pulswechselrichter *PWR* ist mit der Gleichstromquelle *DC-Quelle* verbunden und versorgt die elektrische Maschine *EM* mit Wechselstrom. Die Belastungsmaschine *BM* wird durch den Belastungswechselrichter *BWR* angesteuert und erzeugt das notwendige Gegenmoment für die elektrische Maschine *EM*, so

dass ein stabiler Betriebspunkt eingestellt werden kann. Das Kühlaggregat KA regelt die Einlasstemperatur $T_{KW,Ein}$ und den Volumenstrom $\dot{V}_{KW,ist}$ des Kühlwassers für die Kühlung des Pulswechselrichters PWR . Im Kühlkreislauf von Kühlaggregat KA und Pulswechselrichter PWR befinden sich zusätzlich zwei Messeinheiten, einerseits zur Messung von relevanten Größen im Vorlauf VL , andererseits zur Messung im Rücklauf RL . Beide Einheiten erfassen sowohl den Volumenfluss als auch die Temperatur des Kühlmediums. Auf diesen gemessenen Temperaturen basieren viele Aussagen des experimentellen Abgleichs. In den Kapiteln 4, 5 und 6 werden sie mit den geschätzten Temperaturen der Beobachtermodelle verglichen und dienen somit als Referenz für die Bewertung der Modellgenauigkeit.

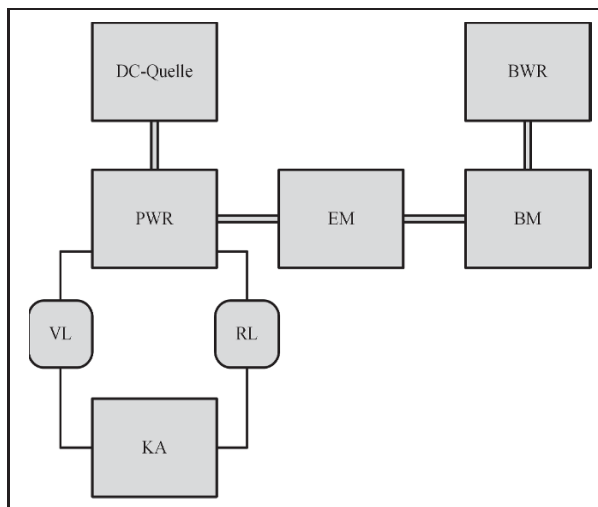


Abbildung 2.11: Aufbau des Prüfstands.

Systematische Modellbildung zur echtzeitfähigen
beobachterbasierten Temperaturüberwachung von
Wechselrichtern für Elektro- und Hybridfahrzeuge

Warwel, M.

2017, XXIX, 124 S. 54 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-658-18180-2