

1 Einführende Betrachtungen

Nach einer Beschreibung der Zielstellung dieser Arbeit folgt eine Einführung in die Schaltertechnik. Anschließend werden die Grundlagen der Finite – Elemente – Methode sowie die Grundlagen der Optimierungsrechnung erläutert.

1.1 Zielstellung der Arbeit

Sowohl vom technischen als auch vom wirtschaftlichen Standpunkt aus sollen die mechanischen, elektrischen, magnetischen und thermischen Eigenschaften eines zu optimierenden oder neu zu entwickelnden Produktes zu einem möglichst frühen Zeitpunkt bekannt sein [grot97], [völk93]. Experimentelle Untersuchungen dieser Eigenschaften sind sehr aufwendig und zeitintensiv. **Bild 1.1** zeigt einen Vergleich zwischen traditioneller und computerunterstützter Entwicklung eines neuen Produktes. Bei der traditionellen Produktentwicklung oder der Produktoptimierung steht am Anfang der Entwurf. Anschließend folgt die Detailkonstruktion, dann der Bau eines Prototypen. In dem darauf folgenden Versuch können die Eigenschaften des Produktes untersucht werden. Werden die Erwartungen nicht zufriedenstellend erfüllt, erfolgt entweder eine neue Detailkonstruktion oder ein neuer Entwurf. In der

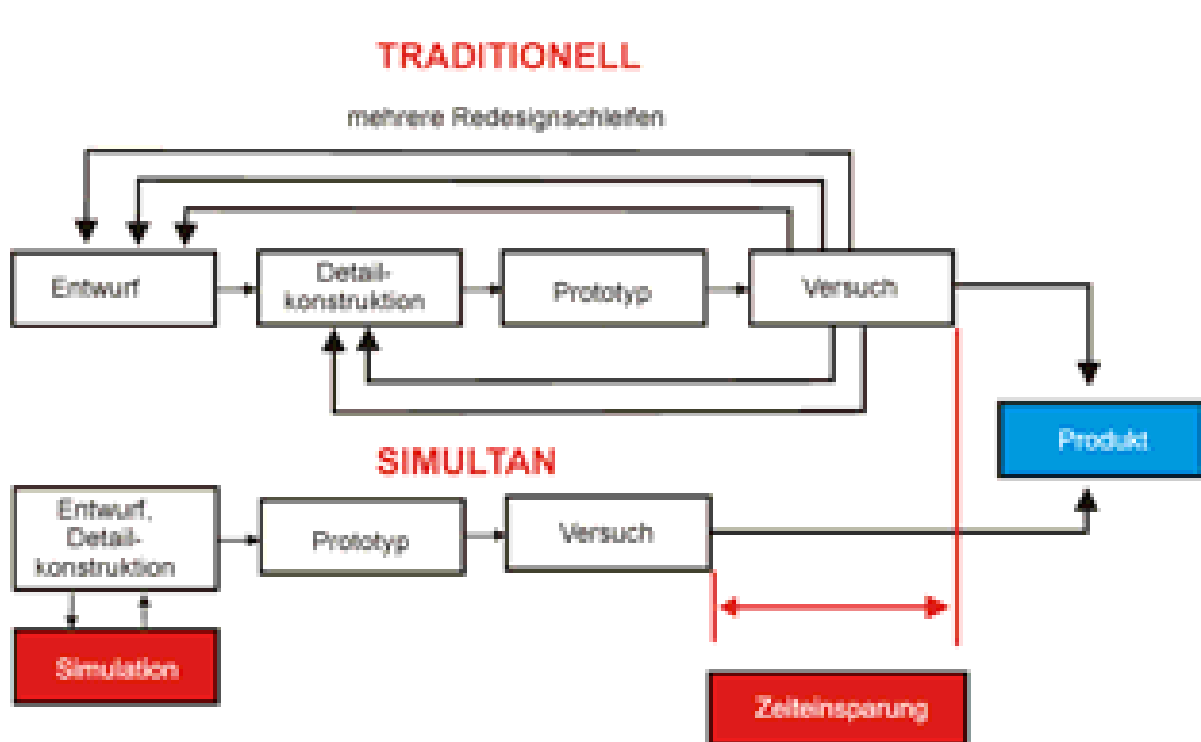


Bild 1.1 : Traditionelle und computerunterstützte Produktentwicklung [grot97]

Regel werden hierbei mehrere Redesignschleifen durchlaufen.

Numerische Berechnungsverfahren bieten hierzu eine Alternative. Mit ihnen können Auswirkungen von Konstruktionsänderungen abgeschätzt sowie Optimierungsrechnungen durchgeführt werden. Sie können z.B. kompaktere Bauformen oder höhere Belastbarkeiten zum Ziel haben. Idealerweise kann hierbei das Produkt bezüglich seiner thermischen, elektrischen und magnetischen Eigenschaften komplett simuliert werden.

Diese Arbeit soll einen Beitrag zur computerunterstützten Produktentwicklung liefern. Es werden für zwei unterschiedliche Problemstellungen bei dem Entwurf von Schaltgeräten gezeigt, wie diese mit geringem Versuchsaufwand und geeigneten numerischen Verfahren gelöst werden können:

Im Teil „Berechnungen zum Wärmehaushalt von Schaltgeräten“ wird beschrieben, wie der Wärmehaushalt eines Schaltgerätes mit numerischen Methoden untersucht werden kann. Besondere Berücksichtigung finden mögliche Vereinfachungen der Abbildung des realen Schaltgerätes in das Modell im Rechner. Das Ziel ist die Beschreibung eines Lösungsweges, der unter Vernachlässigung irrelevanter Effekte mit möglichst geringer Rechenzeit und Aufwand zu einem zuverlässigen Ergebnis führt. Der Lösungsweg wird an einem industriell gefertigten Schaltgerät nachvollzogen.

Zur Lösung werden kommerziell erhältliche Programmpakete verwendet: Als Finite – Elemente – Programmpaket wird „ANSYS“ eingesetzt. Um die Randbedingungen an den Außenseiten des untersuchten Modells zu bestimmen, finden weiterhin „PSPICE“ und „Mathcad“ Verwendung. Mit „PSPICE“ können elektrische Schaltungen berechnet werden; „Mathcad“ dient zur Berechnung und Visualisierung komplexer mathematischer Zusammenhänge.

Im Teil „Optimierung eines Schlagankerauslösers“ wird beispielhaft gezeigt, wie die Komponente eines Schaltgerätes mit numerischen Methoden optimiert werden kann. Als Programmpaket kommt auch hier unter anderem „ANSYS“ mit verschiedenen, in diesem Programm implementierten Optimierungsverfahren zum Einsatz.

1.2 Schaltgeräte

Schaltgeräte der elektrischen Energietechnik haben die Aufgabe, Stromkreise zu verbinden und zu unterbrechen sowie im eingeschalteten Zustand den Strom zu führen [Lind87]. Schaltgeräte werden in Hochspannungsschaltgeräte (> 1000 V) und Niederspannungsschalt-

geräte ($< 1000 \text{ V}$) unterteilt. Niederspannungsschaltgeräte sind zum Schalten und Schützen elektrischer Betriebsmittel bestimmt [balz92]. Die Auswahl der Schaltgeräte richtet sich nach der jeweiligen Schaltaufgabe (z.B. Freischalten, Lastschalten, Leistungsschalter, Motorschalter). Je nach Bauart können Schaltgeräte einzelne oder mehrere Schaltaufgaben erfüllen. Die Niederspannungsschaltgeräte werden nach [vdeb02] unterteilt in:

- ☞ Leistungsschalter
- ☞ Lastschalter
- ☞ Schütze und Motorstarter
- ☞ Elektromechanische Schaltgeräte
- ☞ Näherungsschalter
- ☞ Automatischer Netzumschalter

Der Vorgang des Schaltens, d.h. des Überganges vom eingeschalteten zum ausgeschalteten Zustand, wird meist durch Auftrennen und Schließen eines metallischen Stromübergangs unter Lichtbogenbildung erreicht. Der Schaltlichtbogen hat die Aufgabe, den Übergang von einem guten Leiter zu einem guten Isolator innerhalb kürzester Zeit zu bewerkstelligen [lind87].

1.2.1 Auslöseverhalten von Leistungsschaltern

Leistungsschalter müssen unter betriebsmäßigen Bedingungen Ströme einschalten, führen und ausschalten können. Unter festgelegten abnormalen Bedingungen bis zum Kurzschlussstrom den Strom einschalten, während einer bestimmten Dauer führen und ihn unterbrechen können. Leistungsschalter mit Überlastauslöser (verzögerter thermischer Auslöser) und Kurzschluss – Schnellauslöser (unverzögerter elektromagnetischer Auslöser) werden für das betriebsmäßige Schalten und den Überstromschutz von Verbrauchsmitteln und Anlagenteilen mit geringer Schalthäufigkeit eingesetzt. **Bild 1.2** zeigt schematisch die Auslösecharakteristik von Leitungsschutzschaltern. Aufgetragen ist die Auslösezeit des Schaltgerätes über dem Nennstrom in doppellogarithmischer Teilung. Die

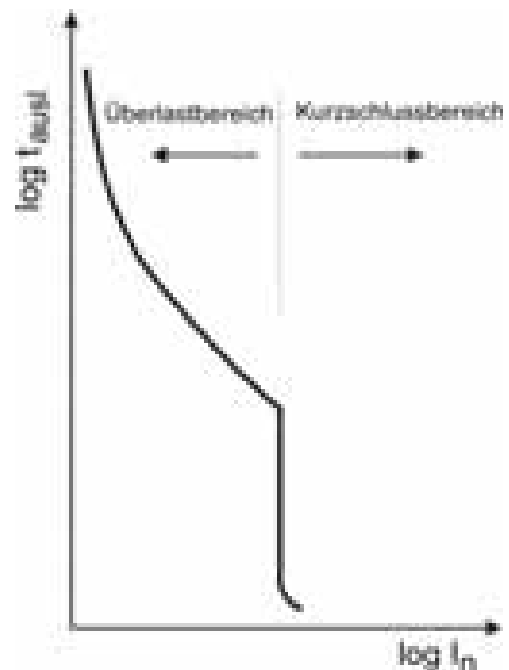


Bild 1.2: Schematische Auslösecharakteristik von Leitungsschutzschaltern [balz92]

Kennlinie wird in zwei Bereiche eingeteilt: Den Überlastbereich und den Kurzschlussbereich. Ein stromabhängig verzögerter Auslöser kann als thermischer Überlastauslöser ausgeführt sein. Es handelt sich hierbei zumeist um einen Thermobimetallstreifen. Dieser wird entweder mit Hilfe von stromdurchflossenen Heizwicklungen erwärmt, und so indirekt beheizt, oder er wird direkt beheizt, indem der Strom durch den Bimetallstreifen selbst fließt. Im Kurzschlussbereich werden die Ströme so schnell wie möglich abgeschaltet. Die Überwachung des Stromes und Erfassung eines Kurzschlussstromes erfolgt bei Schaltern überwiegend durch Kurzschlussschnellauslöser (elektromagnetische Auslöser). Ein Magnet-system mit einem festen Joch und einem beweglichen Anker wird durch eine vom Hauptstrom gespeiste Spule erregt. Beim Überschreiten des Ansprechstromes wird der Anker angezogen und bewirkt die Entklinkung des Schaltschlusses und damit die Abschaltung des Kurzschlussstromes durch den Leistungsschalter. Der Ansprechwert des elektromagnetischen Auslösers wird durch eine Ankerrückzugfeder eingestellt. Bei einem solchen Schlagankerauslöser kann der Anker zusätzlich auf die Kontaktstücke schlagen, um diese zu öffnen und so die Öffnungsbewegung durch das Schaltschloss zu unterstützen („Schlagankerauslöser“).

1.2.2 Erwärmung von Schaltgeräten

Schaltgeräte bestehen mindestens aus den Schaltgliedern, dem Antrieb, den Leiteranschlüssen sowie einem Sockel oder einem Grundrahmen [lind87]. Zum Erreichen bestimmter Eigenschaften sind Schaltgeräte mit zusätzlichen Baugruppen ausgerüstet. **Bild 1.3** zeigt die Grundform eines Niederspannungsleistungsschalters mit den Mechanismen des Wärmetransportes.

1. Löschblechkammer
2. beweglicher und fester Kontakt
3. thermischer Auslöser
4. magnetischer Auslöser
5. Zuleitungen
6. Gehäuse
7. flexible Verbindung zum beweglichen Kontakt
8. Zuleitungskabel (nur an einer Zuleitung dargestellt)

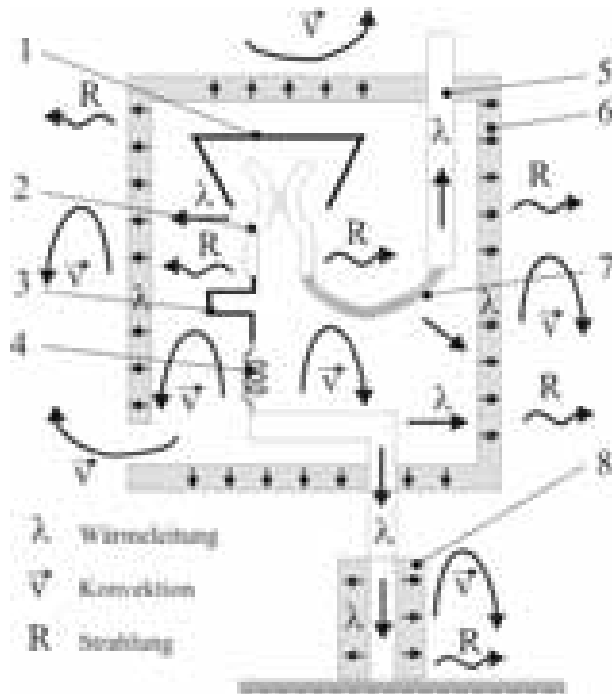


Bild 1.3: Mechanismen des Wärmetransportes innerhalb und außerhalb eines Leistungsschalters

Alle Schaltgeräte müssen bestimmte Anforderungen hinsichtlich ihres Ein- und Ausschaltvermögens, der Isolationseigenschaften, der elektromagnetischen Verträglichkeit, der thermischen Eigenschaften usw. erfüllen [vdeb02].

Für Niederspannungsschaltgeräte z.B. muss die Temperatur unter einem bestimmten Niveau bleiben [vdeb02]. Die Temperaturerhöhung wird hauptsächlich durch ohmsche Erwärmung der stromführenden Teile verursacht.

Mögliche Wärmequellen sind [lind87]:

- ## Zuleitungen
- ## Kontaktstellen (Kontaktwiderstände)
- ## Anschlussklemmen (Übergangswiderstand)
- ## Überstromauslöser (z.B. Bimetall)
- ## elektromagnetischer Auslöser

Auch die Leiterstücke im Schaltgerät verursachen Verluste, die aber oft klein gegenüber den anderen Wärmequellen sind. Weiterhin kann es zur Erwärmung durch Wirbelstromverluste und Hystereseverluste des Schaltgerätes kommen.

Die in den Quellen erzeugte Energie wird an die Umgebung abgegeben. Die Mechanismen des Wärmetransportes sind:

- ## Wärmeleitung in Festkörpern (Strompfad, Zuleitungen, Gehäuse)
- ## Konvektion und Wärmeleitung innerhalb des Schaltgerätes und Konvektion an die Umgebung
- ## Strahlung von Teilen mit höheren Temperaturen auf die mit niedrigeren sowie Strahlung vom Gehäuse und den Zuleitungen an die Umgebung

Es ist im Einzelfall zu prüfen, welche Quellen relevant sind. Das Temperaturprofil stellt sich im stationären Zustand aus dem Gleichgewicht zwischen den Quellen und den abgegebenen Wärmeleistungen ein.

Die rechnerische Nachbildung aller Prozesse ist außerordentlich komplex, da es sich um eine Vielzahl gekoppelter Feldprobleme handelt. Daher besteht die Notwendigkeit zur Beschränkung auf die wesentlichen Mechanismen und möglichst weit vereinfachte Rechenverfahren. Das Ziel der Untersuchungen ist eine Nachbildung des Wärmehaushaltes in Schaltgeräten unter Vernachlässigung der quantitativ irrelevanten Mechanismen.

1.3 Grundlagen der Finite – Elemente - Methode

Die Finite - Elemente - Methode (FEM) hat sich seit vielen Jahren im Ingenieurwesen bewährt und wird routinemäßig für Berechnungen eingesetzt. Sie ermöglicht realitätsnahe Aussagen durch Rechnersimulation im Stadium der Entwicklung und trägt damit wesentlich zur Verkürzung der gesamten Produktentwicklungszeit bei [klei00]. Mit den klassischen Ansätzen ist es nicht möglich, komplexere Zusammenhänge in realen Systemen unmittelbar und ganzheitlich zu erfassen.

Es wird hier zwischen einer diskreten und kontinuierlichen Modellbildung unterschieden. Bei diskreten Systemen erhält man die Systemantwort aus einer endlichen Zahl von Zustandsgrößen, die meist in Form gekoppelter linearer Gleichungen auftreten. Die Antwort eines kontinuierlichen Systems muss aus der Lösung einer Differentialgleichung ermittelt werden, was aber nur in einfachen Fällen möglich ist. In der Praxis findet man komplizierte Geometrien, überlagerte Lastfälle und unterschiedliche Werkstoffe. Es ist ein Lösungsverfahren gefordert, welches universell, genau und auf kontinuierliche Systeme anwendbar ist.

Die FEM ist eine Methode, um partielle Differentialgleichungen 2. Ordnung zu lösen. Diese spielen im physikalisch – technischen Bereich eine besondere Rolle.

Sie besitzen allgemein die Form [bath95], [eckh78]:

$$A(x, y) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + 2B(x, y) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + C(x, y) \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \pi(x, y, u, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}) = f(x, y) \quad (1.1)$$

Dabei sind x, y die unabhängigen Variablen. $u(x, y)$ ist die Lösungsfläche oberhalb der x, y -Ebene. u wird Freiheitsgrad genannt. Je nach ihren Koeffizienten bezeichnet man die Differentialgleichung (1.1) als elliptisch, parabolisch oder hyperbolisch und zwar für [bath95]:

$$B^2 - 4AC \begin{cases} < 0: \text{elliptisch} \\ = 0: \text{parabolisch} \\ > 0: \text{elliptisch} \end{cases} \quad (1.2)$$

Einseitig offene Differentialgleichungen sind von der Zeit abhängig. Die Lösung ist dann zu einer Seite nicht begrenzt.

Ordnet man die Differentialgleichungen verschiedenen physikalischen Problemen zu, so erhält man für die einfachste Form die Laplacesche Gleichung, die Wärmeleitungsgleichung

sowie die Wellengleichung. Für eine bestimmte partielle Differentialgleichung gibt es eine unbegrenzte Anzahl von Lösungen. Die Zusatzbedingungen, die dazu dienen, eine geeignete Lösung für ein vorgegebenes Problem festzulegen, heißen Randbedingungen [eckh78]. Es kann zum Beispiel das Verhalten der Lösung auf einer Randlinie vorge-schrieben werden.

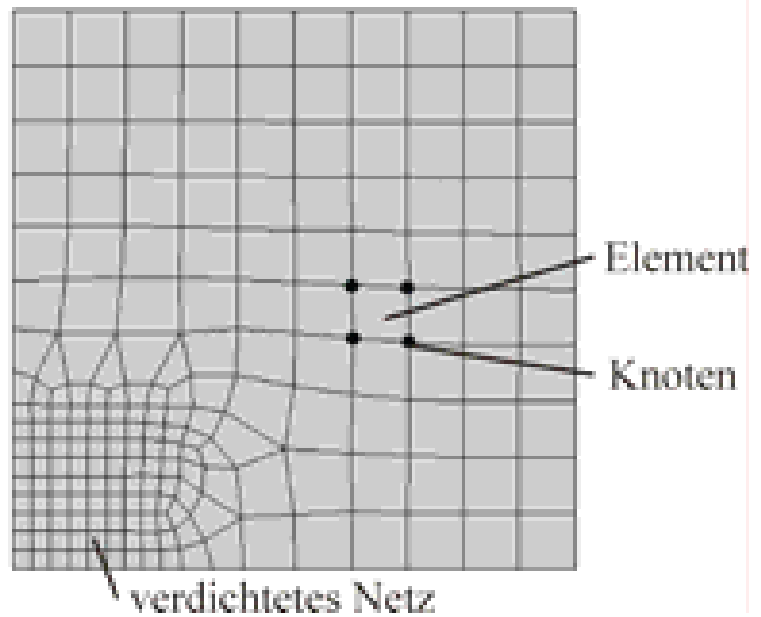


Bild 1.4: Vermaschung eines Vierecks mit zweidimensionalen Elementen

Zur Lösung dieser Differentialgleichungen stehen unterschiedliche mathematische Verfahren zur Verfügung. Bei der Methode der Finiten Elemente wird das Feldgebiet in einzelne Elemente, deren Verbindungspunkte Knoten genannt werden, unterteilt [schw93]. Die Außenkontur eines Elementes wird Masche bezeichnet, die Unterteilung des Feldgebietes als Vermaschung. **Bild 1.4** zeigt beispielhaft ein viereckiges Feldgebiet, welches mit zweidimensionalen Elementen vermascht ist. Ein Element kann in diesem Beispiel aus drei oder vier Knoten bestehen. Die numerische Lösung einer Differentialgleichung ist in der FEM eine Näherung, die innerhalb des Feldgebietes in diskreten Punkten berechnet wird.

Nach der Vermaschung wird eine Approximationsfunktion für den Freiheitsgrad innerhalb des Elementes ermittelt. Die Elementgleichungen und Systemgleichungen werden ermittelt. Anschließend wird das Gleichungssystem unter Berücksichtigung der Randbedingungen gelöst.

Um ein Problem mit einem FEM – Programm zu lösen, muss dieses zunächst methodengerecht aufbereitet werden [klei00]. Hierzu wird ein finites Analogon zum realen System gebildet. Zunächst wird die Geometrie des Systems in den Rechner eingegeben. Idealerweise kann diese direkt aus einem CAD – Programm importiert werden. Um die Rechenzeit zu minimieren ist hierbei zu prüfen, ob Symmetrien genutzt werden können und welche Geometrievereinfachungen zulässig im Sinne einer geringen Ergebnisabweichung sind. Anschließend ist zu wählen, welche physikalischen Größen (Freiheitsgrade) von dem FEM – Programm berechnet werden sollen (mechanische, elektrische, magnetische sowie Temperatur- oder Strömungsgrößen). Weiterhin sind an den Außenseiten des Modells geeignete