

1. Einleitung

In dem ersten Kapitel dieser Arbeit werden folgende Fragen beantwortet:

1. In welchen Kontext ist die vorliegende Arbeit einzuordnen und wie lautet die Herausforderung, für die diese Arbeit eine Herangehensweise anbietet (**Motivation**)?
2. Wie wird diese Herausforderung bisher angegangen und welche Bereiche bleiben offen (**Stand der Technik**)?
3. Wie wird diese Herausforderung in dieser Arbeit angegangen (**Strukturierung**)?

Kurzversionen der Antworten sind jeweils kursiv am Ende der Abschnitte zu finden.

1.1. Motivation

Elektrische Systeme und Geräte emittieren elektromagnetische Energie, die andere elektrische Systeme und Geräte in ihrer Funktion ungewollt beeinflussen bzw. stören kann. Weiterhin können sich die elektrischen Systeme und Geräte auch selbst ungewollt beeinflussen oder stören. Die ungewollt ausgesendete elektromagnetische Energie resultiert in Störspannungen, Störströmen und elektromagnetischen Feldern. Diese Größen werden im Folgenden mit dem Sammelbegriff **Störemission** bezeichnet. Der Ausbreitungspfad der ausgesendeten elektromagnetischen Energie bzw. der Störemissionen kann in leitungs- und feldgeführt unterteilt werden. Leitungsgeführte Störemissionen können zum Beispiel Oberwellen oder andere unerwünschte spektrale Komponenten, die zusammen mit einem Nutzsignal über ein Kabel übertragen werden, sein. Feldgeführte Störemissionen können zum Beispiel von einem als parasitäre Antenne fungierenden Kabel abgestrahlte elektromagnetische Felder sein.

Weisen elektrische Systeme und Geräte ein bestimmtes Maß an Störfestigkeit gegenüber (auch selbst erzeugten) Störemissionen auf und emittieren gleichzeitig nur

ein bestimmtes Maß an Störemissionen, gelten sie als elektromagnetisch verträglich. Die Disziplin der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) thematisiert die Frage, wie dieses Maß an Störfestigkeit und dieses Maß an Störemissionen quantitativ definiert sein sollten und wie die Einhaltung sichergestellt werden kann.¹

Nationale und internationale Vorschriften, Richtlinien, Standards und Gesetze schreiben vor, welches minimale Maß an Störfestigkeit und welches maximale Maß an Störemissionen elektrische Systeme und Geräte aufweisen müssen bzw. dürfen, um als elektromagnetisch verträglich zu gelten. Neben der Beschreibung von Messmethoden und -geräten werden also auch Grenzwerte definiert. Für die oben genannten Begrifflichkeiten wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit der Sammelbegriff Norm verwendet.

Wie der Titel dieser Arbeit bereits unterstreicht, werden in dieser Arbeit die eben beschriebenen Störemissionen thematisiert. Im Einzelnen werden die Störemissionen **leistungselektronischer Komponenten** behandelt. Leistungselektronische Komponenten sind hier elektrische Systeme und Geräte aus dem Bereich der Leistungselektronik.

“Mit Leistungselektronik wird das Teilgebiet der Elektrotechnik bezeichnet, das sich mit dem Steuern und Umformen elektrischer Energie mit Hilfe von elektronischen Ventilen beschäftigt.” [3]

Elektronische Ventile sind zum Beispiel MOSFETs, IGBTs, Dioden etc.. Was leistungselektronische Komponenten darüber hinaus von anderen elektrischen Komponenten abgrenzt, wird in Kapitel 3 detaillierter herausgearbeitet.

Die Mechanismen, die zur Entstehung der ungewollten Störemissionen leistungselektronischer Komponenten führen, sind im Prinzip die gleichen Mechanismen, die zur Entstehung der ungewollten Störemissionen in allen elektrischen Systemen und Geräten führen. Daher kann die Frage aufkommen, wieso eine gesonderte Betrachtung leistungselektronischer Komponenten hinsichtlich dieser Störemissionen sinnvoll bzw. zielführend ist. Folgende Aufzählung liefert Antworten auf diese Frage:

- Die Ströme und Spannungen, die in den leistungselektronischen Komponenten auftreten bzw. von diesen erzeugt werden, dominieren aufgrund ihrer Größen-

¹In der Literatur finden sich diverse Definitionen des Ausdrucks Elektromagnetische Verträglichkeit (zum Beispiel [1, 2]).

ordnung häufig die auftretenden Störemissionen und bedürfen somit besonderer Aufmerksamkeit.

- Diese Problematik wird durch die zunehmende Durchdringung der elektrischen Energieversorgungssysteme mit leistungselektronischen Komponenten verschärft. Mit Energieversorgungssystemen sind hier auch Systeme kleinen Maßstabs als Teil von Bordnetzen und Haushaltselektronik gemeint. Aus dem Einsatz leistungselektronischer Komponenten als zentraler Bestandteil der Energieversorgungssysteme resultieren auch die erwähnten Größenordnungen der Ströme und Spannungen.
- Leistungselektronische Komponenten weisen bedingt durch die zugrunde liegende Technologie wiederkehrende Besonderheiten auf, die eine gesonderte Betrachtung/Analyse zusätzlich rechtfertigen. Diese Zusammenhänge müssen nur einmal analysiert werden und können dann übertragen werden.

Insbesondere der letzte Punkt zeigt auf, dass die Analyse effizienter gestaltet werden kann, wenn diese Besonderheiten berücksichtigt werden. Die Besonderheiten der leistungselektronischen Komponenten werden, wie bereits erwähnt, weiter unten thematisiert (Kapitel 3).

Um herauszuarbeiten, wie die spezielle Herausforderung lautet, für deren Bewältigung diese Arbeit eine Herangehensweise anbietet, wird zunächst der typische Entwicklungsprozess leistungselektronischer Komponenten erklärt. Dieser Prozess ist in Abbildung 1.1 schematisch dargestellt. Am Beginn des Entwicklungsprozesses wird die leistungselektronische Komponente nach erfolgter theoretischer Dimensionierung und Auswahl der Bauteile üblicherweise mit Hilfe einer Schaltungssimulationssoftware auf Funktion getestet. Im nächsten Schritt wird ein Layout entworfen, auf dessen Basis die Komponente dann als Prototyp gefertigt werden kann. Natürlich lassen erfahrene Entwickler bereits an dieser Stelle Kenntnisse aus dem Bereich der Elektromagnetischen Verträglichkeit einfließen. Neben weiteren Funktionsprüfungen aus anderen Bereichen erfolgt nun eine Messung der elektromagnetischen Störemissionen entsprechend einschlägiger Normen. Werden die Grenzwerte nicht eingehalten, ist im schlimmsten Fall ein kompletter Neuentwurf notwendig, welcher zeit- und kostenintensiv ist. Selbst wenn dies nicht nötig ist, muss zum Beispiel ebenfalls zeit- und kostenintensiv zusätzlicher Filteraufwand etc. betrieben werden. Andererseits stellt sich hier vielleicht sogar heraus, dass zu viel Filteraufwand betrieben wurde.

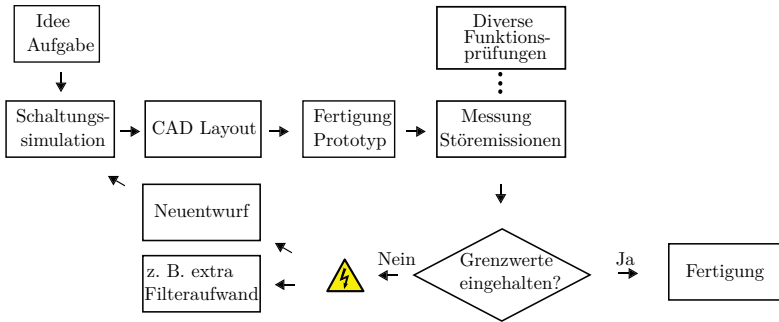


Abbildung 1.1.: Entwicklungsprozess leistungselektronischer Komponenten

Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens dieser Szenarien kann reduziert werden, wenn die erwarteten Störemissionen im Entwicklungsprozess kontinuierlich **abgeschätzt** werden. Somit kann einer sich eventuell abzeichnenden Grenzwertverletzung frühzeitig mit Modifikationen und Gegenmaßnahmen begegnet werden. Zusätzlich kann vermieden werden, dass die Filter überdimensioniert werden, wenn die notwendige Filterdämpfung abgeschätzt wird. Die Abschätzungen erfolgen am besten schon am Anfang des Entwicklungsprozesses auf Basis der Schaltungssimulation, die hierzu um Modelle der Störemissionsentstehungs- und Koppelmechanismen erweitert werden muss. Die Modelle der Koppelmechanismen müssen sowohl die Kopplungen innerhalb der leistungselektronischen Komponente als auch die Kopplungen zu den externen Schnittstellen modellieren. Zur Generierung solcher Modelle müssen natürlich zunächst die Störemissionsentstehungs- und Koppelmechanismen sowie deren **Einflussparameter analysiert** werden. Sind die Einflussparameter identifiziert und gegeneinander abgewogen, ist auch bekannt, wie die Störemissionen am effizientesten reduziert werden können.

Wie beschrieben, entstehen bei der Entwicklung einer Vorgehensweise zur Abschätzung der Störemissionen leistungselektronischer Komponenten zwangsläufig Modelle, die auch zur Analyse der Einflussparameter sehr gut geeignet sind. Die Modelle der elektromagnetischen Störemissionsentstehungs- und Koppelmechanismen sind somit also auch dann hilfreich, wenn die Genauigkeit der auf Basis der Modelle

abgeschätzten Störpegel² es nicht erlaubt, auf Messungen der Störpegel zu verzichten. Modelle, die wenigstens die prinzipiellen Mechanismen abdecken, helfen zu verstehen, wie die Störemissionen hervorgerufen werden und welche Parameter verändert werden können, um die Störemissionen abzuschwächen. Dies erlaubt es, die Eignung von Designänderungen zur Reduzierung der Störpegel zu beurteilen und mehrere alternative Änderungen gegeneinander abzuwägen.³

Die Abschätzung der leitungsgeführten Störemissionen leistungselektronischer Komponenten hat in dieser Arbeit besonderes Gewicht. Weiterhin werden im Folgenden vornehmlich leistungselektronische Komponenten, die aus diskreten Bauteilen aufgebaut sind, betrachtet. Zudem wird schwerpunktmäßig auf die Verbindungsstruktur zwischen den diskreten Bauteilen (meist eine Leiterplatte) und die diskreten Bauteile eingegangen, da der Entwickler auf die Messumgebung und das Messequipment keinen Einfluss hat. Nichtsdestotrotz wird auch die Modellierung Letzterer thematisiert. Die zugehörigen Daten können archiviert und wiederverwendet werden.

Die Herausforderung, für die diese Arbeit eine Herangehensweise anbietet, lautet demnach, die leitungsgeführten Störemissionen leistungselektronischer Komponenten möglichst früh im Entwicklungsprozess abzuschätzen und die dominanten Einflussparameter zu analysieren. Letzteres dient auch zur Identifikation geeigneter Gegenmaßnahmen und erlaubt Parametervariationen zur Quantifizierung der Parametereinflüsse. Zentraler Teil dieser Herausforderung ist es zudem, Methoden zu entwickeln und/oder zu kombinieren, die die Herangehensweise hinsichtlich der nötigen Simulationszeiten bzw. der Einbindung der Störemissionsentstehungs- und Koppelmechanismen praktikabel halten bzw. möglich machen.

1.2. Stand der Technik

In diesem Abschnitt wird knapp beschrieben, wie die oben erwähnte Herausforderung bisher angegangen wird bzw. welche Hilfsmittel existieren. Hier wird also u.a. der Stand der Technik hinsichtlich der Modellierung von Koppel- und Störemissionsentstehungsmechanismen beschrieben.

²Mit Störpegeln sind im Folgenden zumeist die Amplituden der spektralen Komponenten der Störemissionen gemeint.

³Angelehnt an die Argumentation in [4].

An dieser Stelle könnten die Methoden zur Modellbildung und Vorgehensweisen zur Abschätzung leitungsgeführter Störemissionen nach Einsatzbereich (Haushaltsgeräte mit Netzanschluss, Bordnetzanwendungen etc.) bzw. Ausführung/Zweck der leistungselektronischen Komponente (Gleichspannungswandler, Frequenzumrichter zur Ansteuerung von Motoren etc.) klassifiziert werden. Je nach Einsatzbereich bzw. Ausführung/Zweck können unterschiedliche Normen einschlägig sein. Da die in Kapitel 5 vorgestellte Vorgehensweise zur Abschätzung leitungsgeführter Störemissionen vom Einsatzbereich und der Ausführung/dem Zweck unabhängig ist, wird hier lediglich auf die eingesetzten Methoden eingegangen.⁴ Das Gleiche gilt für die Klassifizierung nach Gleichtakt- und Gegentaktstöremissionen.⁵ In der Literatur liegt der Fokus häufig auf den Gleichtaktstöremissionen.

Das Steuern und Regeln der elektrischen Energie wird in den leistungselektronischen Komponenten in vielen Fällen durch Pulsweitenmodulation (PWM) realisiert. Die zugehörigen Spannungsverläufe werden durch Ein- und Ausschalten von extern steuerbaren, elektrischen Ventilen (MOSFETs, IGBTs etc.) erzeugt. Zwischen den Polen dieser Halbleiter treten also rechteckförmige Spannungsverläufe auf. Diese Spannungsverläufe werden häufig als trapezförmig angenähert (z.B. [5, 6]). [7, 8] unterstreichen aber, dass dies zu Ungenauigkeiten/Abweichungen führt und die Berücksichtigung der komplexeren Spannungsverläufe einen Mehrwert bietet. Dies liegt darin begründet, dass gerade die Schaltflanken der PWM eine der Hauptursachen der Störemissionen sind. Andere Arbeiten verwenden bereits Halbleitermodelle, die in Schaltungssimulationen komplexere Kurvenverläufe nachbilden können. Dies führt in der Regel zur Beanspruchung von mehr Ressourcen.

Die Störemissionsentstehungs- und Koppelmechanismen werden in einigen Arbeiten im Zeitbereich (z.B. [9, 6]) und in anderen im Frequenzbereich (z.B. [5]) modelliert. Bei der Verwendung von Zeitbereichsmodellen sind die Simulationszeiten in der Regel größer. Um Simulationszeit einzusparen, verzichtet z. B. [9] teilweise auf die Modellierung von Kabeln. In Zeitbereichssimulationen können aber Nichtlinearitäten berücksichtigt werden. Diese treten insbesondere bei den Halbleitern auf [10]. Die oben erwähnte Trapeznäherung wird in beiden Bereichen verwendet. Im Frequenzbereich wird dann das Trapezspektrum aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich transformiert (z. B.

⁴Besonderheiten von zum Beispiel Messaufbauten, die in Normen vorgeschrieben werden, können prinzipiell durch die Vorgehensweise aus Kapitel 5 abgebildet werden.

⁵Siehe Abschnitt 2.1.

[5]). Im Zeitbereich kann direkt der trapezförmige Spannungsverlauf eingefügt werden, was nicht automatisch heißt, dass Nichtlinearitäten berücksichtigt werden, da hier eine Linearisierung stattfinden kann (z.B. [6]).

Der Einfluss verteilter parasitärer Elemente (parasitäre Kapazitäten, parasitäre Induktivitäten) der Verbindungsstruktur (z.B. Leiterplatten) zwischen den diskreten Bauteilen wird häufig vernachlässigt (z.B. [6]). Dies kann sinnvoll sein, wenn andere Effekte analysiert werden sollen oder dominieren. Andere Arbeiten berücksichtigen diese verteilten parasitären Elemente (z.B. [9, 11, 12]). [13, 11] stellen u.a. fest, dass die Größenordnung von parasitären verteilten Elementen der Leiterplatte die Gleiche sein kann, wie die von parasitären Elementen diskreter Bauteile und die verteilten parasitären Elemente demnach in die Modellierung einbezogen werden müssen. [13] verwendet S-Parameter aus einer Vollwellensimulation, die in eine Schaltungssimulation eingebunden werden, um die parasitären Elemente zu berücksichtigen. Im Bereich der Leistungselektronik wird allerdings häufig die Partial Element Equivalent Circuit (PEEC) Methode⁶ verwendet, um den Einfluss verteilter parasitärer Elemente zu bestimmen. In [14] wird die PEEC Methode genutzt, um die Kopplung zwischen passiven Filterelementen zu untersuchen. [15] thematisiert dies ebenfalls. In [11] werden auf Basis der PEEC Methode erzeugte Modelle in die Schaltungssimulation eines Gleichspannungswandlers eingebunden. [11] stellt fest, dass die Berücksichtigung der Verbindungsstruktur nicht vernachlässigt werden darf, wenn die Störemissionen korrekt abgeschätzt werden sollen, wobei die parasitären Elemente der diskreten Bauteile einen größeren Einfluss haben und auch genau modelliert werden müssen.

Um die Vergleichbarkeit von modellierten Störemissionen mit während einer realen Messung gemessenen Störemissionen zu gewährleisten, muss das in Normen geforderte Messequipment ebenfalls modelliert werden. [9] führt beispielsweise die teilweise fehlende Modellierung von Verbindungskabeln zur Netznachbildung⁷ als Ursache für die Abweichung zwischen gemessenen und abgeschätzten Störemissionen an. [16] zeigt, dass das Kabel (in einem Drei-Leiter-System) zwischen dem untersuchten Prüfling (EUT) und der Netznachbildung einen Einfluss hat und wie dieser modelliert werden kann.

⁶In Abschnitt 2.2 wird genauer herausgearbeitet, warum diese PEEC Methode in der Leistungselektronik(-modellierung) häufig verwendet wird.

⁷Wie auch weiter unten erklärt wird, wird die Netznachbildung u.a. zur Sicherstellung der Reproduzierbarkeit von Messungen eingesetzt und zählt hier zum Messequipment.

Da die Grenzwerte für Störemissionen meist im Frequenzbereich definiert sind (z.B. [17]), werden bei Störemissionsmessungen Spektrumanalysatoren (SA) und/oder Messempfänger (ME) verwendet. Sollen die Störpegel im Frequenzbereich auf Basis einer Zeitbereichssimulation der Störemissionen abgeschätzt werden, wird häufig die FFT auf die Verläufe der Störemissionen im Zeitbereich angewendet, um eine Transformation in den Frequenzbereich zu erhalten (z.B. [6]). Der Einfluss von Messempfänger- bzw. Spektrumanalysator (z.B. durch die Festlegung der Filterbandbreiten der Geräte, Auswahl des Detektors etc.), die in der Regel Teil des Messaufbaus sind, kann auf diese Weise nicht berücksichtigt werden. Steht die Bestimmung von Resonanzfrequenzen im Störemissionsspektrum im Vordergrund (z.B. [5]) würde die Berücksichtigung dieses Messequipments auch keinen Mehrwert bieten. Sollen aber Störpegel im Frequenzbereich möglichst exakt abgeschätzt werden, kann die Modellierung des Einflusses der Messempfänger- bzw. Spektrumanalysatoreinstellungen auf die Störpegel sinnvoll sein. Aus diesem Grund stellt [18] eine Methodik vor, die den Einfluss des Messempfängers berücksichtigt. Dort werden sowohl Detektornachbildung als auch Filternachbildung beleuchtet. Allerdings werden parasitäre Elemente nicht berücksichtigt und nur Frequenzen unter 3 MHz betrachtet.

Layoutmodifikationen bzw. -einflüsse auf die Störemissionen leistungselektronischer Komponenten werden zum Beispiel in [19, 20, 21, 12] vor dem Hintergrund der Reduzierung von Störemissionen analysiert. [19] führt grundsätzliche Layoutregeln auf und schlägt zudem vor, Störemissionen durch geschickte Taktung sowie Anpassung der Ausführung der leistungselektronischen Komponente zu begegnen. [20] gibt Layoutempfehlungen für eine bestimmte Gleichspannungswandler-Variante. [21] untersucht den Einfluss parasitärer Elemente auf die Performance eines EMV-Filters⁸. [12] beschreibt die Verringerung parasitärer Induktivitäten durch Annäherung der Verbindungsstruktur an eine leitende Fläche.

Die Herausforderung, für die diese Arbeit eine Herangehensweise anbietet, wird auch in der Literatur bereits vielfältig angegangen. Was fehlt, ist eine Arbeit, die die in diesem Abschnitt angeführten Methodiken gegeneinander abwägt, kombiniert und entsprechend anpasst. Gleiches gilt für eine Vorgehensweise, die explizit auf die Abschätzung der Störemissionen mit dem Fokus Leiterplatte abzielt und gleichzeitig eine Parametrisierung der übrigen Komponenten durch Messungen vorsieht.

⁸Als EMV-Filter werden hier Filter mit dem Zweck der Filterung von Störemissionen bezeichnet.

1.3. Strukturierung

In **Kapitel 2** werden knapp Grundlagen vorgestellt.

In **Kapitel 3** werden neben dem Herausstellen spezieller Aspekte der Leistungselektronik auch Besonderheiten bei der Modellierung leistungselektronischer Komponenten herausgearbeitet und abgewogen. Hierdurch soll verdeutlicht werden, welchen Mehrwert die für die Leistungselektronik gesonderte Vorgehensweise zur Abschätzung der Störemissionen bieten kann.

In **Kapitel 4** werden Störemissionsentstehungs- und Koppelmechanismen zusammengetragen und analysiert. Hierbei wird bereits zur Sensitivitätsanalyse auf die Modelle aus Kapitel 5 vorgegriffen. Weiterhin werden in diesem Zuge Maßnahmen zur Verringerung der Störemissionen diskutiert.

In **Kapitel 5** wird schwerpunktmäßig die erwähnte Vorgehensweise zur Abschätzung von Störemissionen leistungselektronischer Komponenten vorgestellt. Dies ist auch der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit. Als Grundlage dient eine Zeitbereichssimulation, die es erlaubt die Nichtlinearitäten der Halbleiter zu berücksichtigen. Hier wird keine Trapeznäherung durchgeführt. In den verwendeten Modellen werden parasitäre Elemente der diskreten Bauteile und der Verbindungsstruktur (Leiterplatte) berücksichtigt. Hierzu wird u.a. die PEEC Methode verwendet. Aus der Zeitbereichssimulation werden Spannungsverläufe entnommen, weiterverarbeitet und dabei in den Frequenzbereich transformiert, um in einem Frequenzbereichsmodell weiterverwendet werden zu können. Das Frequenzbereichsmodell dient der Berücksichtigung von Equipment wie Netznachbildung, Kabel etc.. Zeit- und Frequenzbereichsmodell werden also kombiniert. In beiden Bereichen werden die Modelle auf Basis von Messungen parametrisiert, wenn es zweckmäßig ist. Ebenso besteht die Option, den Messempfänger zumindest ansatzweise nachzubilden. Am Ende des Kapitels werden Beispielszenarien vorgestellt sowie die abgeschätzten und zugehörigen gemessenen Störemissionen gegenübergestellt. Dies dient der Diskussion der Anwendbarkeit/Eignung der Vorgehensweise.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung (**Kapitel 6**).

Die im Abschnitt 1.1 beschriebene Herausforderung wird in dieser Arbeit also durch die bestimmte Kombination verschiedener zum Teil bereits bekannter Methoden zur Modellbildung angegangen. Mit Hilfe der Modelle können die Störemissionen leistungselektronischer Komponenten möglichst früh im Entwicklungsprozess abgeschätzt sowie die dominanten Einflussparameter durch zum Beispiel Parametervariationen analysiert werden. Verschiedene Modellierungsmethoden werden zudem gegeneinander abgewogen. Um die Effizienz von Simulationen zur Abschätzung von Störemissionen zu steigern, werden Frequenz- und Zeitbereichsmodelle kombiniert. Aus dem gleichen Grund wird zur Parametrisierung von Modellen auf Messungen zurückgegriffen, wenn dies zweckmäßig ist. Dies ist zum Beispiel bei der Erzeugung von Modellen der Messumgebung, in die die leistungselektronische Komponente eingebunden wird, der Fall.