

Optimiertes Design industrieller induktiver Querfeld-Banderwärmungsanlagen

Von dem Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität Hannover

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieurin

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Grit Nauvertat
geboren am 17. Dezember 1970 in Stuttgart

2000

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. A. Mühlbauer
2. Referent: Prof. Dr.-Ing. H.-D. Stölting
Tag der Promotion: 21.12.2000

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Zuge meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Elektrowärme der Universität Hannover.

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Mühlbauer, der mir als Leiter des Instituts für Elektrowärme die Durchführung dieser Arbeit ermöglichte. Durch seine Anregungen und kritischen Fragen hat er meine Arbeit sehr gefördert.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. H.-D. Stölting bedanke ich mich für die Übernahme des Korreferates und die damit verbundene Mühe.

Herrn Prof. Dr.-Ing. B. Nacke danke ich für seinen Beitrag zum Promotionsverfahren als Vorsitzender der Prüfungskommission. Zusätzlicher Dank gilt ihm als neuem Leiter des Instituts für Elektrowärme für die Unterstützung meiner Arbeit.

Weiterhin bedanke ich mich bei meinen jetzigen und ehemaligen Kollegen für die stete Bereitschaft zu Diskussionen und für das gute Arbeitsklima. Hervorheben möchte ich dabei Herrn Dr.-Ing. Andreas Ruhnke und insbesondere Herrn Dr.-Ing. Alexander Nikanorov, die mir den Einstieg in das Arbeitsgebiet „Querfeld“ erleichtert und mit ihrem fachlichen Rat und ihrer Kritik sehr zum Gelingen der vorliegenden Arbeit beigetragen haben.

Für die gute Zusammenarbeit und die freundliche Unterstützung danke ich Herrn Dr.-Ing. P. Braun stellvertretend für die Messingwerk Plettenberg Herfeld GmbH & Co. KG.

Mein besonderer Dank gilt meinem Lebenspartner Herrn Matthias Vogt. Er hat mir während der Entstehung dieser Arbeit viel Verständnis und Rücksichtnahme entgegengebracht und mich stets ermutigt und unterstützt.

Bei meiner Mutter Frau Ingrid Nauvertat und Herrn Helmut Martin Dirks möchte ich mich ebenfalls bedanken. Sie haben mir meine Ausbildung ermöglicht und waren immer für mich da.

Für meinen Vater

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Problemstellung und Zielsetzung	4
3	Grundlagen der Quersfelderwärmung	8
3.1	Prinzip der induktiven Quersfelderwärmung	8
3.2	Auslegungsgrundlagen für Quersfeld-Erwärmungsanlagen	10
3.3	Analytischer Vergleich von Quersfeld- und Längsfelderwärmung	15
4	Modelle zur Berechnung von Quersfeld-Erwärmungsanlagen	22
4.1	Einfache Modelle	22
4.2	Problemangepaßtes Programmpaket HIHTEC	23
4.2.1	Berechnung des elektromagnetischen Feldes	23
4.2.2	Berechnung des Temperaturfeldes	25
4.2.3	Anpassungen und Erweiterungen für die Einbindung in die Optimierung	26
4.3	Universelles kommerzielles Programmpaket ANSYS	28
5	Optimierungsverfahren	30
5.1	Einführung und Begriffsdefinition	31
5.1.1	Designvariablen	31
5.1.2	Zielfunktion	32
5.1.3	Restriktionen und zulässiger Raum	34
5.1.4	Lokale und globale Minima	34
5.2	Klassifikation der Optimierungsmethoden	35
5.2.1	Indirekte Verfahren	37
5.2.2	Direkte Verfahren	37
5.2.3	Surface-Fitting-Techniken	41
5.3	Kopplung von Optimierungsalgorithmen mit numerischen Berechnungsprogrammen	42
6	Strategie des optimierten Designs	45
6.1	Konzept der Optimierung	46
6.2	Klassifikation von Quersfelderwärmern	48
6.3	Optimierung integraler Größen	51
6.3.1	Vorbereitende analytische Untersuchungen	52
6.3.2	Zweidimensionale numerische Untersuchungen	55
6.4	Optimierung verteilter Größen	57
6.4.1	Zielfunktion	58

6.4.2	Variablendefinition, Restriktionen und Optimierungsbeispiele	63
6.4.2.1	Gruppe 1 „Langer Induktor“	65
6.4.2.2	Gruppe 2 „Kurzer Induktor“	71
6.4.2.3	Gruppe 3 „Variabler Induktor“	74
6.5	Feinanalyse und technische Realisierung	80
6.5.1	Untersuchung möglicher parasitärer Effekte	80
6.5.2	Überführung der mathematischen in eine technische Lösung	83
6.6	Übertragung der Optimierungsstrategie auf andere Auslegungsaufgaben	88
7	Optimierung und Realisierung eines industriellen Querfelderwärmers	90
7.1	Definition der industriellen Anforderungen	90
7.2	Durchführung der Optimierung	92
7.2.1	Optimierung der integralen Größen	93
7.2.2	Optimierung der Temperaturverteilung	94
7.2.2.1	Zielfunktion und Wahl des Querfelderwärmerkonzeptes	96
7.2.2.2	Variablendefinition und Optimierung	97
7.2.2.3	Ergebnis der Temperaturoptimierung	107
7.3	Feinanalyse und technische Realisierung	110
7.3.1	Untersuchung möglicher parasitärer Effekte	111
7.3.2	Überführung der mathematischen in eine technische Lösung	114
7.3.2.1	Realisierung als Laboranlage	118
7.3.2.2	Praktische Hinweise für die industrielle Realisierung	125
8	Ausblick	126
9	Zusammenfassung	128
	Literatur	131

Formelzeichen

Vektorielle Größen werden durch einen Pfeil \vec{i} gekennzeichnet. Komplexe Größen werden unterstrichen \underline{U} dargestellt. Beträge komplexer Größen bezeichnen den Effektivwert.

Größe	Einheit	Bezeichnung
A	Vs/m	magnetisches Vektorpotential
A	m ²	Fläche
a_i	m	Leiterbreite im regulären Bereich
a_{ie}	m	Leiterbreite im Spulenkopf
b_i	m	Induktorlänge
b_m	m	Blechpaketlänge
b_s	m	Blechbreite
B	Vs/m ²	magnetische Flußdichte (Induktion)
c	m	Abstand Induktor - Blechkante
c_p	Ws/kg·K	spezifische Wärmekapazität
C_S	W/m ² K ⁴	Strahlungskonstante des schwarzen Körpers
d	m	Blechdicke
d_{Ind}	m	Leiterdicke des Induktors
e	%	Kantenbereich/Blechbreite
E	V/m	elektrische Feldstärke
f	Hz	Frequenz
f_z		Zielfunktion
f_S	N/m ²	Bandvorspannung
g	mm	Abstand zwischen Induktoren
g		Gleichungs-Nebenbedingung
h	m	Koppelspalt
h		Ungleichungs-Nebenbedingung
h_m	m	Blechpakethöhe
h_s	m	Nuthöhe im Blechpaket
i	1	Zählvariable
I	A	elektrischer Strom
j	1	Imaginäreinheit
j	1	Zählvariable
k	1	Spulenkopffaktor
l	m	Anlagenlänge
l_B	m	Ausdehnung der Beulung auf der Oberfläche

Größe	Einheit	Bezeichnung
l_E	m	Länge der Erwärmerzone
l_m	m	Blechpaketbreite
m	1	Zählvariable
m_f	1	Anzahl der Zielfunktionen
N	1	Anzahl der Layer
n	1	Zählvariable
p	1	Zählvariable
p	W/m ³	Wärmequellendichte
p_A	W/m ²	Flächenleistungsdichte
P	W	Leistung
P		Punkt
r	m	Abstand
S	VA	Scheinleistung
S	A/m ²	elektrische Stromdichte
S_A	A/m	elektrischer Strombelag
t	m	Polbreite
t	s	Zeit
T	K	absolute Temperatur
u	m	Verschiebung, Versatz
U	V	elektrische Spannung
\ddot{u}	1	Temperaturerhöhungsfaktor
v	m/s	Geschwindigkeit
w	1	Gewichtungsfaktor
x		Designvariable
x	m	Koordinate
y	m	Koordinate
z	m	Koordinate
α	W/m ² ·K	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient
α	1/K	Längenausdehnungskoeffizient
β	°	Drehwinkel
δ	m	elektromagnetische Eindringtiefe
ε	1	Emissionsgrad
ε		Grenze
η	%	elektrischer Wirkungsgrad
ϑ	°C	Temperatur
κ	1/Ωm	elektrische Leitfähigkeit

Größe	Einheit	Bezeichnung
λ	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
μ_0	Vs/Am	Permeabilität im Vakuum
π	1	Kreiszahl
ρ	kg/m ³	Dichte
φ	rad	Phasenwinkel
ψ	A	elektrische Stromfunktion
ω	1/s	Kreisfrequenz
ω_Q	1	dimensionslose Querfeldfrequenz

Indizes

A	-	Auslauf
A	-	Oberfläche
an	-	analytisch
Bl	-	Blech
E	-	Einlauf
el	-	elektrisch
Ind	-	Induktor
L	-	Längsfeld
max	-	maximal
min	-	minimal
n	-	normal
N	-	Netz
opt	-	optimal
Q	-	Querfeld
ref	-	Referenz
th	-	thermisch
theo	-	theoretisch
U	-	Umgebung
0	-	ohne Blechpaket

Kurzfassung

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines Auslegungsverfahrens für induktive Querfeld-Banderwärmungsanlagen. Besondere Aufmerksamkeit wird der Ausarbeitung eines Auslegungskonzeptes unter Verwendung eines automatischen Optimierungssystems gewidmet, in dem mathematische Optimierungsalgorithmen mit einem dreidimensionalen Modell zur Analyse der elektromagnetischen und thermischen Vorgänge im Querfeld verbunden werden.

Die induktive Querfelderwärmung bietet zahlreiche Vorteile gegenüber konkurrierenden Verfahren, da aufgrund ihres physikalischen Prinzips das Temperaturprofil im Blech nahezu beliebig gestaltet werden kann und eine energetisch effiziente Betriebsweise möglich ist. Mit dieser Flexibilität geht jedoch auch die Schwierigkeit einher, die Anlagen sicher zu entwerfen und sowohl die elektrischen Betriebsgrößen als auch die Geometrie optimal an den Anwendungsfall anzupassen. Zur Lösung dieser Aufgabe wird aus der Kombination des vorhandenen Expertenwissens und mathematischer Optimierungsmethoden ein Konzept zum optimierten Design induktiver Querfelderwärmer entwickelt. Das Herzstück des Auslegungsverfahrens stellt dabei das automatische Optimierungssystem dar, das auch auf andere Auslegungsaufgaben übertragbar ist.

Zur Vereinfachung der Auswahl geeigneter Optimierungsalgorithmen wird eine Klassifikation der verfügbaren Methoden durchgeführt und deren Eigenschaften hinsichtlich des Einsatzes für die Optimierung von induktiven Querfelderwärmern analysiert und bewertet. Ebenso werden verschiedene mögliche Zielfunktionen zur Beschreibung der gewünschten Anforderungen implementiert und deren Wirkungsweise untersucht.

Auf der Basis des vorgestellten Konzeptes wird die beispielhafte Auslegung einer industriellen Erwärmungsanlage durchgeführt. Zur Überprüfung der Ergebnisse wird eine entsprechend projektierte Laboranlage eingesetzt. Die an ihr erfolgten experimentellen Untersuchungen dienen der Verifikation der numerischen Ergebnisse und des entwickelten Auslegungskonzeptes. Die Anwendung des Auslegungskonzeptes und des entwickelten automatischen Optimierungssystems tragen wesentlich dazu bei, daß Anlagenhersteller Querfelderwärmer besser und sicher auslegen und prinzipbedingte Grenzen der verwendeten Anordnung schneller erkennen können. Im Vergleich zur manuellen Expertenlösung führt der automatische Optimierungsansatz zum optimalen Ergebnis. Anlagenbetreiber werden in die Lage versetzt, ihre Produkte mit optimal angepaßten induktiven Querfelderwärmern effizienter, kostengünstiger und mit höherer Qualität herzustellen.

Schlagworte: Banderwärmung, induktive Querfelderwärmung, Optimierung

Abstract

The subject of this work is the development of a method to design transverse flux induction heating (TFH) installations for thin strip. Special attention is paid to the creation of a design concept using an automatic optimisation-system. This system is based on the connection of mathematical optimisation-algorithms and a three-dimensional model to analyse electromagnetic and thermal processes in TFH-configurations.

The physical principle of TFH leads to numerous advantages in comparison to competing processes. TFH allows an energy efficient operation and facilitates to provide nearly every temperature-profile in the strip. This flexibility is connected with the difficulty to design the installations, that reach the best adapted geometry using the best electrical operation data. A concept for the optimal design of TFH-systems is developed to solve this task, which combines existing experts knowledge and mathematical optimisation-methods. The heart of this concept is the use of the automatic optimisation-system. In addition, this system is transferable also to other design-tasks.

A classification of available optimisation methods is carried out to simplify the selection of appropriate optimisation-algorithms. The suitability of the algorithms with regard to their use for the optimisation of TFH-applications is analysed and evaluated. Furthermore, several possible goal functions are implemented and investigated taking into account the requirements of different processes.

An exemplary industrial TFH-installation is designed on the basis of the presented design-concept. An implementation of this TFH-installation in laboratory scale is used to check the results of the developed concept, the optimisation procedure and the numerical results.

The application of the presented design-concept and the developed automatic optimisation-system considerably contributes to the optimal design of transverse flux induction heaters. Manufacturers of these installations are enabled to design optimal devices. In addition, the identification of limits in examined configurations is supported and can be done more quickly. In comparison to the experts solution using manual search the automatic optimisation leads to the optimum solution. The users of these advanced installations are able to manufacture their products more efficient, more economical and with higher quality.

keywords: strip heating, transverse flux induction heating, optimisation

1 Einleitung

Das kontinuierliche Erwärmen von dünnem metallischen Band ist in vielen industriellen Produktionslinien ein wichtiger Prozeßschritt. Die Anwendungsgebiete der Banderwärmung reichen von der Wärmebehandlung, Beschichtung und Trocknung von Blechen und Bändern bis zum Einsatz in Dünnbrammen- und Dünnbandgießanlagen zur Zwischenerwärmung vor dem Walzen [1, 2, 3, 4, 5]. Die Dicken der Bänder variieren zwischen 0,1 mm und 60 mm bei Breiten bis zu 2000 mm. Aufgrund der vielfältigen Einsatzgebiete der Banderwärmung für die unterschiedlichsten Materialien und Prozesse liegen die von den Erwärmern zu erzielenden Bandtemperaturen bei wenigen 100 °C zum Wärmebehandeln und bei Temperaturen oberhalb von 1200 °C zum Warmformen.

Die Herstellung von Halbzeugen unterschiedlichster Zusammensetzung und Qualitäten erfordert oft zum Erreichen gewünschter Materialeigenschaften eine Wärmebehandlung wie z. B. das Anlassen, Glühen oder Galvannealing. Die durch die Erwärmung hervorgerufenen Vorgänge ermöglichen das Einstellen von verschiedenen Härtegraden, Korngrößen und Oberflächenbeschaffenheiten. Die Produktpalette der Bleche und Bänder reicht von Stählen über Nichteisen-Metalle, wie Aluminium, Kupfer oder Messing, bis hin zu Edelmetallen, wie Gold, Silber, Platin etc. Aber auch das Trocknen, Beschichten und Galvanisieren von Blechen, wie beispielsweise das Verzinnen von Kupferlegierungen oder das Verzinken von Stahlband, ist mit der Erwärmung des Trägermaterials verbunden. Die Verwendung von Blechen und Bändern als sogenannte Halbzeuge ist vor allem in der metallverarbeitenden Industrie, wie z. B. der Automobil- oder Elektroindustrie, weit verbreitet.

Vor allem die Herstellung von Flachprodukten aus Stahl erfährt heutzutage aufgrund wirtschaftlicher und ökologischer Aspekte ein hohes Maß an Aufmerksamkeit. Die Entwicklung konzentriert sich auf Anlagen zur Herstellung von endabmessungsnahem Material in einer kontinuierlichen Linie, bei der Gieß- und Walzprozeß direkt miteinander verbunden sind. Seit dem Ende der 80er Jahre haben sich drei verschiedene Verfahrensrichtungen entwickelt, bei denen sich die Gießdicke von 50 mm bis 90 mm beim Dünnbrammengießen über 10 mm bis 15 mm beim Vorbandgießen auf 1 mm bis 5 mm beim Bandgießen reduziert hat [6]. Es wird erwartet, daß sich diese Tendenz mit immer dünneren Bändern als Ziel im Laufe der nächsten Jahre fortsetzt, da sich diese Technologie durch zahlreiche Vorteile auszeichnet. Sie bietet neben einem hohen Maß an Energieeinsparpotential die Möglichkeit, eine verbesserte Qualität der Produkte zu erreichen, während die Anlagenbaulängen bei gleichzeitiger Steigerung der Produktivität reduziert werden. Die relativ hohen Wärmeverluste nach dem Gießen können jedoch eine Zwischenerwärmung des Bandes im Bereich von 700 °C bis 1200 °C vor dem Walzen erfordern. Eine Inline-Wärmebehandlung mit spezieller Temperaturführung für das Band zwischen dem Gießen und Aufhaspeln erlaubt zudem, die Eigenschaften des Bandes einzustellen, bzw. neue Kombinationen dieser zu entwickeln. Die für beide Zwecke notwendige Erwärmung muß durch eine geeignete und zukunftsorientierte Methode

realisiert werden [6, 7, 8].

Bisher sind vornehmlich gas- oder widerstandsbeheizte Öfen zur Erwärmung der metallischen Bänder im industriellen Einsatz, die aber zukünftige Anforderungen aus wirtschaftlicher und ökologischer Sicht nicht erfüllen können. Die erreichbaren Leistungsdichten sind aufgrund der mittelbaren Wärmeübertragung beschränkt, was sich in der Baugröße und der Produktivität der Anlage niederschlägt [5, 7]. Hoher Energiebedarf, langsame Reaktionszeiten und damit geringe Flexibilität charakterisieren die Anlagen. Erhöhter Zunderanfall und Kornvergrößerung aufgrund der langen Verweilzeit im Ofen vermindern die Qualität der Produkte [7, 9, 3, 4]. Für die Erwärmung von dünnen, elektrisch leitfähigen Blechen und Bändern eignet sich daher statt der oben beschriebenen traditionellen Verfahren die induktive Erwärmung. Sie zeichnet sich durch zahlreiche prozeßtechnische aber auch wirtschaftliche und ökologische Vorteile gegenüber den traditionellen, brennstoffbeheizten Erwärmerstrecken aus. Durch

- die hohe erreichbare Leistungsdichte und den geringeren Platzbedarf,
- den hohen elektrischen und thermischen Wirkungsgrad,
- die hohe Automatisierbarkeit und große Flexibilität,
- die exakte Temperaturführung durch verzögerungsfreie Leistungsanpassung,
- die nicht vorhandene Schadstoffemission am Arbeitsplatz

ist die induktive Erwärmung in vielen Anwendungsbereichen und insbesondere bei der Erwärmung von dünnen metallischen Bändern den herkömmlichen Erwärmungsverfahren überlegen.

Die zur Erwärmung notwendige Energie wird beim induktiven Verfahren berührungslos auf das Werkstück übertragen. Dazu baut die Induktionsspule ein elektromagnetisches Wechselfeld auf, das in dem elektrisch leitenden Blech eine elektrische Spannung induziert. Diese Spannung verursacht einen Stromfluß, der durch *Joulesche* Verluste zur Erwärmung des Blechs führt. Entsprechend der Richtung des magnetischen Hauptflusses, entlang der Vorschubrichtung des Flachgutes oder senkrecht zur Oberfläche des Bleches, können Induktions-Erwärmungsanlagen der Längsfeld- oder der Quersfelderwärmung zugeordnet werden.

Aufgrund der extremen Seitenverhältnisse der dünnen Bänder und ihrer charakteristischen Eigenschaften ist die klassische induktive Erwärmung im Längsfeld nicht mehr wirtschaftlich einsetzbar. Für diese Erwärmung sind hohe Frequenzen erforderlich, die in der Bereitstellung teuer sind und einen schlechten elektrischen Wirkungsgrad zur Folge haben. Zudem sind dem elektrischen Wirkungsgrad insbesondere bei elektrisch hochleitfähigen Materialien niedrige Grenzen gesetzt. Eine gezielte Beeinflussung der Temperaturverteilung über der Bandbreite ist nicht realisierbar, wodurch der sinnvolle Einsatz eingeschränkt wird. Gerade bei der Zwischenerwärmung beim Dünnbrammen- und Dünmbandgießprozeß ist aufgrund der starken Abkühlung der Dünnbrammen eine

Wiedererwärmung mit stärkerer Wärmezufuhr in den Kantenbereichen erforderlich [8]. Aus diesen Gründen ist für die Erwärmung von dünnen, elektrisch hochleitfähigen Bändern die induktive Erwärmung im Querfeld vorzuziehen.

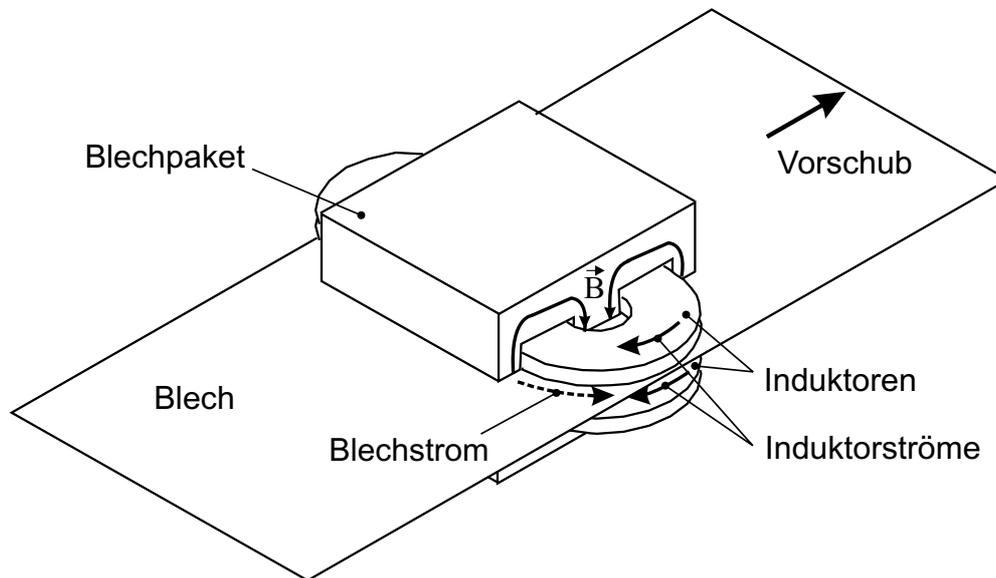


Abbildung 1.1: Prinzip der Querfelderwärmung

Neben den mindestens um eine Größenordnung niedrigeren Frequenzen erlaubt die Querfelderwärmung auch bei hochleitfähigen Materialien einen sehr hohen elektrischen Wirkungsgrad. Die auf beiden Seiten des Bleches angeordneten Induktoren, die einen magnetischen Hauptfluß quer zum Blech zur Folge haben (Bild 1.1), gewährleisten eine gute Handhabbarkeit und Flexibilität der Anlagen. Die im Blech induzierten Wirbelströme sind in grober Näherung eine Projektion des Induktorstromes auf die Blechoberfläche. Durch die geometrische Gestaltung der Induktionsspulen können deshalb gewünschte Temperaturprofile gezielt über der Blechbreite ohne merkliche Wirkungsgradverminderung eingestellt werden. Die Anpassung der Induktoren an unterschiedliche Materialien, Blechbreiten und -dicken ist ebenfalls möglich [3, 9, 10, 11, 1].

2 Problemstellung und Zielsetzung

Trotz der zahlreichen Vorteile der induktiven Querfeldanlagen zur Erwärmung von dünnen Blechen und Bändern gegenüber konventionellen gas- oder widerstandsbeheizten Öfen hat sich diese Technologie in der Industrie bisher noch nicht durchgesetzt. Grund hierfür ist vor allem die erschwerte Auslegung, da nicht wie bei den oben genannten Erwärmer eine bestimmte Temperatur eingepreßt wird, sondern durch die Verteilung der eingepreßten Leistungsdichte die geforderte Temperaturverteilung erreicht werden muß. Im Gegensatz dazu sind jedoch im industriellen Einsatz eine Vielzahl induktiver Längsfelderwärmer zu finden, die sich beispielsweise für die Erwärmung von Schmiedeblocken bereits zu einem großen Prozentsatz etabliert haben. Hier sind die physikalischen Zusammenhänge und die Einflüsse bzw. die Abhängigkeiten von verschiedenen Parametern geklärt. Aufgrund der analytisch beschreibbaren Feldsituation ist die Formulierung einfacher allgemeingültiger Auslegungskriterien möglich.

Im Vergleich zur Längsfelderwärmung ist das physikalische Verhalten einer induktiven Querfeldanordnung komplizierter. Der Vorteil des Querfelderwärmers, beliebige Temperaturprofile durch Variation der Geometrie der Anordnung einstellen zu können, geht mit der Schwierigkeit einher, die Wirkung sämtlicher beeinflussender Parameter und Abhängigkeiten zu kennen und sinnvoll bei der Auslegung der Anlagen zu berücksichtigen. Die Verteilung der elektromagnetischen und damit auch der thermischen und mechanischen Größen muß aufgrund der geometrischen Anordnung in jedem Fall dreidimensional beschrieben werden. Die Vielzahl an Parametern, die die Form und Lage der Spulen definieren und die elektrischen Eigenschaften des Systems beschreiben, sowie deren gegenseitige Beeinflussungen führen zu einem analytisch nicht mehr beschreibbaren Problem. Für die Abschätzung von integralen Größen können in den meisten Fällen zwar einfache analytische Zusammenhänge ausgenutzt werden, jedoch ist das für die Bestimmung der verteilten Größen wie Leistungsdichte- und Temperaturverteilung nicht mehr ausreichend. Zur Berücksichtigung der Kanteneffekte sind dreidimensionale numerische Simulationen unerlässlich. Da die für derartige Berechnungen notwendigen Rechenleistungen der Computer in der Vergangenheit nicht für eine vollständige Beschreibung der Probleme ausreichten und die adäquaten Simulationswerkzeuge nicht zur Verfügung standen, sind viele Auslegungsarbeiten auf experimentellem Wege durchgeführt worden.

Die sehr zeitaufwendigen und kostenintensiven Experimente führen jedoch nicht immer zur optimalen Lösung des hier vorliegenden Problems. Dieses wird im allgemeinen als inverses Problem bezeichnet, da eine bestimmte Konfiguration des Erwärmers gesucht wird, die ein zuvor definiertes Ziel, z. B. eine konkrete Temperaturverteilung, erfüllt [12]. Erste Arbeiten zur Auslegung von Querfeldinduktoren wurden bereits vor fünfzig Jahren durchgeführt [13, 14]. Seitdem wurden parallel zu experimentellen Untersuchungen Berechnungswerkzeuge entwickelt, die auf unterschied-

lichen Vereinfachungen und mathematischen Methoden basieren. Zwei-, aber auch dreidimensionale Modelle zur Berechnung der elektromagnetischen, thermischen und mechanischen Größen des Quersfeldproblems konnten geschaffen werden. [9, 15, 16, 17, 18, 3, 19, 20]. Alle diese Werkzeuge wurden aber fast ausschließlich zur Lösung von sogenannten direkten Problemen eingesetzt. Das heißt, mit Hilfe der mathematischen Modellierung konnte die Wirkung bestimmter Änderungen in der Konfiguration auf die definierte Zielgröße untersucht werden. Umfangreiche Parameterstudien führen in diesem Zusammenhang zu einer erweiterten Kenntnis über den Einfluß der Anlagen- und Betriebsparameter [3, 17, 20]. Mit den dabei gewonnenen Erkenntnissen wurden Änderungen an der Basiskonfiguration vorgenommen und wiederum deren Auswirkung auf die Zielgröße überprüft. Dieses ingenieurmäßige Vorgehen wird im folgenden als Expertenlösung bezeichnet und ist ein weit verbreiteter Ansatz zur Lösung inverser Probleme.

In der Vergangenheit führte die Forschung auf dem Gebiet der Quersfelderwärmung zu zahlreichen Entwicklungen von Quersfeldinduktoren, die vereinzelt in der Industrie eingesetzt wurden. Ein Konzept zur gezielten Beeinflussung der Temperaturverteilung im Blech sieht beispielsweise feldbeeinflussende Elemente wie hochpermeable und hochleitfähige Materialien zur Feldkonzentration und Schirmung vor, während andere über die variable Geometrie, d. h. justierbare Induktoren, dieses Ziel zu erreichen versucht [1, 21, 11]. Weitere Anstrengungen werden dahingehend unternommen, durch unterschiedliche Taktung einzelner mäanderförmiger Induktorzweige das geforderte Temperaturprofil für unterschiedliche Bänder einzustellen [22]. Eine Fülle von Ideen ist im Zuge der Induktorgestaltung zu Patenten angemeldet worden. Vor allen Dingen in Japan sind sehr komplizierte Spulen und Blechpaketanordnungen patentrechtlich geschützt worden, die aber aufgrund ihrer komplizierten Bauform keine Verbreitung gefunden haben. Im Mittelpunkt aller Untersuchungen steht dabei immer wieder der Anspruch, einen Erwärmer zu entwickeln, der universell für unterschiedliche Blechbreiten und -dicken einsetzbar ist. Doch die bisherigen Ansätze konnten sich im industriellen Einsatz gegenüber den traditionellen Erwärmerstrecken nur in Einzelfällen durchsetzen.

Die in vielen anderen Bereichen praktizierte Expertenlösung führt bei der Quersfelderwärmung nicht zum optimalen Ergebnis. Dieses muß in einem weiteren Schritt durch die vollständige Lösung des inversen Problems gefunden werden [23]. Als geeignete Methode bietet sich hier die automatische Optimierung, d. h. die Kopplung eines mathematischen Optimierungsalgorithmus mit leistungsfähigen Simulationswerkzeugen, an [24, 25, 26]. Über die Definition des Zieles in Form einer Funktion wird die Berechnung einer Anordnung mit jeweils veränderten Eingangsparametern so oft durchlaufen, bis das Ziel erreicht ist. Diese Vorgehensweise wird in vielen Bereichen der Auslegung elektrotechnischer Anlagen zur Lösung einfacherer Aufgaben bereits eingesetzt. Eine Übertragung dieses Konzeptes auf die Quersfelderwärmung schien jedoch aufgrund der oben beschriebenen dreidimensionalen Verhältnisse und der damit verbundenen hohen benötigten Rechenzeit bisher unmöglich [10, 27].

Mit dem am Institut für Elektrowärme vorhandenem Know-how, dem entwickelten problemangepassten Programmpaket HIHTEC und der heute zur Verfügung stehenden Rechenleistung moderner Computer kann dieser Schritt nun auch für dreidimensionale Berechnungen, speziell für die Quersfelderwärmung realisiert werden. Die Lösung dieser Aufgabe ist Gegenstand der vorliegenden Arbeit, um eine echte Optimierung von induktiven Quersfeldsystemen zu ermöglichen. Dazu ist nicht nur die Implementierung der rein mathematischen Optimierungsalgorithmen Hauptziel der Arbeiten, sondern ebenfalls die Berücksichtigung sämtlicher bisher bekannter Zusammenhänge der Quersfelderwärmung. Aus der Kombination des Expertenwissens, das sich auf umfangreiche Parameterstudien und Experimente stützt, und der mathematischen Optimierung wird ein Konzept zum optimierten Design induktiver Quersfelderwärmer entwickelt, das auch auf andere Auslegungsaufgaben übertragbar ist. Mit der Schaffung eines Optimierungssystems, das die Kopplung von dreidimensionalen numerischen Berechnungen mit mathematischen Optimierungsalgorithmen erlaubt, entsteht ein automatisiertes Optimierungswerkzeug, das vorteilhaft für das Design von elektrothermischen Anlagen eingesetzt werden kann. Die Einbindung dieser automatischen Optimierung in das Auslegungskonzept bietet neben der erleichterten Suche nach dem Optimum gleichzeitig auch die Möglichkeit, umfassende Parameterstudien durchzuführen, um das komplexe System der Quersfelderwärmung weiter zu durchdringen. Nicht zuletzt können durch die Verwendung der Optimierungsschleife mit erheblich vermindertem Aufwand die Grenzen von Quersfeldanordnungen aufgezeigt werden. Zusätzlich notwendige Variablen können so leicht erkannt und neue Ideen zur Entwicklung von Quersfeldinduktoren bestimmter Charakteristik entwickelt werden.

Die Ziele der vorliegenden Arbeit lassen sich vor dem Hintergrund der beschriebenen Problematik durch folgende Punkte stichwortartig zusammenfassen:

- Entwicklung eines Konzeptes zur Auslegung von induktiven Quersfelderwärmern mit Hilfe mathematischer Optimierungsalgorithmen
- Kopplung mathematischer Optimierungsalgorithmen mit dreidimensionalen numerischen Berechnungen der elektromagnetischen und thermischen Felder
- Automatisierung der Berechnungsprogramme für die Optimierung
- Charakterisierung und Auswahl geeigneter Zielfunktionen
- Aufzeigen der Möglichkeiten des automatischen Optimierungssystems anhand der Untersuchung des Potentials unterschiedlicher Anordnungen der induktiven Quersfelderwärmung
- Analyse und Bewertung der angewendeten Optimierungsalgorithmen und der Einflüsse wichtiger Anlagen- und Betriebsparameter
- Durchführung einer exemplarischen Auslegung für einen konkreten industriellen Anwendungsfall
- Experimentelle Verifikation numerischer Berechnungen

Mit dieser Arbeit wird der nächste Schritt in der Entwicklung von induktiven Querfeldanlagen eingeleitet. Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen dazu beitragen, Querfeldinduktoren besser auslegen und konzept- bzw. anordnungsbedingte Grenzen schneller feststellen zu können. Die Kombination aus Expertenlösung einerseits und rein mathematischer Optimierung andererseits führt zu einem sehr effektiven Werkzeug, die Auslegungsproblematik beherrschen zu können. Auf diese Weise werden zeit-, kosten- und arbeitsintensive experimentelle Untersuchungen reduziert. Numerische Simulationen werden als Einzelschritte der Optimierungsschleife ebenfalls zeit- und arbeitssparend aufgrund der Automatisierung durchgeführt. Der Anwender wird dadurch in die Lage versetzt, mit optimal ausgelegten induktiven Querfelderwärmern seine Produkte effizienter, günstiger und mit höherer Qualität herstellen zu können.

3 Grundlagen der Querfelderwärmung

Entsprechend der Orientierung des vom Induktor verursachten magnetischen Hauptflusses wird bei der induktiven Erwärmung zwischen der Erwärmung im Längsfeld und der im Querfeld unterschieden. Bei der klassischen induktiven Längsfelderwärmung von Bändern ist das Feld in Richtung des Vorschubes des Bandmaterials gerichtet. Die Spule umschließt das Blech vollständig und führt zu Wirbelströmen im Gut, die ein dem Primärfeld entgegengesetztes Magnetfeld verursachen. Ausgehend von dieser bekannten Induktoranordnung wird im folgenden auf das Prinzip der Querfelderwärmung eingegangen sowie Vor- und Nachteile im Vergleich zur Längsfelderwärmung dargestellt. Anschließend wird eine Übersicht über die bisher bekannten Auslegungsgrundlagen gegeben, auf deren Basis das in dieser Arbeit vorgestellte Konzept zum optimierten Design von Querfelderwärmern entwickelt wurde. Um die Vorteile der Querfelderwärmung gegenüber der Längsfelderwärmung zu verdeutlichen, wird ein detaillierter Vergleich der theoretisch maximalen Wirkungsgrade und der dafür notwendigen Frequenzen durchgeführt. Dazu werden analytische Abschätzungen der oben genannten Größen durchgeführt, die für die Optimierung der Querfelderwärmer verwendet werden können. Ein Zahlenbeispiel unterstreicht die Vorteile der Querfelderwärmung.

3.1 Prinzip der induktiven Querfelderwärmung

Im Gegensatz zur induktiven Erwärmung im Längsfeld sind bei der Querfelderwärmung die Induktoren ober- und unterhalb des Blechs angeordnet, so daß das Gut von den Seiten aus zugänglich ist. Der in den Induktoren fließende Strom hat ein magnetisches Feld zur Folge, dessen Feldlinien aufgrund der beschriebenen Anordnung senkrecht zur Oberfläche des Blechs gerichtet sind. Zur Führung des Flusses werden im allgemeinen Blechpakete eingesetzt, in die die Induktoren eingebettet sein können (Bild 3.1). Abhängig von der Geometrie der Spulen und des Blechpaketes bilden sich unterschiedliche magnetische Feldverteilungen und damit auch induzierte Ströme aus, die maßgeblich die Erwärmung des Blechs bestimmen. Aus diesem Grund ist bei der Querfelderwärmung der Geometrie der Anlage neben den elektrischen Betriebsgrößen besondere Aufmerksamkeit zu widmen.

Für die Erwärmung von dünnen Blechen und Bändern ist in vielen Fällen die induktive Querfelderwärmung der im Längsfeld vorzuziehen. Gerade bei unmagnetischen und elektrisch gut leitfähigen Materialien, die in dieser Arbeit ausschließlich behandelt werden, zeichnet sich die Querfelderwärmung durch den sehr hohen erreichbaren elektrischen Wirkungsgrad aus (Abschnitt 3.3). Aufgrund der Anordnung der Induktoren der Längsfelderwärmung schließen sich die im Blech fließenden Ströme über den Werkstückquerschnitt. Der Nutzfluß ist dann durch die Querschnitts-

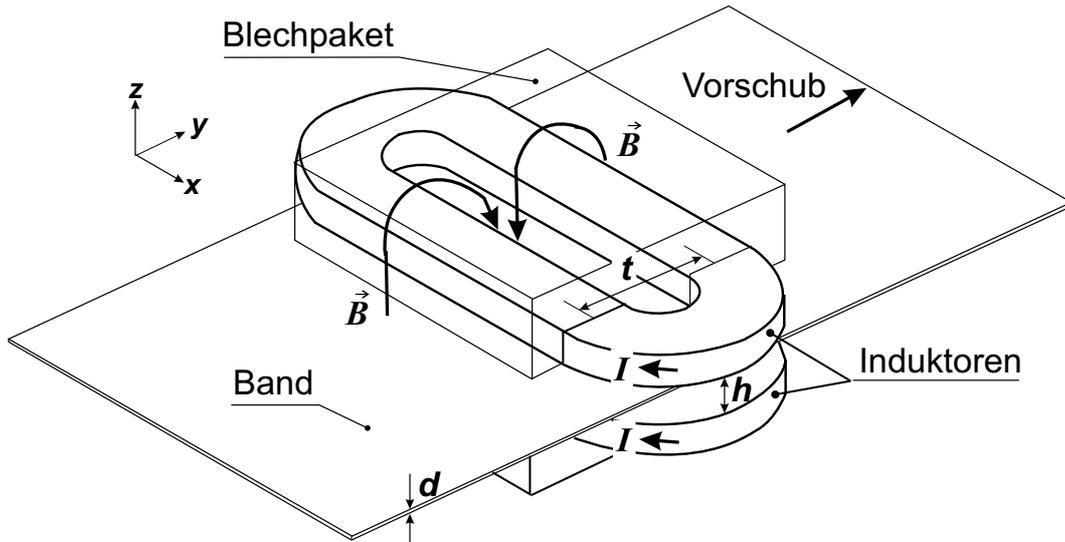


Abbildung 3.1: Prinzipieller Aufbau eines induktiven Querfelderwärmers mit der Polbreite t , dem Koppelspalt h und der Blechdicke d

fläche des Werkstücks begrenzt. Anders sind die Zusammenhänge bei der induktiven Erwärmung im Querfeld geartet. Durch die Anordnung der Induktoren ober- und unterhalb des Blechs ist bei der Querfelderwärmung die vom elektromagnetischen (EM) Feld durchsetzte Fläche nicht durch den Querschnitt des Blechs begrenzt. Unabhängig von der Blechdicke d kann eine sehr gute Kopplung des Hauptfeldes mit den im Blech fließenden Wirbelströmen über die Größe der Polbreite t erreicht werden (Bild 3.1).

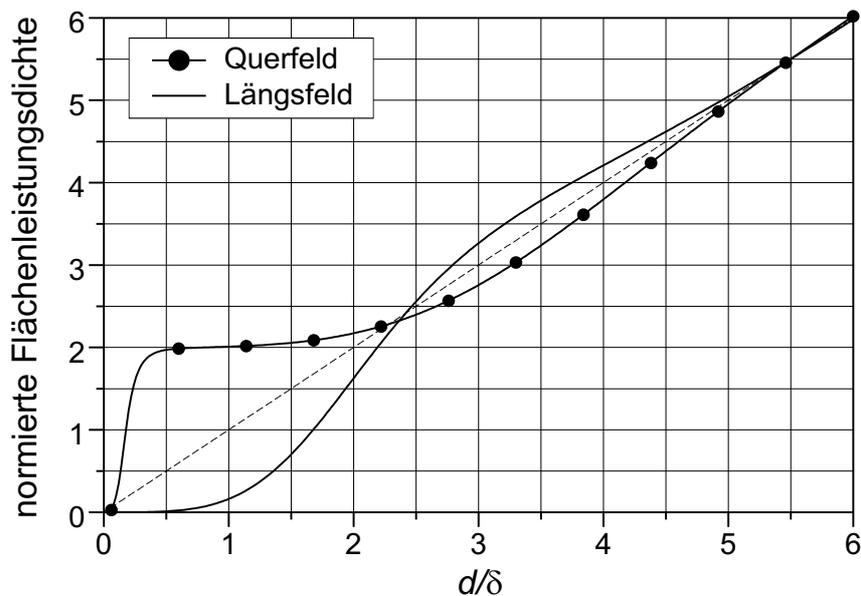


Abbildung 3.2: Normierte Flächenleistungsdichte im Querfeld und im Längsfeld in Abhängigkeit des Parameters d/δ bei konstanter Primärinduktion und konstanter Blechdicke [20]

Eine sehr gute Kopplung ist schon bei sehr niedrigen Frequenzen möglich, bei denen die EM-

Eindringtiefe δ größer als die Blechdicke d ist. Das Blech ist in diesem Fall nahezu transparent für das EM-Feld, und es kann von einer homogenen Stromdichteverteilung über der Blechdicke ausgegangen werden. Im Vergleich dazu werden bei der Längsfelderwärmung von Blechen wesentlich höhere Frequenzen benötigt, da erst bei starker Feldabsorption eine gute Kopplung erreicht wird. Die qualitativen Verläufe der Leistungsumsetzung bei der Quersfeld- und der Längsfelderwärmung sind in Bild 3.2 dargestellt. Die Zusammenhänge sind auf analytischem Wege in [20] abgeleitet worden. Während bei der Quersfelderwärmung schon bei niedrigen Frequenzen mit $d/\delta < 1$ bereits eine hohe Leistungsumsetzung stattfindet, setzt diese bei der Längsfelderwärmung erst bei höheren Frequenzen für $d/\delta > 2$ ein. Die für die Quersfelderwärmung erforderliche Frequenz liegt um mehr als eine Größenordnung unterhalb der für das Längsfeld (Abschnitt 3.3). Steigt die Frequenz im Quersfeld stark an, nähern sich die elektromagnetischen Verhältnisse denen des Längsfeldes an. Das Blech wird für das Feld zunehmend intransparenter, so daß sich zahlreiche Feldlinien tangential über der Oberfläche des Blechs schließen.

Ein entscheidender Vorteil der Quersfelderwärmung gegenüber der Längsfelderwärmung ist zudem die Möglichkeit, die Temperaturverteilung über der Blechbreite gezielt zu beeinflussen. Zwar nimmt die Form der Spule bei der Längsfelderwärmung Einfluß auf die Effektivität der Erwärmung, jedoch läßt sich mit der Geometrie der Spule nicht das Temperaturfeld über der Blechbreite gestalten. Das Gut ist immer von der Induktionsspule umschlossen, so daß die Stromdichte und damit die Wärmequellendichte an der gesamten Oberfläche des Gutes homogen verteilt ist. Es können nicht gezielt bestimmte Bereiche der Blechoberfläche mit einer höheren Stromdichte beaufschlagt werden. Eine gewünschte Überhitzung der Kanten, z. B. für einen angeschlossenen Walzvorgang, ist nicht möglich. Im Gegensatz dazu können aufgrund der dreidimensional ausgeprägten Geometrie der Quersfelderwärmung nahezu beliebige Temperaturprofile über der Blechbreite eingestellt werden, da die im Blech induzierten Ströme in grober Näherung eine Projektion des Induktorstromes sind. Hierin liegt jedoch auch die Schwierigkeit bei der Auslegung der Anlagen. Nicht nur die elektrischen Betriebsgrößen, sondern auch die geometrischen Größen müssen auf den jeweiligen Anwendungsfall genau angepaßt werden.

3.2 Auslegungsgrundlagen für Quersfeld-Erwärmungsanlagen

Bei der Auslegung von Quersfeld-Erwärmungsanlagen sind neben äußeren Rahmenbedingungen, die sich z. B. aus räumlich festgelegten Grenzen ergeben, auch prinzipbedingte Beschränkungen und Empfehlungen zu berücksichtigen, damit der Prozeß so effektiv und stabil wie möglich abläuft. Erste Richtlinien zur Auslegung wurden bereits 1950 in [13, 14] formuliert. Aber erst mit der fortgeschrittenen Entwicklung in der Leistungselektronik wurden die Arbeiten in diesem Bereich wieder aufgenommen [28, 29, 30] und bis in die heutige Zeit weiterentwickelt [20, 31, 9].

Als Grundlage für das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Auslegungskonzept von Querfelderwärmern erfolgt an dieser Stelle eine Zusammenfassung der bekannten Abhängigkeiten sowie der Auslegungsgrundlagen von induktiven Querfelderwärmern. Es werden die wichtigsten Parameter und ihr Einfluß auf die elektrische Effizienz und die Temperaturverteilung im Band analysiert. Aspekte für einen sicheren Betrieb ohne Instabilitäten in der Temperaturverteilung aufgrund von parasitären mechanischen Effekten werden ebenfalls berücksichtigt [20].

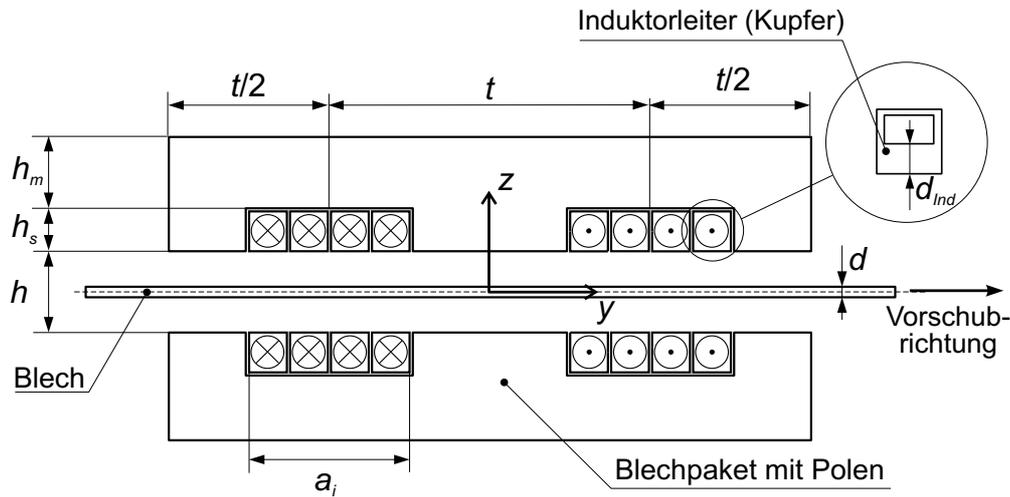


Abbildung 3.3: Basisanordnung einer Querfeld-Erwärmungsanlage zur Erläuterung der Auslegungsgrundlagen mit der Polbreite t , dem Koppelspalt h , der Blechdicke d , der Leiterbreite a_i , der Kanalhöhe h_s , der Blechpakethöhe h_m und der Leiterdicke d_{Ind}

Als Maß für die elektrische Effizienz des Erwärmungsverfahrens werden der elektrische Wirkungsgrad η_{el} und der Leistungsfaktor $\cos \varphi$ herangezogen. Der elektrische Wirkungsgrad ist bestimmt durch den Zusammenhang

$$\eta_{\text{el}} = \frac{P_{\text{Bl}}}{P_{\text{Bl}} + P_{\text{Ind}}}, \quad (3.1)$$

wobei P_{Bl} die im Blech umgesetzte Nutzleistung und P_{Ind} die Verlustleistung im Induktor darstellen. Der Leistungsfaktor $\cos \varphi$ beschreibt das Verhältnis zwischen der dem Netz entnommenen Wirkleistung P_N und der Scheinleistung S_N

$$\cos \varphi = \frac{P_N}{S_N} \quad \text{mit } \varphi = \angle(U_N, I_N). \quad (3.2)$$

Der Winkel φ kennzeichnet die Phase zwischen der Netzspannung U_N und dem Netzstrom I_N . Als weitere charakteristische Kenngröße des elektromagnetischen Prozesses läßt sich die dimensionslose Querfeldfrequenz ω_Q

$$\omega_Q = \frac{\mu_0 \cdot \omega \cdot \kappa \cdot t \cdot d}{4 \cdot \pi} \quad (3.3)$$

definieren, wobei μ_0 die Permeabilität im Vakuum, ω die Kreisfrequenz und κ die elektrische Leitfähigkeit des Bandes darstellen [32]. Ist bei gleicher Erwärmerkonfiguration und Bandbreite die

Quersfeldfrequenz ω_Q konstant, so stellen sich selbst bei unterschiedlichen Materialeigenschaften und Dicken des Bandes vergleichbare elektromagnetische Verhältnisse im Blech ein.

Einfluß der Leistung P

Im Band ergibt sich abhängig von der Stromführung in den Induktoren eine Flächenleistungsdichte p_A . In Verbindung mit der kontinuierlichen Bewegung des Bandes durch die Anlage erfährt das Blech eine bestimmte Erwärmung, die durch das Temperaturprofil über der Blechbreite am Ende der Erwärmungsstrecke charakterisiert wird. Erfahrungen in der Vergangenheit haben gezeigt, daß die mittlere Flächenleistungsdichte im Band nicht zu hoch gewählt werden darf, da andernfalls der Erwärmungsprozeß nicht mehr sicher ablaufen kann. Große, aus der zu hohen Flächenleistungsdichte resultierende, EM-Kräfte können zu mechanischen Effekten, wie Vibrationen, Schwingungen und auch Geräuschemissionen, führen. In [33] werden 1 MW/m^2 bis $1,5 \text{ MW/m}^2$ als obere Grenze für die mittlere Flächenleistungsdichte angegeben, bei der der Prozeß sicher abläuft.

Einfluß des Koppelspaltes h

Zur Erlangung eines hohen elektrischen Wirkungsgrads und eines hohen Leistungsfaktors sollte der Koppelspalt h , der den Abstand zwischen dem oberen und unteren Induktor kennzeichnet (Bild 3.3), so gering wie möglich gewählt werden. Dadurch wird die EM-Kopplung verbessert, der Nutzfluß steigt und der Streufluß nimmt ab. Da das Blech jedoch durch den Koppelspalt hindurch transportiert werden muß und der lichte Spalt aufgrund thermischer Schutzelemente für die Spulen oft zusätzlich reduziert wird, ist der minimale Koppelspalt durch mechanische Erfordernisse begrenzt. Die Form und die mechanische Führung des zu erwärmenden Bandes ist bei der Wahl des minimalen Koppelspaltes zu berücksichtigen, da sonst mit mechanischen Kontakten zwischen Blech und Wärmeschutz oder Spule gerechnet werden muß. Beschädigungen des Erwärmers oder lokale Überhitzungen des Bandes können dann nicht mehr ausgeschlossen werden.

Einfluß von Blechpaketen

Ebenfalls sehr positiv auf den Wirkungsgrad und den Leistungsfaktor wirken Blechpakete bzw. Ferrite zur Feldführung oberhalb und unterhalb der Induktionsspulen. Aufgrund ihrer hohen magnetischen Leitfähigkeit wird der Widerstand im magnetischen Kreis reduziert und bei gleicher Erregung durch den Spulenstrom ein höherer Nutzfluß erreicht. Gerade bei elektrisch hochleitfähigen Blechen und Bändern, wie Edelmetallen, Aluminium, Kupfer und Kupferlegierungen, kann nur mit Blechpaketen ein hoher elektrischer Wirkungsgrad erzielt werden. Für zu erwärmendes Material mit einer schlechteren elektrischen Leitfähigkeit, wie z. B. Stahl, kann auch eine Anordnung ohne Blechpakete einen akzeptablen elektrischen Wirkungsgrad liefern. Materialien geringer

elektrischer Leitfähigkeit werden im Rahmen dieser Arbeit nicht näher betrachtet, so daß bei allen Quersfeldanordnungen die Blechpakete unerlässlich sind. Ein weiterer Vorteil von Blechpaketen ist die Beeinflussungsmöglichkeit der Temperaturverteilung. Über die gezielte Lenkung des Feldes durch z. B. zusätzliche partielle Ferrite oder Blechpakete können lokale Überhitzungen an den Rändern vermieden oder bestimmte Bereiche des Bandes einer stärkeren Erwärmung ausgesetzt werden.

Einfluß der Polbreite t

Eine weitere einflußreiche geometrische Größe ist die Polbreite t , die den mittleren Abstand zwischen den Induktorleitern beschreibt (Bild 3.3). Mit zunehmender Polbreite t wird eine größere Fläche von den Induktionsspulen aufgespannt, die den Nutzfluß senkrecht zur Bandoberfläche steigen läßt. Die dadurch erreichte bessere Ankopplung führt zu einem höheren elektrischen Wirkungsgrad. Im allgemeinen kann davon ausgegangen werden, daß ab einer Polbreite von $t > 3h$ ein günstiger elektrischer Wirkungsgrad gewährleistet werden kann [20]. Über die Größe der Polbreite läßt sich jedoch auch das Temperaturprofil über der Blechbreite beeinflussen, so daß die endgültige Wahl der Polbreite oft einen Kompromiß darstellen muß. Als Anhaltswert hinsichtlich einer homogenen Temperaturverteilung wird für den ersten Ansatz eine Polbreite $t = b/3 \dots b/4$ empfohlen [34]. Um eine temperaturstabile Erwärmung zu erhalten, d. h. Deformationen oder ungenaue Bandführung bleiben ohne Einfluß auf die Temperaturverteilung im Band, sollte die Polbreite bei Anordnungen mit Blechpaket größer als der doppelte Koppelspalt $t > 2h$ sein [20]. Nach oben wird die Polbreite durch den für die Anlage zur Verfügung stehenden Platz begrenzt.

Einfluß der Frequenz f

Mit steigender Frequenz wächst der elektrische Wirkungsgrad der Quersfeldanordnung zunächst aufgrund der verbesserten Ankopplung stark an. Nach dem Erreichen eines Maximums sinkt er durch die vergleichsweise höheren Stromwärmeverluste im Induktor wieder leicht ab (Abschnitt 3.3). Abhängig von der gewählten Polbreite t ergeben sich für jedes Blechmaterial der maximale elektrische Wirkungsgrad und der höchste Leistungsfaktor bei leicht unterschiedlichen Frequenzen. Einen Kompromiß zur Erlangung hoher Werte für beide integrale Größen für den praktischen Anwendungsfall einer Quersfeldanlage mit Blechpaketen stellt die Wahl der optimalen Frequenz f_{opt} nach [20, 31] dar, die anhand der analytischen Berechnungsvorschrift

$$f_{\text{opt}} \approx \frac{0,76}{\mu_0} \cdot \frac{1}{\kappa d t}, \quad (3.4)$$

bestimmt werden kann. Dabei wird vorausgesetzt, daß die Blechbreite b_s mindestens doppelt so groß wie die Polbreite t ist. Zurückzuführen ist diese Vorschrift auf umfangreiche numerische Untersuchungen [20]. In diesem Fall ist die Quersfeldfrequenz ω_Q konstant und beträgt 0,38. Nach

Gleichung (3.4) ist der Zusammenhang zwischen optimaler Frequenz und Polbreite t annähernd umgekehrt proportional. Ändert sich die elektrische Leitfähigkeit κ oder die Dicke d des Bandes, so muß die Frequenz ebenfalls angepaßt werden, da sie sich umgekehrt proportional zum Blechleitwert κd verhält. Für eine Anordnung ohne feldführende Elemente ergibt sich für die optimale Frequenz $f_{\text{opt},0}$ nach [20] näherungsweise der doppelte Wert von f_{opt} .

Auch bei der Wahl der Frequenz kann ein Kompromiß zwischen maximalem Wirkungsgrad und Leistungsfaktor sowie der Temperaturverteilung im Blech sinnvoll sein, da die Frequenz eine wirkungsvolle Beeinflussungsmöglichkeit für die Temperaturverteilung darstellt (siehe Abschnitt 6.4.2.1).

Einfluß der Leiterbreite a_i

Die Breite des Leiterpaketes a_i (Bild 3.3) nimmt ebenfalls Einfluß auf den elektrischen Wirkungsgrad und die Temperaturverteilung. Zunächst steigen mit zunehmender Breite a_i der elektrische Wirkungsgrad und der Leistungsfaktor an, um dann bei maximalem Wert für a_i , der aus geometrischen Gründen direkt durch die Polbreite t festgelegt ist, wieder leicht abzufallen. Ursache für das Ansteigen von Wirkungsgrad und Leistungsfaktor ist die Verminderung des Streuflusses. Streufeldlinien, die das Leiterpaket umschließen ohne das Band zu durchtreten, werden über größere Distanzen in der Luft geführt. Wird die Breite des Leiterpaketes zu groß, verringert sich aus geometrischen Gründen die zur Flußführung notwendige Querschnittsfläche der Blechpakete, die dann durch sehr hohe Flußdichten belastet werden. Bei der Auslegung erweist sich aufgrund der oben erläuterten Zusammenhänge der folgende Wertebereich für die Breite des Leiters a_i als besonders günstig:

$$a_i = (0,5 \dots 0,75)t \quad (3.5)$$

Einfluß der Spulenköpfe

Eine weitere Beeinflussungsmöglichkeit der Temperaturverteilung kann durch die spezielle Gestaltung der Spulenköpfe erreicht werden. In diesem Fall ist eine analytische oder zweidimensionale Bestimmung der zu erwartenden Effekte durch z. B. zurückstehende Spulenköpfe spezieller Geometrie nicht mehr möglich. Qualitativ läßt sich der Einfluß der Köpfe jedoch abschätzen. Je nach geometrischer Lage der Spulenköpfe im Verhältnis zum Band, d. h. Überstehen oder Zurückstehen, läßt sich sowohl Kantenüberhitzung als auch -unterkühlung erreichen. Durch die Ausführung der Köpfe in rechteckiger, runder oder anders gearteter Geometrie kann das Temperaturprofil weiterhin variiert werden. Eine genaue Untersuchung der Verhältnisse ist nur über eine dreidimensionale Berechnung möglich.

3.3 Analytischer Vergleich von Quersfeld- und Längsfelderwärmung

Zum Vergleich der Quersfeld- und der Längsfelderwärmung werden analytische Abschätzungen des maximal erreichbaren elektrischen Wirkungsgrades durchgeführt, die das große Potential der Quersfelderwärmung erkennen lassen. Die für den maximalen Wirkungsgrad notwendigen Frequenzen können ebenfalls abgeleitet und verglichen werden.

Quersfelderwärmung

Bei üblichen Anordnungen der Quersfelderwärmung ist die Blechbreite b_s größer als die Polbreite t (Bild 3.4). Im Fall $b_s/t > 2$ ist es möglich, für die Abschätzung der integralen Größen, die maßgeblich durch den regulären Bereich bestimmt werden, die Kantenbereiche der Anordnung zu vernachlässigen. Im regulären Bereich sind die elektromagnetischen Feldgrößen weitgehend unabhängig von der x -Koordinate, so daß zweidimensionale Verhältnisse vorliegen.

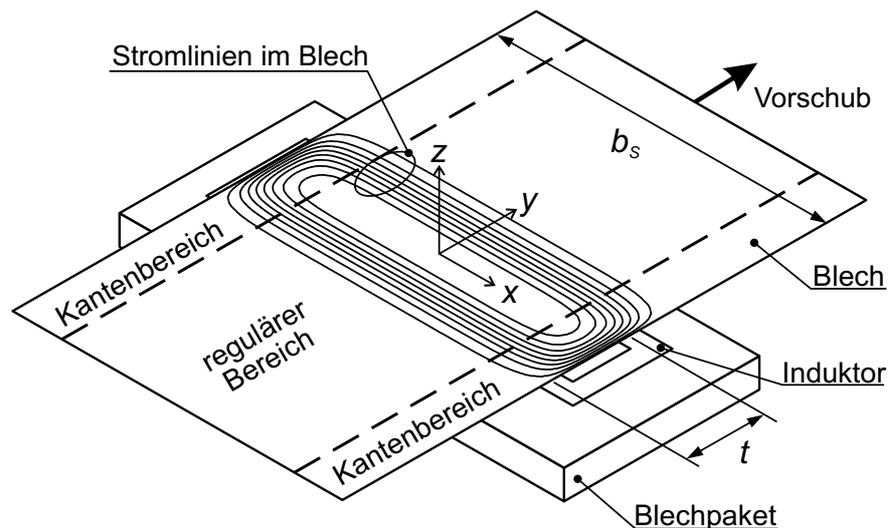


Abbildung 3.4: Regulärer Bereich und Kantenbereich bei der Quersfelderwärmung (nur unterer Induktor und unteres Blechpaket dargestellt)

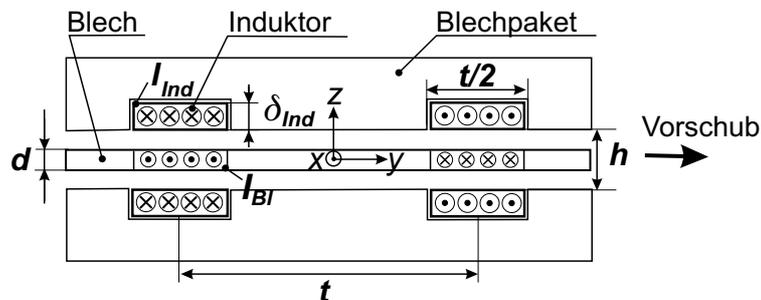


Abbildung 3.5: Quersfeldanordnung für die analytische Wirkungsgradabschätzung

Zur analytischen Abschätzung des maximal erreichbaren elektrischen Wirkungsgrades dient da-

her die einfache Quersfeldanordnung gemäß Bild 3.5. In Richtung der x -Achse ist die Anordnung unendlich ausgedehnt. Unter der Voraussetzung von vorhandenen Blechpaketen, in die die Induktoren eingebettet sind, kann die Annahme einer homogenen Stromverteilung im Induktor mit $\underline{I}_{\text{Ind}}$ in der Dicke der EM-Eindringtiefe δ_{Ind} getroffen werden. Im Blech fließe ebenfalls ein homogen verteilter Strom $\underline{I}_{\text{Bl}}$ in der Blechdicke d und der Breite des Induktorleiters $a_i = t/2$. Die Frequenz ist damit nach oben durch die Bedingung $d \ll \delta_{\text{Bl}}$ begrenzt, da andernfalls beidseitige Stromverdrängung vorliegt. Die Eindringtiefe kann in Abhängigkeit der Frequenz f beschrieben werden durch

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\kappa \mu_0 f \pi}} \quad (3.6)$$

Der elektrische Wirkungsgrad aus Gleichung (3.1) kann damit abgeschätzt werden zu

$$\eta_{\text{el,Q}} = \frac{1}{1 + \frac{|\underline{I}_{\text{Ind}}|^2}{|\underline{I}_{\text{Bl}}|^2} \cdot \frac{\kappa_{\text{Bl}}}{\kappa_{\text{Ind}}} \cdot \frac{d}{\delta_{\text{Ind}}}} \quad (3.7)$$

Das Verhältnis des Induktorstromes zum Blechstrom wird über den Ansatz

$$\underline{I}_{\text{Bl}} \approx \underline{S} \cdot \frac{dt}{2} \quad \text{und} \quad \underline{S} = \kappa_{\text{Bl}} \underline{E} \quad (3.8)$$

aus der Stromdichte \underline{S} und der elektrischen Feldstärke \underline{E} abgeleitet. Die elektrische Feldstärke läßt sich über das Induktionsgesetz ermitteln, das einen Zusammenhang zwischen der gesuchten elektrischen Feldstärke \underline{E} und der normal zur Blechoberfläche gerichteten Komponente der magnetischen Induktion \underline{B}_n herstellt. Aufgrund der vorhandenen Blechpakete kann davon ausgegangen werden, daß die Verteilung der Normalinduktion \underline{B}_n homogen über der feldführenden, wirksamen Fläche im Blech verteilt ist, die durch die Polbreite t charakterisiert wird. Aus der zweiten *Maxwellschen* Gleichung läßt sich dann die elektrische Feldstärke

$$\underline{E} = -j\omega \underline{B}_n \frac{t}{2} \quad (3.9)$$

ableiten. Unter Berücksichtigung der Gleichungen (3.8) und (3.9) läßt sich die Abhängigkeit des Blechstromes $\underline{I}_{\text{Bl}}$ von der magnetischen Induktion \underline{B}_n , die sich aus der vom Induktor ausgehenden Primärinduktion $\underline{B}_{\text{Ind}}$ und der Sekundärinduktion $\underline{B}_{\text{Bl}}$ zusammensetzt,

$$\underline{I}_{\text{Bl}} = \frac{j\omega \kappa_{\text{Bl}} d t^2}{4} (\underline{B}_{\text{Ind}} - \underline{B}_{\text{Bl}}) \quad (3.10)$$

formulieren. Die beiden Anteile der magnetischen Induktion lassen sich über den Durchflutungssatz abschätzen:

$$\underline{B}_{\text{Ind}} \approx \frac{\mu_0 \underline{I}_{\text{Ind}}}{h} \quad \text{und} \quad \underline{B}_{\text{Bl}} \approx \frac{\mu_0 \underline{I}_{\text{Bl}}}{2h} \quad (3.11)$$

Da ideale Blechpakete vorausgesetzt werden, ist nur das magnetische Feld im Koppelspalt h wirksam. Es ergibt sich aus den Gleichungen (3.10) und (3.11) unter Berücksichtigung von Gleichung (3.3) der Zusammenhang für den Blechstrom in Abhängigkeit des Induktorstromes zu

$$\underline{I}_{\text{Bl}} = \underline{I}_{\text{Ind}} \frac{2\omega_Q^2 t^2 \pi^2}{4h^2 + \omega_Q^2 t^2 \pi^2} + j \underline{I}_{\text{Ind}} \frac{4h\omega_Q t \pi}{4h^2 + \omega_Q^2 t^2 \pi^2} \quad (3.12)$$

Der Betrag des Blechstromes läßt sich aus Gleichung (3.12) zu

$$|\underline{I}_{\text{Bl}}| = |\underline{I}_{\text{Ind}}| \frac{2 \omega_Q t \pi}{\sqrt{4h^2 + \omega_Q^2 t^2 \pi^2}} \quad \text{mit} \quad \frac{|\underline{I}_{\text{Bl}}|}{|\underline{I}_{\text{Ind}}|} \approx 2 \quad \text{für} \quad h \ll \omega_Q t. \quad (3.13)$$

ableiten. Das Einsetzen des analytischen Zusammenhanges der beiden Ströme aus Gleichung (3.13) in Gleichung (3.7) unter Berücksichtigung von Gleichung (3.3) und (3.6) liefert schließlich die Beziehung für den elektrischen Wirkungsgrad

$$\eta_{\text{el,Q}} = \frac{1}{1 + \frac{4h^2 + \omega_Q^2 t^2 \pi^2}{4\omega_Q^2 t^2 \pi^2} \cdot \sqrt{\frac{\kappa_{\text{Bl}}}{\kappa_{\text{Ind}}} \frac{d}{t} 2\pi\omega_Q}}. \quad (3.14)$$

Der Verlauf des Wirkungsgrades ist in Bild 3.6 über der Frequenz dargestellt. Als Vergleich dienen die Kurven für den elektrischen Wirkungsgrad, die sich aus den numerischen Berechnungen mit dem zweidimensionalen Modell HIHTEC 2D (siehe Kapitel 4) des regulären Bereiches einer Beispielanlage ergaben. Bei dem betrachteten Beispiel handelt es sich um eine Anlage mit Blechpaketen mit Polen, die zur Erwärmung von 0,8 mm dickem Blech aus Messing numerisch berechnet wird. Qualitativ stimmen die Kurven für verschiedenen Verhältnisse von t/h gut überein. Der elektrische Wirkungsgrad steigt zunächst steil an, da es aufgrund der erhöhten Frequenz zu einer verstärkten Induktionswirkung im Blech kommt und die EM-Kopplung zwischen Induktor und Blech zunimmt. Der Wirkungsgrad erreicht bei der Frequenz sein Maximum, bei der der Strom im Blech bereits so groß ist, daß er ein Sekundärfeld zur Folge hat, das das Primärfeld des Induktorstromes kompensiert. Die im Blech umgesetzte Leistung steigt ab diesem Punkt nicht mehr an, die Stromwärmeverluste im Induktor nehmen jedoch leicht zu. Das führt zu einem geringen Absinken des Wirkungsgrades im höheren Frequenzbereich.

Maximale Werte des elektrischen Wirkungsgrades werden erreicht, wenn die Querfeldfrequenz ω_Q die Werte

$$\omega_{\text{Q,opt,an}} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \frac{h}{t} \quad (3.15)$$

annimmt. Die entsprechende optimale Frequenz zur Erlangung des maximalen elektrischen Wirkungsgrades kann hieraus unter Verwendung der Gleichung (3.3) aus der Beziehung

$$f_{\text{opt,Q,an}} = \frac{4\sqrt{3}}{\pi} \frac{1}{\kappa_{\text{Bl}} \mu_0} \frac{h}{dt^2}. \quad (3.16)$$

abgeleitet werden. Der maximale elektrische Wirkungsgrad läßt sich aus Gleichung (3.14) unter Verwendung der optimalen Querfeldfrequenz aus Gleichung (3.15) bestimmen zu

$$\eta_{\text{el,max,Q}} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\kappa_{\text{Bl}}}{\kappa_{\text{Ind}}} \cdot \frac{d}{t} \cdot \frac{h}{t} \cdot 0,77}}. \quad (3.17)$$

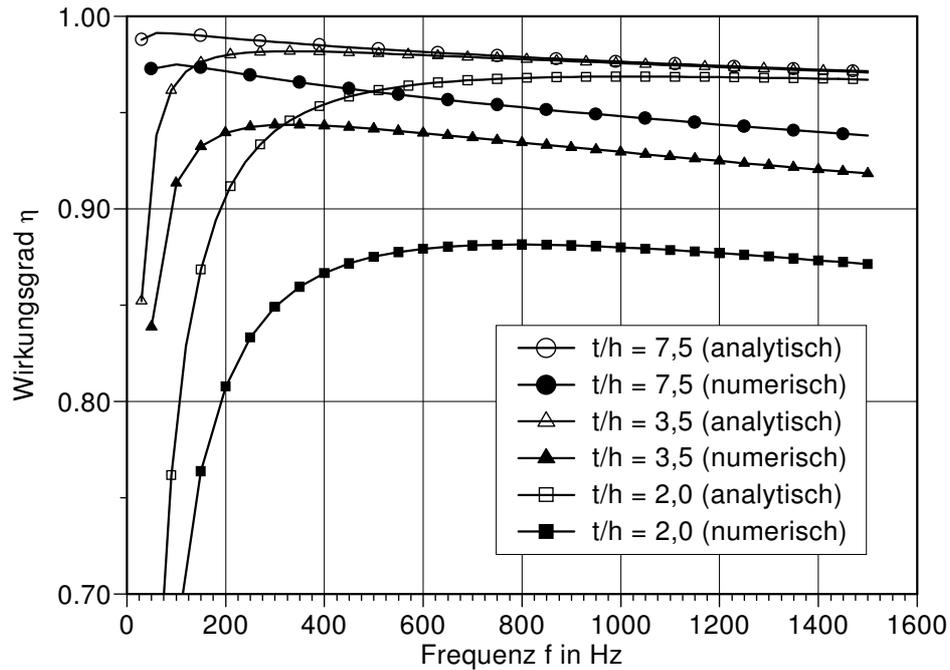


Abbildung 3.6: Elektrischer Wirkungsgrad aus analytischer Berechnung und numerischer 2D-Simulation in Abhängigkeit der Frequenz für unterschiedliche Verhältnisse von t/h für Messingblech mit $d=0,8$ mm

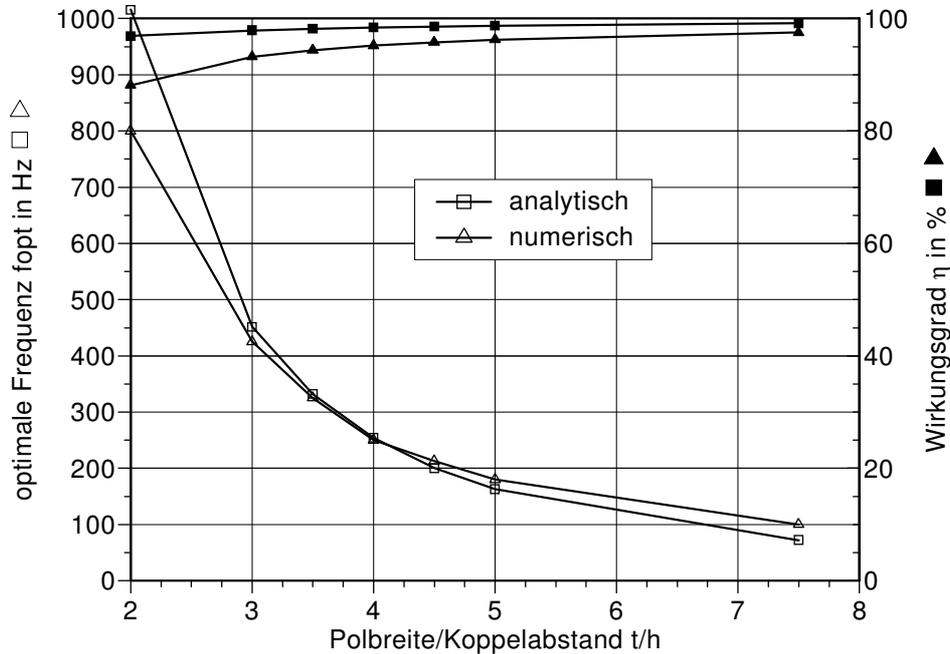


Abbildung 3.7: Optimale Frequenz und maximaler Wirkungsgrad für unterschiedliche Werte von Polbreite zu Koppelspalt t/h für Messingblech mit $d=0,8$ mm

Die Lage der optimalen Frequenz zum Erreichen des maximalen elektrischen Wirkungsgrades ist in Bild 3.6 dargestellt und ergibt eine gute qualitative Übereinstimmung. Eine direkte Gegenüber-

stellung der numerisch und analytisch ermittelten Werte ist in Bild 3.7 visualisiert. Lediglich für kleine Werte von t/h ergeben sich größere Abweichungen, deren Ursache in den für die analytische Abschätzung getroffenen Annahmen liegt. Der im Blech real fließende Strom ist direkt unterhalb der Induktorschlenkel nicht homogen verteilt. Für kleine Werte t/h ist das Gebiet des Stromflusses weiter ausgeprägt, die Konturen des Stromflußgebietes sind nicht mehr klar abgrenzbar. Die in der analytischen Ableitung verwendete Vereinfachung führt dazu, daß das Niveau des elektrischen Wirkungsgrades höher liegt als in der numerischen Berechnung. Für einen analytischen Vergleich mit einer ähnlich idealisierten Längsfeldanordnung sind die absoluten Werte jedoch aussagekräftig genug.

Der theoretisch maximal mögliche Wirkungsgrad wird neben dem Verhältnis der elektrischen Leitfähigkeiten von Blech- und Induktormaterial auch durch die Geometrie der Anlage beeinflusst. Für ein festgelegtes Blechmaterial bestimmter Dicke kann daher durch die Vergrößerung der Polbreite t oder die Verkleinerung des Koppelabstandes h eine Verbesserung des elektrischen Wirkungsgrades nach Gleichung (3.17) erreicht werden.

Längsfelderwärmung

Im Vergleich zur Abschätzung der analytischen Zusammenhänge bei der Querfelderwärmung soll ebenfalls der elektrische Wirkungsgrad der Längsfelderwärmung angegeben werden. Dazu wird die Längsfeldanordnung gemäß Bild 3.8 verwendet.

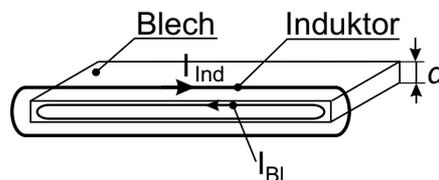


Abbildung 3.8: Längsfeldanordnung für die analytische Wirkungsgradabschätzung

Es wird davon ausgegangen, daß die zur Bestimmung der Verlustleistung notwendigen Widerstände von Induktor und Blech nur durch deren elektrische Leitfähigkeiten und ihre jeweiligen EM-Eindringtiefen bestimmt werden. Die Länge der Stromwege sei in Induktor und Blech aufgrund der ideal aneinander angepaßten Geometrien identisch. Unter der weiteren Annahme idealer Kopplung, d. h. $|L_{BI}| \approx |L_{Ind}|$ und relativ hoher Frequenz, läßt sich der maximal erreichbare elektrische Wirkungsgrad der Längsfelderwärmung durch

$$\eta_{el,max,L} = \frac{1}{1 + \frac{I_{Ind}^2}{I_{BL}^2} \cdot \frac{\kappa_{Bl}}{\kappa_{Ind}} \cdot \frac{\delta_{Bl}}{\delta_{Ind}}} \quad (3.18)$$

bestimmen. Das Einsetzen der Eindringtiefe aus Gleichung (3.6) für den Induktor und analog für

das Blechmaterial ergibt den maximalen elektrischen Wirkungsgrad für die Längsfelderwärmung

$$\eta_{\text{el,max,L}} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\kappa_{\text{Bl}}}{\kappa_{\text{Ind}}}}} \quad (3.19)$$

Abhängig vom Verhältnis der Leitfähigkeiten von Spule und Gut sind dem elektrischen Wirkungsgrad bei der Längsfelderwärmung nach Gleichung (3.19) enge Grenzen gesetzt.

Vergleich anhand eines Beispiels

Ein direkter Vergleich der abgeleiteten Zusammenhänge für den maximal erreichbaren elektrischen Wirkungsgrad für die Quersfeld- und Längsfelderwärmung soll anhand einer exemplarischen Anordnung durchgeführt werden. In Tabelle 3.1 ist daher für verschiedene Blechmaterialien der Dicke 0,8 mm der elektrische Wirkungsgrad der Quersfeld- gegenüber der Längsfelderwärmung dargestellt. Der Induktor besteht in beiden Fällen aus Kupfer. Für die Quersfeldanordnung ist eine übliche Beispielanordnung mit einer Polbreite von 140 mm und einem Koppelspalt von 40 mm angenommen worden.

Tabelle 3.1: Maximal erreichbarer elektrischer Wirkungsgrad und dafür notwendige Frequenzen von Quersfeld- und Längsfelderwärmung im Vergleich mit $d = 0,8 \text{ mm}$, $t = 140 \text{ mm}$, $h = 40 \text{ mm}$

Blechmaterial	κ in $1/\Omega\cdot\text{m}$	$\eta_{\text{el,max,Q}}$ in %	$\eta_{\text{el,max,L}}$ in %	$f_{\text{opt,Q,an}}$ in Hz	$f_{\text{min,L}}$ in kHz
Stahl	$5,4 \cdot 10^6$	98,8	75,3	829	293
Messing	$13,5 \cdot 10^6$	98,2	65,8	332	117
Aluminium	$25,6 \cdot 10^6$	97,5	58,3	175	62
Gold	$45,5 \cdot 10^6$	96,7	51,2	98	35
Kupfer	$50,0 \cdot 10^6$	96,6	50,0	90	32
Silber	$62,5 \cdot 10^6$	96,2	47,2	72	25

Es wird das große Potential einer hohen elektrischen Effizienz der Quersfelderwärmung deutlich. Im Vergleich zur Längsfelderwärmung kann ein wesentlich höherer elektrischer Wirkungsgrad realisiert werden. Eine Wirkungsgradsteigerung durch die Variation der geometrischen Größen t und h bis in die unmittelbare Nähe von 100 %, die rein formal mit der Gleichung (3.17) erreicht werden könnte, ist nicht möglich. Einerseits verliert die Gleichung für extrem große Polbreiten ihre Gültigkeit, da die ansteigenden Verluste in den Spulenköpfen berücksichtigt werden müssen und andererseits sprechen praktische Gründe dagegen. Bei sehr kleinem Koppelspalt h ist der Blechtransport

in der Praxis durch den zu geringen lichten Spalt nicht mehr möglich. Weiterhin schränkt die Belastbarkeit der Blechpakete die Reduzierung des Koppelspaltes ein.

Zusätzlich sind in Tabelle 3.1 die für einen hohen Wirkungsgrad optimalen Frequenzen $f_{\text{opt,Q,an}}$ im Querfeld nach Gleichung (3.4) sowie die Frequenzen $f_{\text{min,L}}$ im Längsfeld angegeben. Die Bedingung für die Mindestfrequenz der Längsfelderwärmung von dünnen Blechen und Bändern für einen hohen elektrischen Wirkungsgrad ergibt sich nach [35] aus der Forderung $d/\delta \geq 2$. Sie stimmt gut mit den analytischen Betrachtungen aus [20] überein (vgl. Bild 3.2). Die beispielhafte Auswertung dieser Bedingung zeigt, daß für die Erwärmung des 0,8 mm dünnen Blechs im Längsfeld Frequenzen notwendig sind, die in diesem Fall um knapp drei Größenordnungen oberhalb der Frequenzen im Querfeld liegen.

4 Modelle zur Berechnung von Quersfeld- Erwärmungsanlagen

Für die Berechnung der induktiven Quersfelderwärmung stehen unterschiedliche analytische und numerische Werkzeuge zur Verfügung. Für jedes Einsatzgebiet, wie z. B. parametrische Untersuchungen, Auslegungsberechnungen, Detailanalysen oder Optimierungen, müssen aus der Vielzahl von Simulationsprogrammen die geeigneten Werkzeuge ausgewählt werden. In diesem Kapitel wird daher eine Übersicht über die zur Verfügung stehenden Methoden mit ihren bevorzugten Anwendungsbereichen sowie mit ihren Vor- und Nachteilen vornehmlich in Bezug auf die optimierte Auslegung von Anlagen gegeben.

4.1 Einfache Modelle

In der Gruppe der einfachen Programme lassen sich alle mathematischen Methoden, die auf analytischen Ansätzen oder zweidimensionalen (2D) numerischen Berechnungen basieren, zusammenfassen. Sie eignen sich besonders gut für die ersten abschätzenden Untersuchungen eines Systems, bevor detailliertere Analysen durchgeführt werden. Die elektromagnetischen Prozesse werden berechnet, um die integralen Größen, wie z. B. den elektrischen Wirkungsgrad, den Leistungsfaktor oder die Gesamtleistung, der betrachteten Anordnung zu bestimmen. Die Programme arbeiten auf handelsüblichen PCs und benötigen kurze Rechenzeiten. Im allgemeinen wird für die Quersfelderwärmung bei diesen Berechnungen nur der reguläre Bereich der Anordnung berücksichtigt. Dies ist bei üblichen Quersfeldanordnungen im allgemeinen zulässig, so daß sich die Berechnung auf die yz -Ebene bezieht und die Abhängigkeit der verteilten Größen von der x -Koordinate vernachlässigt werden kann (Bild 3.4).

Das in dieser Arbeit für den ersten Schritt der Auslegung der Quersfeldanlagen bevorzugt verwendete Werkzeug ist die 2D-Version des Programmpaketes HIHTEC, das auf der Methode der Boundary-Elemente basiert. Im 2D-Fall ist dadurch nur eine Vernetzung der Konturen der elektromagnetisch aktiven Systemkomponenten notwendig. Die Datenaufbereitung fällt sehr komfortabel aus und die benötigte Rechenzeit ist sehr kurz. Weitere Berechnungsgrundlagen, Einsatzgrenzen und Details zu HIHTEC finden sich im nächsten Abschnitt, in dem die dreidimensionale Version des Programms erläutert wird.

4.2 Problemangepaßtes Programmpaket HIHTEC

Am Institut für Elektrowärme wurde im Laufe der letzten Jahre das problemorientierte Programmpaket HIHTEC 3D entwickelt, mit dem speziell die induktive Querfelderwärmung von bewegtem Blechmaterial elektromagnetisch und thermisch im dreidimensionalen Raum berechnet werden kann [36,37]. In der Vergangenheit wurde es vornehmlich für umfangreiche Parameterstudien eingesetzt. Voraussetzung für die Anwendung von HIHTEC ist, daß es sich bei dem zu erwärmenden Material um dünnes, elektrisch leitendes unmagnetisches Band handelt. Aus der Geometrie der Querfeldanordnung selbst ergibt sich, daß von dünnen stromführenden Schichten im System ausgegangen werden kann, da die Dicke der zu erwärmenden Bleche und Bänder im allgemeinen klein gegenüber den übrigen Abmessungen ist. Aus diesem Grund kann die Boundary-Element-Methode (BEM) als numerisches Berechnungsverfahren für die elektromagnetischen Vorgänge eingesetzt werden. In diesem Fall müssen nur die feldbeeinflussenden Oberflächen der Systemkomponenten diskretisiert werden. Das vereinfacht die Berechnungsvorbereitung sehr stark und im Vergleich zu Programmen, die die Finite-Element-Methode (FEM) verwenden, können wesentlich kürzere Rechenzeiten erreicht werden. Das ist vor allem in Hinblick auf die Einbindung in eine Optimierungsschleife von großem Vorteil bzw. von Notwendigkeit und ermöglicht erstmals die Einbindung eines 3D-Berechnungsprogramms in eine Optimierungsschleife.

Die Funktionstüchtigkeit von HIHTEC ist in umfangreichen numerischen Simulationen mit den leistungsfähigen kommerziellen Programmpaketen MSC/EMAS und ANSYS sowie experimentellen Untersuchungen an Labor- und Pilotanlagen verifiziert worden. Für den sicheren und genauen Einsatz von HIHTEC muß $d/\delta < 1$ gelten. Nur in diesem Fall kann von einer dünnen stromführenden Schicht mit homogener Stromverteilung über der Blechdicke ausgegangen werden. Zusätzlich sollte die Bedingung $h/d \geq 3$ eingehalten werden, da sonst die Annahme einer dünnen Schicht für das Blech nicht mehr zulässig ist. Werden diese Einsatzgrenzen von HIHTEC eingehalten, so ergeben sich sehr gute Übereinstimmungen mit den Vergleichsrechnungen und -messungen [38, 39, 20].

4.2.1 Berechnung des elektromagnetischen Feldes

Bei üblichen geometrischen Anordnungen der Querfelderwärmung ist die EM-Eindringtiefe δ groß gegenüber der Blechdicke d . Das elektromagnetische Feld durchdringt das Blech nahezu ungehindert. In diesem Fall ist die Annahme einer homogenen Stromdichteverteilung über der Blechdicke gerechtfertigt [32]. Die mathematische Berechnung der Stromverteilung vereinfacht sich daher auf die Bestimmung eines Strombelages $\vec{\underline{S}}_A$. Die Divergenzfreiheit des Stromes

$$\operatorname{div}_A \vec{\underline{S}}_A = 0 \quad (4.1)$$

mit der Definition der Divergenz div_A nur auf der Oberfläche A der Systemkomponenten, erlaubt die Einführung der Stromfunktion $\vec{\underline{\psi}}$. Sie besteht nur aus einer Normalkomponente $\vec{\underline{\psi}} = (0,0,\psi_n)$ zu

den Oberflächen und bietet damit den Vorteil, daß nur ein Skalarfeld berechnet werden muß [32]. Der Strombelag \vec{S}_A ergibt sich dann aus dem Zusammenhang

$$\text{rot}_A \vec{\Psi} = \vec{S}_A, \quad (4.2)$$

wobei der Rotor rot_A ebenfalls nur auf der Oberfläche A der Systemkomponenten definiert ist. Zur Herleitung der Bestimmungsgleichung für die Stromfunktion $\vec{\Psi}$ wird die allgemeine Lösung der *Poissonschen* Differentialgleichung für das Vektorpotential, die aus den *Maxwellschen* Gleichungen abgeleitet werden kann, verwendet [40,41]. Entsprechend ergibt sich für das Vektorpotential \vec{A} in jedem beliebigen Punkt P aus den auf den Oberflächen A im Abstand r fließenden Strombelägen \vec{S}_A

$$\vec{A}(P) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_A \frac{\vec{S}_A}{r} dA. \quad (4.3)$$

Aus dem Zusammenhang

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A}, \quad (4.4)$$

läßt sich die magnetische Flußdichte bestimmen. Die Normalkomponente der magnetischen Flußdichte B_n berechnet sich dann aus den Gleichungen (4.2), (4.3) und (4.4) zu

$$B_n = \frac{\mu_0}{4\pi} \text{rot}_n \int_A \frac{\text{rot}_A \vec{\Psi}}{r} dA, \quad (4.5)$$

mit rot_n als Normalkomponente des Rotors.

Für die verschiedenen Materialgruppen Blech, Blechpaket bzw. Ferrit usw., die im System vorkommen, ergeben sich unterschiedliche Bedingungen für die magnetische Induktion. Ferromagnetische Elemente werden dabei idealisiert als verlustfrei angenommen. Aus den Bedingungen lassen sich die Bestimmungsgleichungen für die Stromfunktion $\vec{\Psi}$ ableiten [36,42]. Beispielhaft sei hier der Ansatz für leitendes unmagnetisches Blech der Dicke d gegeben, auf dessen Oberfläche der Zusammenhang

$$\text{rot}_A \vec{\Psi} = \vec{E} \kappa d. \quad (4.6)$$

gilt. Unter Berücksichtigung des Induktionsgesetzes läßt sich die Oberflächenbedingung

$$\text{rot}_n \text{rot}_A \vec{\Psi} = -j \omega d \kappa B_n, \quad (4.7)$$

ableiten, in der j die Imaginäreinheit darstellt. Die Bestimmungsgleichung für die Stromfunktion $\vec{\Psi}$ ergibt sich durch das Einsetzen von Gleichung (4.5) in Gleichung (4.7).

Zur Umsetzung der oben genannten Bestimmungsgleichungen in das numerische Verfahren werden alle Oberflächen mit dreieckigen Boundary-Elementen diskretisiert. Auf den Knotenpunkten

dieses Elementnetzes, also auf den Eckpunkten der Boundary-Elemente, ist die Stromfunktion $\bar{\Psi}$ als unbekannte Größe definiert.

Zur Berechnungsvorbereitung werden durch mehrere aufeinander folgende Preprocessing-Programme die Koordinaten sämtlicher Knotenpunkte sowie die der mit Grenzbedingungen gespeichert. Weiterhin werden die Kopplungsmatrix mit Informationen über den Zusammenhang von Boundary-Elementen und zugehörigen Knotenpunkten sowie die Koordinatenmatrix, die die Koordinaten der Knotenpunkte enthält, formuliert. Im Hauptprogramm wird die Systemmatrix erstellt, in der das vollständige algebraische Gleichungssystem enthalten ist. Zur Lösung des Systems wird das *Gauß*-Verfahren angewendet. Im Postprocessing können zahlreiche unterschiedliche Programme zur Ausgabe von Isolinien, der Stromfunktion, des Strombelags, der Leistungs- und Kräfteverteilung sowie von integralen Größen genutzt werden.

4.2.2 Berechnung des Temperaturfeldes

Zur Berechnung des Temperaturfeldes kann das 3D-Problem auf ein zweidimensionales zurückgeführt werden, wenn das Blech sehr dünn ist ($d/\delta < 1$). Es wird in diesem Fall angenommen, daß aufgrund der Stromdichte- bzw. Wärmequellenverteilung die Temperatur über der Blechdicke homogen ist. Auf der Basis der allgemeinen Wärmeleitungsgleichung

$$v c_p \rho \operatorname{grad} \vartheta + c_p \rho \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \operatorname{div} \lambda \operatorname{grad} \vartheta + p \quad (4.8)$$

mit v als Vorschubgeschwindigkeit, c_p als spezifischer Wärmekapazität des Blechmaterials, ρ als Massendichte, ϑ als Temperatur, λ als Wärmeleitfähigkeit und p als Wärmequellendichte kann das Temperaturfeld bestimmt werden. Die Wärmequellendichte im Blech ergibt sich aus der zuvor in der EM-Berechnung bestimmten Strombelagsverteilung $\vec{\underline{S}}_A$ zu

$$p = \frac{|\vec{\underline{S}}_A|^2}{\kappa d^2} . \quad (4.9)$$

Die Temperaturabhängigkeit von λ und c_p kann im Gegensatz zu der von κ ohne einen erheblichen Anstieg der Rechenzeit berücksichtigt werden. Experimentelle Vergleichsuntersuchungen haben jedoch gezeigt, daß auch mit den vereinfachten Berechnungen ohne Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit der Materialeigenschaften in den meisten Anwendungsfällen sehr gute Ergebnisse erzielt werden [20,43,39]. Ausgenommen sind Erwärmungsvorgänge, die einen großen Temperaturhub bewirken. Hier ist eine elektromagnetisch-thermisch gekoppelte Berechnung notwendig.

Aufgrund der hohen Vorschubgeschwindigkeit überwiegt in Vorschubrichtung der Wärmetransport durch die translatorische Bewegung des Bandes. Die Vernachlässigung des Wärmetransportes infolge von Wärmeleitung kann daher in dieser Richtung vernachlässigt werden. Eine Bestätigung dieser Näherung ergibt eine Abschätzung von konvektivem und diffusivem Wärmetransport. Der

Wärmetransport durch die Vorschubbewegung liegt auch im ungünstigsten Fall zwei Größenordnungen über dem durch Wärmeleitung in Vorschubrichtung [43].

Strahlungs- und Konvektionsverluste werden ebenfalls in der thermischen Berechnung berücksichtigt, indem die Wärmequellendichte p entsprechend reduziert wird. Für die Bestimmung der stationären Temperaturverteilung ergibt sich damit

$$v c_p \rho \frac{\partial \vartheta}{\partial y} = \lambda \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + p - \frac{2 C_S \varepsilon \left[\left(\frac{T_{Bl}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_U}{100} \right)^4 \right] + 2 \alpha (T_{Bl} - T_U)}{d}, \quad (4.10)$$

wobei $C_S = 5,67 \text{ W/m}^2\text{K}^4$ die Strahlungskonstante des schwarzen Körpers, ε den Emissionsgrad, α den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten, T_{Bl} die absolute Blechtemperatur und T_U die absolute Umgebungstemperatur kennzeichnen. In y -Richtung findet der Vorschub statt und x entspricht der Koordinate quer zum Vorschub in Richtung der Blechbreite (Bild 3.1, S. 9).

Zur Umsetzung der oben beschriebenen Gleichungen in ein numerisches Verfahren wird die Methode der Finiten-Differenzen (FDM) verwendet. Auf der Blechoberfläche wird dazu ein äquidistantes Gitternetz erzeugt, auf das die berechnete Leistungsdichteverteilung p interpoliert wird. Mit der umgerechneten Leistungsdichteverteilung, den Materialeigenschaften sowie der Blechtemperatur am Einlauf in die Erwärmerstrecke wird die Berechnung des stationären Temperaturfeldes vorgenommen. Zusätzliche Verluste an den Bandkanten werden mit Hilfe spezieller Randbedingungen erfaßt.

4.2.3 Anpassungen und Erweiterungen für die Einbindung in die Optimierung

Die Einbindung eines Simulationsprogrammes in einen Optimierungsprozeß erfordert zunächst, daß die Berechnungen unter vertretbarem zeitlichem Aufwand durchgeführt werden können, da für die Optimierung eine Vielzahl von Berechnungsläufen notwendig ist. Aufgrund der Verwendung der BEM bei HIHTEC sind sehr gute Voraussetzungen zur Erfüllung dieser Anforderung geschaffen. Dabei wirkt sich der vergleichsweise geringe Aufwand zur Berechnungsvorbereitung ebenfalls positiv auf die Integration in eine automatische Optimierungsschleife aus. Zusätzlich unterstützen die hohen verfügbaren Rechenleistungen und großen möglichen Arbeitsspeicher moderner PCs das Erreichen kurzer Rechenzeiten. Fast sämtliche Berechnungen von elektromagnetischem und thermischem Feld sind heutzutage allein aus den oben genannten Gründen mit HIHTEC mit Hilfe von PCs durchführbar, wodurch eine einheitliche Struktur aller benötigten Programme geschaffen werden kann. Günstig wirken sich Symmetrien der Querfeldanordnungen aus, die zu einer Reduktion des Rechenaufwands führen, indem das Rechengebiet verkleinert und entsprechende Randbedingungen formuliert werden. Lediglich für Berechnungen von sehr komplizierten Anordnungen, bei denen keine Symmetrie ausgenutzt werden kann, müssen Hochleistungsrechner zum Einsatz kommen.

Eine wichtige Voraussetzung für die Integration des Programmpaketes HIHTEC in eine Optimierungsschleife ist, daß sämtliche Berechnungsvorbereitungen, wie das Erstellen der Geometrie und die Vernetzung der Systemkomponenten, nicht manuell sondern automatisch vorgenommen werden. Dies läßt sich für das problemangepaßte Programmpaket HIHTEC gut realisieren, da hier ebenfalls die Vorteile der BEM bezüglich weniger aufwendiger Berechnungsvorbereitungen genutzt werden können. Hierzu sind verschiedene Werkzeuge neu entwickelt worden, die das manuelle Erstellen der Geometrie und deren Diskretisierung durch ein automatisiertes Verfahren ersetzen. Sämtliche geometrische Eingangsdaten sind entsprechend der Systemkomponenten in Eingangsdateien zusammengefaßt. Dabei wurden die Eingangsdaten auf charakteristische Größen für die Quersfelderwärmung reduziert. Die Eingangsdatei für das Erstellen der Induktorgeometrie beinhaltet somit u. a. die Polbreite t , die Leiterbreite a_i und den Koppelspalt h . Die in den Eingangsdateien zusammengefaßten Größen stellen gleichzeitig die potentiellen Variablen für die Optimierung dar. Die Variation dieser Größen in der Optimierungsschleife wird von sogenannten Schnittstellenprogrammen übernommen (siehe Abschnitt 5.3). Die neu entwickelten Preprocessing-Programme für HIHTEC 3D lesen die oben beschriebenen Eingangsdateien ein und erstellen für HIHTEC standardisierte Koordinatendateien, die nicht nur die Geometrie sondern zusätzlich auch die Informationen für die Vernetzung der Komponenten enthalten.

Die Vernetzung ist unter dem Gesichtspunkt der automatischen Optimierung von großer Relevanz. Die Rechenzeit einer einzelnen Simulation bestimmt aufgrund des iterativen Optimierungsprozesses maßgeblich den gesamten Rechenaufwand für die Optimierung. Daher gilt es, der Minimierung der Anzahl der Elemente bzw. Knotenpunkte, mit denen die Berechnungszeit näherungsweise kubisch ansteigt, größere Aufmerksamkeit zu schenken als bei einer einzelnen Berechnung. Vor jedem Optimierungslauf ist daher eine Parameterstudie bezüglich der Vernetzung sinnvoll, um bei hinreichender Genauigkeit der Ergebnisse den Rechenaufwand in realistischen Größenordnungen zu halten.

Weiterhin ist es hinsichtlich der Einbindung von HIHTEC in einen Optimierungslauf unerlässlich, daß die Vernetzung der innerhalb einer Optimierung veränderten Geometrie derart durchgeführt wird, daß die zu optimierende Funktion keine Sprünge oder Unstetigkeiten aufweist. Wird in einer Optimierung die Anzahl der Elemente abhängig von der Geometrie der Anlage verändert, kann das unerwünschte Sprünge in der Zielfunktion zur Folge haben. Dieser Effekt führt dazu, daß kein Optimum gefunden werden kann. Bei der Vernetzung muß daher automatisch die Größe der Elemente an die neu zu vernetzende Geometrie angepaßt und die Größenverhältnisse in alle Koordinatenrichtungen beibehalten werden.

Eine weitere negative Beeinflussung der Zielfunktion wurde durch die ursprüngliche Interpolation der Leistungsdichte vom Boundary-Element-Netz auf das für die thermische Berechnung verwendete äquidistante Netz hervorgerufen. Die Leistungsdichteverteilung des äquidistanten Netzes

wies aufgrund fehlender Flächen- und Abstandsgewichtung gerade bei der für den Optimierungsprozeß notwendigen gröberen Vernetzung Sprünge auf. Aus diesem Grund wurde eine erweiterte Interpolation implementiert, die eine Glättung der Leistungsdichte und damit der Zielfunktion ermöglicht. Dabei wird zunächst die elementbezogene Leistungsdichte auf die Boundary-Element-Knoten über eine Flächengewichtung umgerechnet. Die Übertragung auf die Knoten des Finite-Differenzen Netzes geschieht mittels Längengewichtung der berücksichtigten Knotenwerte des Boundary-Element-Netzes.

Um die einzelnen Programme des Programmpaketes HIHTEC automatisch nacheinander und mit unterschiedlichen Eingangsgrößen ablaufen zu lassen, sind Batchfiles notwendig. Sie stellen die Organisationsebene des Optimierungslaufes dar und steuern den Ablauf der notwendigen einzelnen Programme.

4.3 Universelles kommerzielles Programmpaket ANSYS

Zur Lösung elektromagnetischer, thermischer, aber auch strukturmechanischer Probleme sind kommerzielle Programme verfügbar, die üblicherweise auf der FEM basieren. Ein weit verbreitetes universelles Werkzeug ist das Programmpaket ANSYS, mit dem nicht nur im Hochschulbereich sondern auch in Forschungs-, Entwicklungs- und Konstruktionsabteilungen numerische Berechnungen durchgeführt werden.

Aufgrund der universellen Einsatzmöglichkeiten von ANSYS gestaltet sich die Berechnungsvorbereitung für den Spezialfall Quersfelderwärmung sehr aufwendig. Die Eingabe der Geometrie gerade für 3D-Simulationen ist sehr aufwendig, so daß eine Automatisierung für die Einbindung in einen Optimierungsprozeß nahezu unmöglich ist. Nachteilig wirkt sich auch in diesem Zusammenhang die hohe benötigte Rechenzeit aus, die auf die Verwendung der FEM zurückzuführen ist. Die Rechenzeit für die 3D-Berechnung des elektromagnetischen und thermischen Feldes einer üblichen Quersfeldanordnung liegt bei ANSYS bei mehreren Stunden, während bei HIHTEC innerhalb von einigen Minuten eine vergleichbare Lösung erzielt werden kann. Aus diesen Gründen eignet sich ANSYS weniger für die automatische Optimierung der gesamten Geometrie einer Quersfeldanordnung, sondern vielmehr für Referenzberechnungen für bestimmte interessierende Betriebspunkte zur Verifikation der Berechnungen mit speziell angepaßten Programmen wie HIHTEC. Das ist in [20] in umfangreicher Weise durchgeführt worden. Zusätzlich sind mit ANSYS strukturmechanische Berechnungen möglich, so daß die Bestimmung der Deformation der Bleche bestimmt werden kann. Weiterhin eignet sich ANSYS für Simulationen von Vibrationen und Lärmentwicklung. Überall dort, wo weitergehende Informationen, eine detaillierte Bestimmung von Größen oder aber Überprüfungen der Annahmen von HIHTEC erwünscht sind, kann ANSYS sinnvoll eingesetzt werden.

Zusätzlich stellt ANSYS interne Optimierungswerkzeuge zur Verfügung, die zur Lösung von Teilproblemen herangezogen werden können [44]. Beispiel hierfür ist die Bestimmung der Verluste unter Berücksichtigung der Stromverdrängung im Induktor. Mit ANSYS kann die Stromverteilung in allen leitenden Bereichen vollständig numerisch berechnet werden. So kann unter Verwendung von ANSYS die Geometrie der Induktoren optimiert und die Wirksamkeit sogenannter Multilayer-Induktoren untersucht werden (siehe Abschnitt 7.3.2). Zum Einsatz kommen hier die von ANSYS angebotenen Optimierungsalgorithmen, mit denen ohne die Schaffung von Schnittstellenprogrammen (siehe Abschnitt 5.3) eine Optimierung durchgeführt werden kann.

5 Optimierungsverfahren

In fast allen technischen und ökonomischen Bereichen spielt die Optimierung von Systemen eine große Rolle. Viele zu lösende Aufgaben, seien es der Entwurf von Produktionsverfahren, zu planende Investitionen oder Arbeitsabläufe, lassen sich auf ein Optimierungsproblem zurückführen. Entscheidungen sollen so getroffen werden, daß das betrachtete System einen besonders vorteilhaften Zustand annimmt. Durch das Ergebnis soll z. B. ein möglichst hoher Gewinn erzielt oder der finanzielle Aufwand gering gehalten werden. Bei technischen Fragestellungen, gerade bei der Auslegung von Anlagen, sind zusätzliche Ziele eine energetisch effiziente Betriebsweise und die hohe Qualität der Endprodukte.

Die Suche nach der bestmöglichen Lösung, dem Optimum, ist somit eine weit verbreitete Aufgabe, für die in der Mathematik viele unterschiedliche Methoden entwickelt worden sind. Zahlreiche Veröffentlichungen und Bücher behandeln die Optimierungstheorie und deren Anwendung auf verschiedene Probleme [45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52]. Aufbauend auf Optimierungsverfahren für lineare Probleme ohne einschränkende Randbedingungen sind kompliziertere Methoden entstanden. Mit der Anwendung der Optimierungsverfahren auf industrielles Anlagendesign nimmt die Komplexität der Aufgaben stark zu, da zahlreiche Einflußfaktoren und Randbedingungen berücksichtigt werden müssen [53, 54, 12]. Nur durch die Verfügbarkeit schneller und leistungsstarker Computer wurde der Einsatz der mathematischen Optimierungsverfahren in diesen komplizierten technischen Bereichen überhaupt erst möglich. Die Ausdehnung der Anwendungsgebiete bedeutet eine ständig notwendige Weiterentwicklung der Methoden. Diese Tendenz erhält mit den stetig wachsenden Rechenleistungen weiteren Auftrieb.

Die Übertragung der Optimierungsmethoden auf nichtlineare Probleme, die bei praktischen Aufgaben, wie bei den hier betrachteten Vorgängen der Quersfelderwärmung, zumeist vorliegen, ist in jüngster Zeit immer mehr in den Blickpunkt des Interesses gerückt. Mit Hilfe der Optimierungsmethoden können in vielen Bereichen hervorragende Ergebnisse erzielt werden, die ohne diese mathematischen Hilfsmittel nicht vorstellbar gewesen sind. In dem Anwendungsgebiet Quersfelderwärmung ermöglicht die Nutzung von mathematischen Optimierungsalgorithmen in der Auslegungsphase eine schnellere und zuverlässigere Bestimmung der für den bestimmten Anwendungsfall günstigen Anlagenkonfiguration. Weiterhin können mit Hilfe der Optimierungsverfahren aufwendige und zeitintensive Parameterstudien ersetzt werden. Dies ist ein wichtiger Schritt zum effizienten und anwendungsbezogenen Design.

Vor der Anwendung der Optimierungsverfahren für die Auslegung von Quersfeld-Erwärmungsanlagen (Kapitel 6 und 7), werden in diesem Kapitel die notwendigen mathematischen Grundlagen der Optimierung beschrieben. Der Schwerpunkt liegt dabei vor allem auf der Übertragung auf technische Probleme, die durch die in Kapitel 4 beschriebenen numerischen Modelle nachgebildet

werden. Zudem erfolgt eine Klassifizierung der Optimierungsmethoden mit kurzer Erläuterung der verwendeten Algorithmen und einer Beschreibung ihrer Vor- und Nachteile. Für die praktische Durchführung der Optimierung ist es notwendig, die Optimierungsalgorithmen mit den numerischen Berechnungswerkzeugen aus Kapitel 4 zu koppeln. Eine detaillierte Beschreibung des realisierten Optimierungssystems wird im letzten Abschnitt dieses Kapitels gegeben.

5.1 Einführung und Begriffsdefinition

Voraussetzung für eine Optimierung ist zunächst, daß für die betrachtete Aufgabe unterschiedliche Lösungen existieren, aus denen die beste ausgewählt werden kann. Die Bewertung dieser Lösungen erfordert die mathematische Beschreibung des interessierenden Kriteriums. Allgemein läßt sich die Optimierung als Verfahren zur Bestimmung eines Extremwertes für eine Funktion f_z beschreiben, wobei bestimmte Nebenbedingungen eingehalten werden müssen. Die Funktion kann von n Designvariablen x_1, x_2, \dots, x_n abhängig sein. Die mathematische Formulierung dieser Aufgabe lautet nach [55, 56, 54]

$$f_z(x_1, x_2, \dots, x_n) \stackrel{!}{=} \text{minimal}, \quad \text{mit } x_1, x_2, \dots, x_n \in \mathbb{R}^n \quad (5.1)$$

mit den m Gleichungs-Nebenbedingungen

$$g_j(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad \text{mit } j = 1, 2, \dots, m \quad (5.2)$$

und den p Ungleichungs-Nebenbedingungen

$$h_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0 \quad \text{mit } j = 1, 2, \dots, p. \quad (5.3)$$

In der Funktion f_z nach Gleichung (5.1), die als Zielfunktion bezeichnet wird, ist das Optimierungskriterium definiert. Das betrachtete System soll den optimalen Zustand erreichen, der durch das Minimum von f_z beschrieben wird, da in der mathematischen Optimierung das Optimierungsproblem auf ein Minimierungsproblem zurückgeführt wird. Das ist zulässig, da jedes Maximierungsproblem in ein Minimierungsproblem durch Multiplikation der Zielfunktion mit -1 überführt werden kann. Zur eindeutigen Lösung des Optimierungsproblems muß die Anzahl der Gleichungs-Nebenbedingungen m kleiner oder höchstens gleich der Anzahl an Designvariablen n sein. Andernfalls ist das Gleichungssystem überbestimmt. Die Anzahl der Ungleichungs-Nebenbedingungen p ist jedoch unbeschränkt.

5.1.1 Designvariablen

Größen, die ein System signifikant beeinflussen, werden Designvariablen des Systems genannt. Nach der Bestimmung des Basissystems von Designvariablen einer Konfiguration ist es sinnvoll,

eine Reduzierung dieser Variablen auf eine geringere Zahl unabhängiger Parameter durchzuführen. Die Auswahl der Parameter kann stark vereinfacht werden, wenn der Anwender mit den Eigenschaften des Systems vertraut ist. Abhängigkeiten zwischen einzelnen beeinflussenden Parametern, die meist auf Erfahrungswerten von Experten beruhen, sollten berücksichtigt und implizit verwendet werden. Damit sinkt nicht nur die Anzahl der unabhängigen Designvariablen sondern auch der erforderliche Zeitaufwand für die Optimierung. Die Reduktion der Designvariablen führt daneben auch zu einer Erhöhung der Wahrscheinlichkeit, daß ein Optimum gefunden wird.

Bei technischen Anwendungen ist es oftmals erforderlich, diskrete Größen, wie z. B. die Windungszahl eines Induktors oder die Anzahl von Zähnen eines Zahnrades, als Designvariablen zu definieren. In klassischen Optimierungsmethoden können diese Variablen zunächst nur als sich kontinuierlich ändernde Zahlenwerte verwendet werden. Wird ein Optimum gefunden, muß der Anwender die Werte der betroffenen Variablen auf sinnvolle diskrete Nachbarwerte auf- oder abrunden. Aufgrund der Veränderung der Werte für die Designvariablen muß eine Überprüfung des Minimums durchgeführt werden. Dieses Lösungsverfahren führt im allgemeinen zu einem guten Ergebnis. Andernfalls können auch Optimierungsverfahren verwendet werden, die das spezielle Problem der diskreten Größen berücksichtigen. Eine Garantie für eine bessere Lösung kann jedoch in diesem Fall nicht gegeben werden [53].

Viele Optimierungsmethoden verlangen Designvariablen derselben Größenordnung, was z. B. in der internen Behandlung der Variablen zur Bestimmung der nächsten Variablenkombination begründet ist. In einem solchen Fall ist es notwendig, die Variablen zu normieren, so daß sie alle im gleichen Bereich liegen [57].

5.1.2 Zielfunktion

Die Bestimmung des Optimierungskriteriums spielt bei der mathematischen Optimierung eine Schlüsselrolle. Die Notwendigkeit einer mathematischen Beschreibung des Optimierungskriteriums in Form der Zielfunktion f_z ist der entscheidende Unterschied zur klassischen manuellen Optimierung, bei der die Eigenschaften eines entworfenen Systems oft subjektiv betrachtet werden und eine Zielfunktion nicht zwingend erforderlich ist. In der mathematischen Optimierung muß das Ziel des Optimierungsprozesses formal beschrieben werden, damit eine Automatisierung des Verfahrens möglich ist. Die Bestimmung dieser Zielfunktion kann zuweilen die schwierigste Aufgabe bei der Optimierung darstellen. Die Besonderheit der Funktion ist, daß die gewünschte Eigenschaft eines Systems auf eine einzelne charakteristische Größe zurückgeführt werden muß. Sofern sich die Optimierung auf einen einzelnen Wert bezieht, ist das Optimierungskriterium einfach festzulegen. Die Zielfunktion besteht dann entweder aus dem Wert selbst oder aus seinem negativen Wert, wenn es sich um eine Maximierung handelt. Das ist beim Optimieren des Wir-

kungsgrades η der Fall

$$f_z = -\eta. \quad (5.4)$$

Ist das Ziel der Optimierung das Erreichen eines integralen Sollwertes, muß die Zielfunktion modifiziert werden. Den einfachsten Fall stellt die Definition der Abweichung zwischen Ist- und Sollwert dar. Beispielhaft sei hier die Zielfunktion für eine zu optimierende Nutzleistung P_{nutz} gegeben, die einen Wert von P_{soll} erreichen soll. In diesem Fall wird der Betrag der Differenz zwischen Ist- und Sollwert minimiert

$$f_z = |P_{nutz} - P_{soll}|. \quad (5.5)$$

Handelt es sich um zu optimierende Feldgrößen, z. B. die Leistungsdichte $p_{A,i}$ an n verteilten Stützstellen, gibt es zahlreiche Ansätze zur Bestimmung einer Zielfunktion. Eine Möglichkeit ist die Addition der Abweichungen zwischen Istwert $p_{A,i}$ und Sollwert $p_{A,soll,i}$

$$f_z = \sum_{i=1}^n \sqrt{(p_{A,i} - p_{A,soll,i})^2}. \quad (5.6)$$

Ist das Ziel die homogene Verteilung einer Größe, kann die Zielfunktion z. B. aus der Standardabweichung der Größe bestehen. Die Wirksamkeit jeder Zielfunktion muß im Einzelfall geprüft werden. Dieser Aspekt unterstreicht die Relevanz der sorgfältigen Bestimmung und Überprüfung der Zielfunktion zu Beginn einer mathematischen Optimierung.

Ein weitere Schwierigkeit ergibt sich durch die Tatsache, daß in der Praxis nahezu alle Optimierungsaufgaben mehrere Kriterien auf einmal berücksichtigen sollen. Das Ziel ist es dann, zusätzlich zu einer der oben genannten Eigenschaften weitere Kriterien zu erfüllen, wie z. B. eine definierte Temperaturverteilung zu erreichen. Ein allgemeingültiges Verfahren zur Lösung solcher Multi-Kriterium-Aufgaben gibt es nicht, da kein Algorithmus mehrere Zielfunktionen gleichzeitig optimieren kann. Es ist jedoch möglich, Hilfsmethoden zu verwenden, die zu guten Ergebnissen führen [12, 54].

Sind sämtliche Einzelkriterien, bzw. Zielfunktionen, von den gleichen Designvariablen abhängig, bietet sich an, eine Gesamtzielfunktion zu bilden. Dazu werden alle m_f Zielfunktionen mit unterschiedlichen Faktoren w_i gewichtet und addiert

$$f_z = \sum_{i=1}^{m_f} w_i f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad \text{mit} \quad \sum_{i=1}^{m_f} w_i = 1 \quad \text{und} \quad w_i \geq 0. \quad (5.7)$$

Die Bestimmung der Gewichtungsfaktoren richtet sich nach der Relevanz der einzelnen zu optimierenden Funktionen.

Eine alternative Methode ist die Minimierung einer einzelnen Zielfunktion, $f_{z,j}$, deren Kriterium dem Designer besonders wichtig erscheint, während alle anderen Zielfunktionen $f_{z,i}$ als zusätzliche

Nebenbedingungen mit den oberen Grenzen ε_i betrachtet werden

$$f_z = f_{z,j}(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad \text{mit } f_{z,i} \leq \varepsilon_i \quad \text{für } i = 1, \dots, m_f; i \neq j. \quad (5.8)$$

Eine weitere Vereinfachung ergibt sich, wenn die m_f Zielfunktionen jeweils von unterschiedlichen Designvariablen abhängig sind. In diesem Fall kann der Designer eine Rangordnung für die Zielfunktionen aufstellen und sie nacheinander unabhängig voneinander optimieren.

5.1.3 Restriktionen und zulässiger Raum

Die in den Gleichungen (5.2) und (5.3) definierten Nebenbedingungen lassen sich für den konkreten Anwendungsfall in explizite und implizite Nebenbedingungen, bzw. Restriktionen, überführen [51]. Die expliziten Nebenbedingungen legen das zulässige Gebiet der Designvariablen fest, indem für diese obere und untere Grenzen angegeben werden. Durch die impliziten Nebenbedingungen werden Abhängigkeiten zwischen den Designvariablen beschrieben. Die Einschränkungen ergeben sich z. B. aus geometrischen, physikalischen oder technischen Gründen. Das erlaubte Gebiet, dessen Grenzen in den Restriktionen formal definiert sind, wird oft auch als zulässiger Raum bezeichnet.

5.1.4 Lokale und globale Minima

Allen Optimierungsaufgaben ist gemein, daß der Anwender zunächst nicht sicher sein kann, ob für seine Zielfunktionen überhaupt ein Minimum existiert. In den meisten praxisrelevanten Fällen läßt sich das System jedoch optimieren und ein Minimum finden. Oft ist dies jedoch ein lokales Minimum oder aber der kleinste Wert liegt am Rande des Berechnungsgebietes und stellt somit gar kein Minimum im klassischen Sinn dar. Um diese Fragen zu klären, können entweder die sogenannten Optimierungsbedingungen (Abschnitt 5.2.1) überprüft oder das Verhalten der Zielfunktion untersucht werden.

Die Zielfunktion kann abhängig von den Designvariablen mehrere Minima, bestehend aus den oben genannten lokalen und einem oder in Einzelfällen mehreren globalen Minima, besitzen. In diesem Fall ist die Zielfunktion multimodal und die eindeutige Bestimmung des globalen Minimums gestaltet sich schwierig. Abhängig vom verwendeten Optimierungsalgorithmus können unterschiedliche Minima gefunden werden. Dies muß der Anwender bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigen.

Handelt es sich bei der Zielfunktion jedoch um eine unimodale Funktion, d. h. die eindimensionale Funktion f_z ist nach oben geöffnet, so tritt an der tiefsten Stelle das einzige und damit globale Minimum auf. Eine noch strengere Bedingung, die die Unimodalität einschließt, ist die sogenannte Konvexität. Eine Funktion wird konvex genannt, wenn für alle Punkte P_i auf der Ver-

bindungsgeraden zwischen zwei beliebigen Funktionswerten $f_z(x_1)$ und $f_z(x_2)$ gilt $P_i \geq f_z(x)$ für $x_1 \leq x \leq x_2$ [50,46]. Ist diese Bedingung erfüllt, dann liegt die Verbindungsgerade immer oberhalb der Funktion und schneidet diese nicht. Die Funktion selbst ist im konvexen Fall nach unten gewölbt und somit nach oben geöffnet. Ist die Funktion konvex, dann ist das lokale Minimum auch gleichzeitig das globale.

In den meisten Fällen kann der Anwender diese Bedingung jedoch nicht überprüfen, da die Funktion analytisch nicht vollständig vorliegt oder umfangreiche Nebenbedingungen bestehen. Diese Restriktionen können bewirken, daß aus einer konvexen eine nicht konvexe Funktion entsteht, deren Verhalten nicht von vornherein abgeschätzt werden kann [51]. In dieser Situation muß am Ende der Optimierung eine Überprüfung des gefundenen Minimums stattfinden. Das kann z. B. durch das mehrmalige Durchführen der Optimierung von verschiedenen Startwerten aus oder durch die Anwendung von stochastischen Optimierungsalgorithmen geschehen. Diese Problematik wird im nächsten Abschnitt bei der Beschreibung der Methoden als Hilfe zur richtigen Wahl eines Algorithmus berücksichtigt.

5.2 Klassifikation der Optimierungsmethoden

Die Wahl der Optimierungsmethode richtet sich nach zahlreichen Einflußfaktoren. Das Verhalten der Zielfunktion hinsichtlich Differenzierbarkeit, Stetigkeit, Konvexität ist dabei ein maßgeblicher Bestimmungsfaktor. Ebenso gehen aber auch die Randbedingungen, d. h. die existierenden Restriktionen, zur Verfügung stehende Rechenkapazität und -zeit in diese Entscheidungsfindung mit ein. Die Wirksamkeit jeder einzelnen Methode kann letztendlich nur durch das Testen am eigenen Anwendungsfall überprüft werden, da die Komplexität der Anwendungen keine allgemeingültige Lösung zuläßt.

Zunächst soll daher eine Übersicht über die verschiedenen Methoden gegeben werden. Diese Klassifizierung folgt den oben beschriebenen Einflußfaktoren und soll dem Anwender helfen, für seine eigene Optimierungsaufgabe eine geeignete Optimierungsmethode auszuwählen. Die umfangreiche internationale Literatur über Optimierung zeigt, daß in dieser Arbeit keine vollständige Analyse sondern nur eine Übersicht ausgewählter Methoden gegeben werden kann. Die Beschreibung beschränkt sich auf Verfahren zur Optimierung nichtlinearer Systeme, da dies für die meisten elektrothermischen Anwendungsfälle in der Industrie, insbesondere die induktive Querschleifenwärmung, zutrifft. Eine praktische Einteilung der Verfahren mit Hinweis auf die Entwicklungslinien der Algorithmen anhand von Beispielen steht dabei im Vordergrund. Neben der Einordnung der Methoden in eine Gesamtübersicht (Bild 5.1) werden Vor- und Nachteile der Algorithmengruppen diskutiert sowie Hinweise und Tips für den Anwender gegeben.

Für die Durchführung von Optimierungsaufgaben gibt es zwei grundsätzliche Ansätze. Die indi-

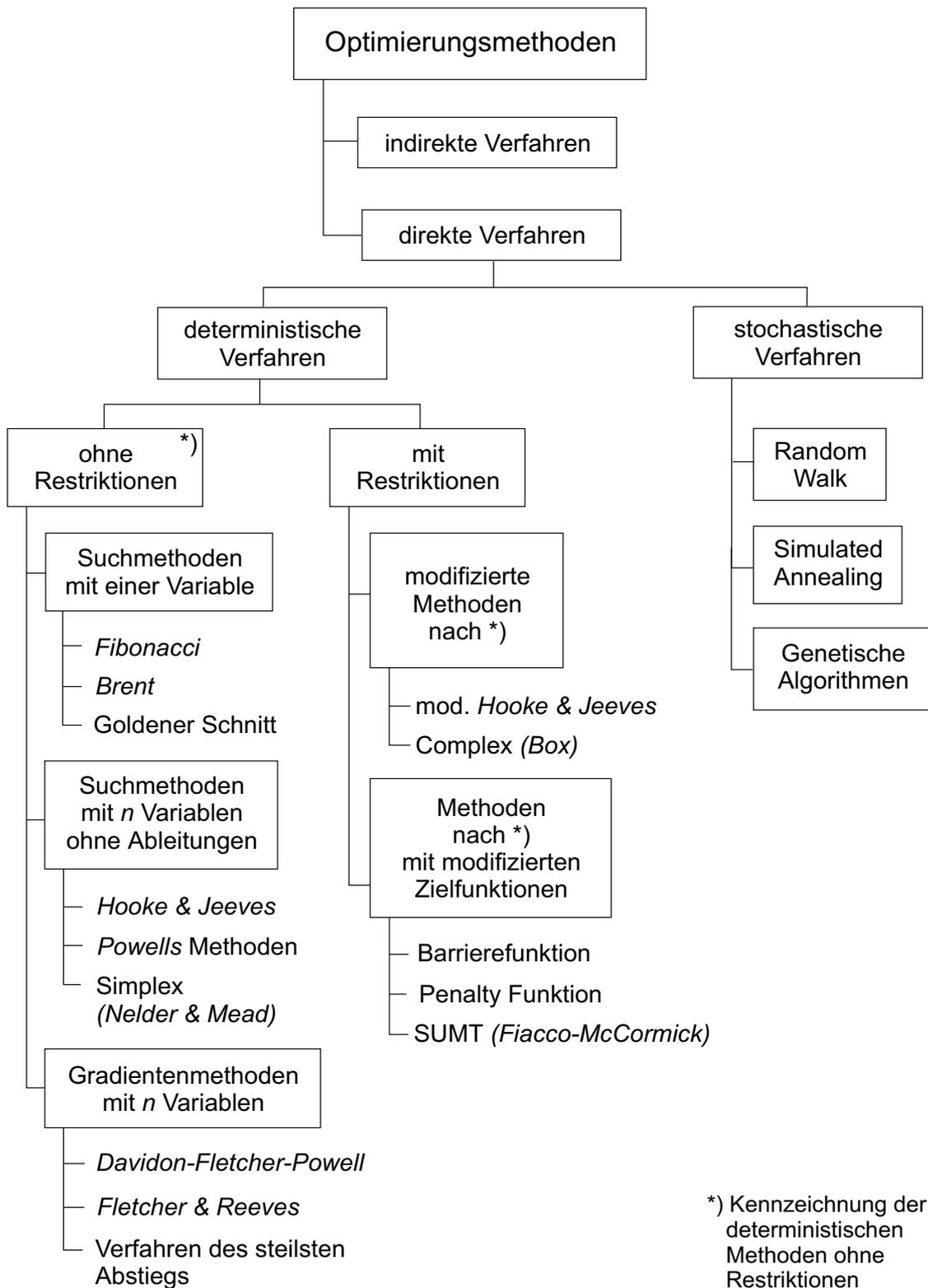


Abbildung 5.1: Übersicht zur Klassifikation der Optimierungsmethoden

rekten Methoden verwenden dabei analytische Verfahren und finden das exakte Optimum. Bei den direkten Suchverfahren werden Stützpunkte berechnet, um über eine schrittweise Suche das Optimum zu finden [58, 54, 59, 53]. Eine Kombination aus beiden Methoden stellen die sogenannten Surface-Fitting-Techniken dar. Alle drei Verfahren werden im folgenden beschrieben.

5.2.1 Indirekte Verfahren

Indirekte Verfahren analysieren die Eigenschaften der Zielfunktion und lösen die Aufgabe ohne nichtoptimale Punkte zu berechnen. Sie nutzen die Tatsache, daß im Extremum die ersten partiellen Ableitungen zu Null werden. Ist diese notwendige Bedingung erfüllt, muß die hinreichende Bedingung überprüft werden. Dazu sind Ableitungen höherer Ordnung notwendig, die an den zuvor festgelegten potentiellen optimalen Punkten bestimmt werden müssen. Eine wichtige Voraussetzung für die indirekte oder analytische Lösung des Optimierungsproblems ist daher, daß sich neben der Zielfunktion das zu optimierende System formal beschreiben läßt. Unter Anwendung der notwendigen und hinreichenden Bedingungen zur Extremwertbestimmung kann dann das exakte Minimum gefunden werden. Es handelt sich bei der Lösung nicht um eine Näherung.

In der Praxis lassen sich die meisten Optimierungsprobleme jedoch nicht komplett analytisch beschreiben bzw. wird dies beliebig aufwendig. Dadurch wird die Anwendung der indirekten Verfahren eingeschränkt. Liegt das Extremum am Rande des zulässigen Bereiches, sind weitergehende Überlegungen notwendig, um die Optimierungsaufgabe zur Zufriedenheit zu lösen [52]. Nachteilig ist zudem, daß die analytische Lösung immer auf ein ganz spezielles Problem abgestimmt ist und dadurch kein universelles Werkzeug zur Lösung einer Problemklasse geschaffen werden kann. Im allgemeinen werden daher direkte Suchverfahren eingesetzt.

5.2.2 Direkte Verfahren

Als direkte Verfahren werden Methoden bezeichnet, die iterativ die Lösung eines Optimierungsproblems bestimmen. Dabei wird direkt der Zielfunktionswert für unterschiedliche Kombinationen der Designvariablen bestimmt und schrittweise verbessert. Nachteilig ist dabei, daß die direkten Methoden aufgrund der schrittweisen Annäherung an das Optimum den exakten Extremwert theoretisch nur nach unendlich vielen Iterationen finden können. In der Praxis bricht ein zuvor definiertes Kriterium die Suche ab, wenn die Änderungen der Zielfunktionswerte eine bestimmte Schwelle unterschreiten. Die gefundene Lösung ist für die meisten Anwendungsfälle ausreichend. Die indirekten Verfahren können auch dann angewendet werden, wenn die Zielfunktion nicht als analytische Funktion vorliegt. Es ist lediglich notwendig, über ein Bestimmungsverfahren für die Zielfunktionswerte zu verfügen. Idealerweise handelt es sich dabei um ein mathematisches Modell, das im Gegensatz zum physikalischen Modell eine automatisierte Optimierung erlaubt. Weiterhin bieten die direkten Suchverfahren die Möglichkeit, über modular aufgebaute Elemente der Optimierungsschleife und standardisierte Algorithmen ein universell einsetzbares Optimierungswerkzeug zu entwickeln (Kapitel 5.3). Abhängig vom Suchalgorithmus, d. h. dem Schema nach dem die neuen Kombinationen der Designvariablen festgelegt werden, lassen sich die direkten Verfahren in zwei Gruppen einteilen, die deterministische und die stochastische.

Deterministische Verfahren

Bei deterministischen Verfahren ist der Weg der Optimierung durch die Zielfunktion bestimmt. Jede Wiederholung der Optimierung mit den gleichen Startwerten und dem identischen Abbruchkriterium führt zum gleichen, reproduzierbaren Ergebnis. Entstanden sind diese mathematischen Suchmethoden zunächst zur Lösung von einfachen Optimierungsproblemen ohne Restriktionen. Die Suchverfahren von *Fibonacci* [51] und *Brent* [60] sowie die Methode des Goldenen Schnitts [60] sind in der Klasse der 1D-Optimierung, d. h. mit nur einer unabhängigen Designvariable, zusammenzufassen (Bild 5.1). Diese Verfahren eignen sich hervorragend zur Überprüfung des Einflusses einzelner Parameter.

Für die 1D-Optimierung wurde in dieser Arbeit vornehmlich das Verfahren von *Brent* eingesetzt, das im Vergleich zu der Methode des Goldenen Schnitts schneller zum Ziel führt und somit für den in dieser Arbeit beschriebenen Anwendungsfall eine effektive Lösung darstellt. *Brents* Methode basiert auf der quadratischen Interpolation der Zielfunktion. Ausgehend von drei Startwerten wird eine Parabel bestimmt, deren Minimum den nächsten zu berechnenden Zielfunktionswert darstellt. Durch die drei kleinsten Werte wird wiederum eine Parabel gelegt und das Problem so iterativ gelöst. Beim Verfahren des Goldenen Schnitts wird der Lösungsbereich der Variable schrittweise unterteilt und jeweils entschieden, in welchem Restintervall das Minimum der Zielfunktion weiter zu suchen ist [60, 50].

Eine weitere Gruppe der deterministischen Verfahren sind die Suchmethoden mit n Designvariablen, zu denen die Methoden von *Hooke & Jeeves* [51], *Powell* [60] und *Nelder & Mead* [51, 60] zählen. Letztere haben das sogenannte Simplex-Verfahren von *Spendley, Hext* und *Himsworth* erweitert [51]. Es bildet die Grundlage für zahlreiche Algorithmen, die aufgrund verschiedener Modifikationen in andere Verfahrensklassen einsortiert werden können. Das Prinzip dieser Methode ist die Bestimmung und der Vergleich der Funktionswerte der $n + 1$ Eckpunkte eines konvexen Polyeders, dem Simplex [61]. Die Bewegung des Simplex durch den zulässigen Raum ist mittels der drei Basisoperationen Reflexion, Expansion und Kontraktion zur Bestimmung neuer Koordinaten für die Eckpunkte des Simplex möglich und wird so lange durchgeführt bis das Minimum gefunden wurde. Die Modifikationen durch *Nelder & Mead* erlauben, daß das Simplex unregelmäßig wird, d. h. die Eckpunkte zueinander nicht alle den gleichen Abstand besitzen müssen. Dadurch entsteht eine sehr robuste direkte Suchmethode, die sehr leistungsfähig ist, solange die Anzahl an unabhängigen Variablen unter fünf bleibt.

Werden zur Bestimmung der nächsten Kombinationen von Designvariablen Gradienten verwendet, können diese Verfahren in der Gruppe der sogenannten Gradientenmethoden zusammengefaßt werden, zu denen z. B. die Verfahren von *Davidon-Fletcher-Powell* [51] und *Fletcher & Reeves* [51] zählen. Allen Gradientenverfahren ist gemein, daß von Startwerten innerhalb des zulässigen Bereichs ausgehend in Richtung des steilsten Abstiegs eine neue Variablenkombination

gesucht wird [52]. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, daß das Minimum schneller gefunden wird. Liegt die Zielfunktion jedoch nicht in analytischer Form vor, ist die Bestimmung des Gradienten schwieriger. Sie geschieht dann durch die Bildung des Differenzquotienten aus zusätzlich zu bestimmenden Zielfunktionswerten. Dadurch erhöht sich die notwendige Zahl an Berechnungen.

Die vielfältigsten Ansätze und Verfahren zur Optimierung sind für die Probleme ohne Nebenbedingungen entwickelt worden. Der Grund hierfür liegt in den mathematischen Wurzeln dieser Entwicklung. Bei den meisten praktischen Anwendungsfällen sind jedoch Nebenbedingungen zu berücksichtigen, da ohne sie nicht realisierbare und berechenbare Konfigurationen entstehen können. Aus diesem Grund kommen im Rahmen dieser Arbeit für die n D-Optimierung mit n Designvariablen die oben genannten Methoden ohne Restriktionen nicht zur Anwendung. Es ist für die Optimierung von induktiven Quersfelderwärmern notwendig, Verfahren einzusetzen, die Nebenbedingungen berücksichtigen können.

Sämtliche Verfahren, bei denen Restriktionen berücksichtigt werden, können in zwei Kategorien eingeteilt werden und finden beide ihren Ursprung in den oben beschriebenen Methoden ohne Restriktionen¹. Auf der einen Seite werden diese einfachen Methoden so modifiziert, daß Nebenbedingungen berücksichtigt werden können. Auf der anderen Seite werden die beschriebenen nichtrestringierten Methoden ohne Anpassung verwendet. Die Berücksichtigung der Nebenbedingungen wird über die Änderung der Zielfunktion realisiert.

Die Überführung der Methoden ohne Restriktionen in Verfahren, die Nebenbedingungen berücksichtigen, erfordert die genaue Kenntnis des Optimierungsalgorithmus sowie der verwendeten Programmiersprache und wird im allgemeinen nur von Spezialisten durchgeführt. Eine Vielzahl dieser modifizierten Verfahren ist sowohl in der Literatur [51, 60] als auch in elektronischer Form im Internet zu finden. Der Anwender der angepaßten Methoden kann diese als „Black-Box“ betrachten und sich der eigentlichen Optimierungsaufgabe widmen. Zu diesen Verfahren gehört die Complex-Methode von *Box* [51], die in dieser Arbeit für die mehrdimensionale Optimierung, d. h. Optimierung mit mehreren Designvariablen, verwendet wurde. Die Complex-Methode ist 1964 von *Box* aus der Simplex-Methode nach *Nelder & Mead* entwickelt worden und erlaubt, Beschränkungen der Eingabeparameter und auch Abhängigkeiten dieser voneinander, d. h. explizite und implizite Restriktionen, zu berücksichtigen. Die weiteren Anpassungen beziehen sich auf die Bestimmung der Startwerte, die ursprünglich durch eine zufallsbedingte Methode durchgeführt wurde. In der angepaßten Version lassen sich die Startwerte vom Anwender selbst auswählen und die Zufallsfunktion ist nicht mehr aktiv. Für die vorliegende Arbeit wurde die Complex-Methode für zahlreiche Optimierungen mit zwei bis vier Variablen verwendet. Sie erweist sich als sehr robustes Werkzeug, das relativ schnell das gesuchte Minimum findet. Es stellte sich allerdings heraus, daß numerische Ungenauigkeiten, die durch die Diskretisierung in der numerischen Berechnung ent-

¹ in Bild 5.1 mit *) gekennzeichnet

stehen, bei sehr flach ausgeprägten Zielfunktionen nicht zu dem gewünschten Ziel führt. Die Suche nach dem Optimum wird frühzeitig abgebrochen. Abhilfe liefert hier der Einsatz von stochastischen Methoden.

Bei der Nutzung der nichtrestringierten Methoden in ihrer ursprünglichen Form werden die Nebenbedingungen über die Anpassung der Zielfunktionen berücksichtigt. Diese Aufgabe, die Zielfunktionen derart zu erweitern, daß ebenfalls Nebenbedingungen möglich sind, obliegt dem Anwender selbst. Er muß die Zielfunktionen mit Straffunktionen versehen. Hierbei wird zwischen inneren und äußeren Straffunktionen unterschieden. Bei der Verwendung der inneren Straffunktion, auch Barrierefunktion genannt, wird von einem Startwert der Designvariablen innerhalb des durch die Nebenbedingungen festgelegten Bereichs ausgegangen. Mit zunehmender Nähe zum Rand des zulässigen Bereichs wird der Zielfunktionswert mit einem steigenden Strafwert beaufschlagt, so daß das zulässige Gebiet nicht verlassen wird. Dies ist wichtig, da auf diese Weise vermieden wird, daß das Simulationsprogramm für unrealistische Kombinationen aus Designvariablen, die zum Abbruch der Berechnung führen können, die Zielfunktion bestimmen muß. Nachteilig ist die Beaufschlagung der Zielfunktion mit Strafwerten innerhalb des zulässigen Bereiches, wodurch das Ergebnis verfälscht werden kann. Die äußere Straffunktion, oder Penalty Funktion, bestraft nur außerhalb des zulässigen Bereiches ungünstige Kombinationen der Designvariablen. Mit zunehmendem Abstand vom zulässigen Bereich werden dem Zielfunktionswert wachsende Strafen hinzugefügt [46]. Für den hier vorliegenden Anwendungsfall eignet sich dieses Strafverfahren in der ursprünglichen Form aus dem oben genannten Grund der Berechnung unrealistischer Konstellationen jedoch nicht. Es wird eine abgewandelte Penalty Funktion verwendet, die vor der Berechnung die zulässigen Bereiche der Designvariablen überprüft. Handelt es sich um eine unerlaubte Kombination aus Designvariablen, wird der Zielfunktionswert direkt ohne Simulation auf einen sehr hohen Wert gesetzt. Diese Methode kommt in Verbindung mit den genetischen Algorithmen als stochastisches Optimierungsverfahren zum Einsatz. Vielfältige Kombinationen von inneren und äußeren Straffunktionsmethoden sind denkbar. Als Beispiel für eine Weiterentwicklung und für die gleichzeitige Verwendung beider theoretisch sehr ähnlichen Verfahren soll hier die Sequential Unconstrained Minimization Technique (SUMT) von *Fiacco-McCormick* genannt werden [62,46].

Die deterministischen Verfahren werden oft auch als lokale Verfahren bezeichnet, da sie aufgrund ihres Prinzips, immer nur kleinere Werte für die Zielfunktion zulassen und im Gebiet eines einmal gefundenen lokalen Minimums verharren. Sie erlauben nicht, in einen weiteren Bereich mit möglicherweise niedrigeren Werten für die Zielfunktion zu springen. Bei der Anwendung dieser Optimierungsalgorithmen muß daher immer eine Überprüfung des Optimums stattfinden. Führen mehrere Optimierungsläufe mit unterschiedlichen Startwerten für die Designvariablen zu dem gleichen Ergebnis, so ist die Wahrscheinlichkeit höher, daß das lokale Minimum auch gleichzeitig ein globales ist.

Stochastische Verfahren

Kennzeichen der stochastischen oder auch probabilistischen Verfahren ist, daß die Suche von Zufallsprozessen beeinflußt wird. Es ist nicht möglich, den Verlauf der Suche abhängig von bestimmten Startwerten vorherzusagen.

Bei der Methode des Random Walk [12] (Bild 5.1) werden die Designvariablen zufällig verändert. Die Methode kann daher als mathematisches Äquivalent zur physikalischen Brownschen Bewegung bezeichnet werden. Für die Methode des Simulated Annealing [12] ist die Analogie in der Thermodynamik zu finden (Bild 5.1). Der Algorithmus baut auf den Gesetzmäßigkeiten zum Abkühlen von Metallen oder Flüssigkeiten auf. Langsam abkühlende Medien richten sich oft über weite Strecken geordnet aus, so daß sie einen Kristall bilden, der energetisch günstiger ist als amorphe Strukturen. Dieser Effekt kann bei der Optimierung genutzt werden. Die dritte Gruppe der stochastischen Verfahren bilden die genetischen Algorithmen [63], die in den unterschiedlichsten Varianten existieren. Sie alle basieren auf den Prinzipien der Evolution, d. h. Selektion, Kreuzung und Mutation, auf deren Basis sich Generationen verändern und der optimale Zustand, d. h. die beste Fitneß eines Systems gefunden werden kann.

Vorteil der stochastischen Verfahren ist, daß sie das ganze Gebiet nach dem Optimum absuchen und sich nicht bei einer einmal gefundenen guten Konfiguration in einem lokalen Minimum festlaufen. Durch den ständigen Einsatz von zufällig erzeugten Kombinationen ist die Wahrscheinlichkeit sehr hoch, daß diese spezielle Gruppe von direkten Suchverfahren das globale Optimum findet. Unstetige oder beispielsweise wellige Zielfunktionen schränken die Wirksamkeit dieser robusten Methoden nicht ein. Einziger Nachteil dieser Verfahren ist ihre verminderte Effektivität. Für das Auffinden eines Extremums sind vergleichsweise mehr Optimierungsschritte und damit auch Berechnungen der Zielfunktion verbunden. Da aber weitere Optimierungsläufe mit unterschiedlichen Startpunkten nicht durchgeführt werden müssen, kann die Anzahl an Berechnungsschritten insgesamt im Vergleich zu deterministischen Verfahren sogar geringer sein. Im Rahmen dieser Arbeit kam daher ein genetischer Algorithmus für die nD -Optimierung zum Einsatz, um im Vergleich zum verwendeten deterministischen Verfahren die Wahrscheinlichkeit zu erhöhen, das globale Minimum zu finden.

5.2.3 Surface-Fitting-Techniken

Eine Kombination der indirekten mit den direkten Optimierungsverfahren stellen die Surface-Fitting-Techniken dar. Dafür werden einige interessante und praktische Zielfunktionswerte des zu optimierenden Systems direkt bestimmt. Das kann zum einen numerisch aber auch experimentell geschehen. Basierend auf diesen Stützstellen wird die Zielfunktion analytisch durch ein Polynom angenähert. Die Bestimmung der Extremwerte dieser Funktion kann dann analytisch, also indirekt durchgeführt werden [59, 64]. Dieses Verfahren wird auch beim sogenannten Design of Experi-

ments (DoE) verwendet [65]. Im Rahmen dieser Arbeit wurde dieses Verfahren nicht angewendet.

5.3 Kopplung von Optimierungsalgorithmen mit numerischen Berechnungsprogrammen

Die am häufigsten eingesetzte Methode zur Kopplung von Berechnungsprogrammen mit Optimierungsalgorithmen ist die Einbettung des Berechnungsprogramms in den Optimierungsalgorithmus selbst. Der innerhalb der Optimierungsschleife benötigte Zielfunktionswert wird direkt bestimmt, indem das Simulationsprogramm in den Ablauf integriert wird und bei Bedarf den gewünschten Wert erzeugt. Dadurch entsteht ein sehr spezielles Optimierungssystem. Änderungen in der Zielfunktion oder des verwendeten Berechnungsprogramms bedeuten hier immer einen programmier-technischen Eingriff in das Gesamtsystem mit anschließend notwendiger Compilierung. Besteht das Simulationsprogramm aus unterschiedlichen Einzelpaketen für das Pre- und Postprocessing, gestaltet sich diese interne Kopplung sehr schwierig und ist fehleranfällig. Basieren die benötigten unterschiedlichen Programme möglicherweise auf unterschiedlichen Programmiersprachen und sollen auch kommerzielle Programmpakete eingebunden werden, ist die interne Kopplung nahezu unmöglich. Zusätzlich ist der Wechsel zu einem anderen Optimierungsverfahren nur durch großen Aufwand möglich, da das Berechnungsprogramm wiederum in den Quellcode des neuen Optimierungsalgorithmus eingebunden werden muß. Eine einmal durch einen Stromausfall oder Computerabsturz abgebrochene Optimierung kann außerdem nur unter großem Aufwand weitergeführt werden, da die Zwischenspeicherung aller Stützstellen gewährleistet werden muß. Dies ist in der beschriebenen Konfiguration nicht ohne weiteres möglich.

Zur Lösung der oben beschriebenen Problematik wurde in der vorliegenden Arbeit eine externe Kopplung der einzelnen Programme realisiert, so daß ein universell einsetzbares Optimierungssystem entsteht, dessen einzelne Komponenten austauschbar sind. Die Kommunikation zwischen Optimierungsalgorithmus und Berechnungsprogramm ist über Schnittstellenprogramme realisiert, die eine einheitliche Struktur besitzen. Sie wickeln den Datentransfer zwischen Berechnungsprogramm und Optimierungsalgorithmus über das Schreiben und Lesen von standardisierten Ein- und Ausgabedateien ab. Alle Programme sind eigenständig und werden nacheinander im Batch-Betrieb aufgerufen. In einer sogenannten History-Datei werden relevante Daten aller Berechnungsschritte zwischengespeichert, um einem Informationsverlust bei Unterbrechungen abzufangen. Um die Handhabung des Systems zu vereinfachen, sind sämtliche verwendete Optimierungsalgorithmen so angepaßt worden, daß sie in einer Datenbank für den Einsatz bereit stehen. Dieses System erlaubt eine automatische Optimierung und ermöglicht den einfachen Austausch sowohl der Simulationsprogramme als auch der Optimierungsalgorithmen. Dadurch wird es für zahlreiche Anwendungszwecke einsetzbar. Die in dieser Arbeit präsentierten Ergebnisse wurden durch die Verwendung

des Programmpaketes HIHTEC 3D in Kombination mit unterschiedlichen Optimierungsmethoden erzielt. Als Optimierungsalgorithmen kamen die Methode nach *Brent*, das Verfahren des Goldenen Schnitts und die Complexmethode von *Box* als deterministische Verfahren sowie ein zur Gruppe der stochastischen Methoden gehörender genetischer Algorithmus zum Einsatz.

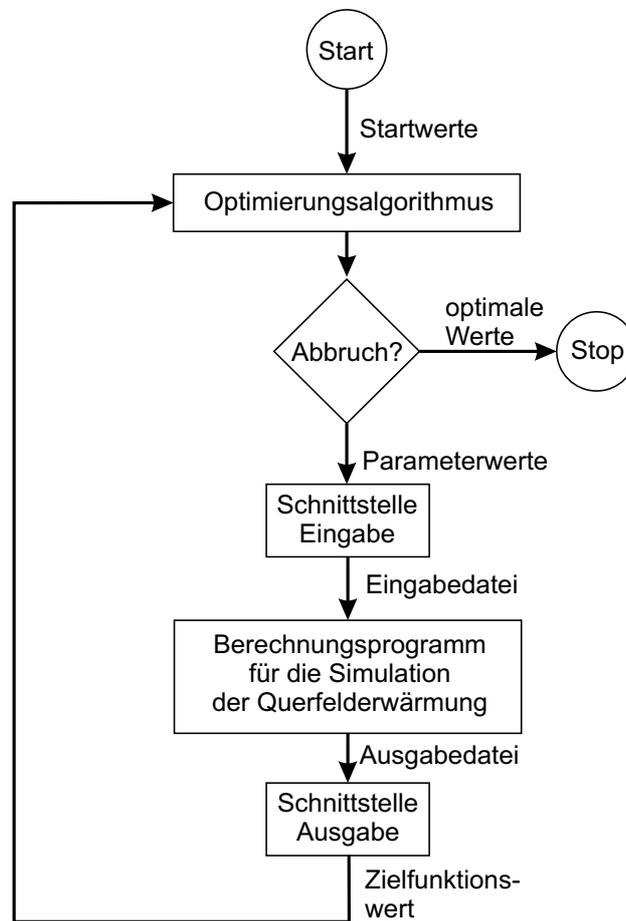


Abbildung 5.2: Flußdiagramm der automatisierten mathematischen Optimierung bei externer Kopplung

Gestartet wird der Optimierungslauf mit zuvor festgelegten Startwerten für die Designvariablen. Das Schnittstellenprogramm für die Eingabe liest diese Werte und überträgt sie in die für das Berechnungsprogramm notwendige Form (Bild 5.2). Die Eingabedateien werden geschrieben und das Berechnungsprogramm mit diesen gestartet. Nach einem Berechnungslauf werden die aktuell verwendeten Größen für die Variablen und der sich ergebende Wert der Zielfunktion von der Schnittstelle für die Ausgabe an den Optimierungsalgorithmus übermittelt. Auf der Basis dieses Stützpunktes bestimmt das Optimierungswerkzeug eine neue Kombination von Eingangsparametern für das Simulationsprogramm, um die Zielfunktion zu minimieren. Diese Schleife wird so lange durchlaufen bis der Wert der Zielfunktion ein bestimmtes Abbruchkriterium erfüllt.

Mittlerweile sind in kommerziellen Programmen, wie z. B. ANSYS, ebenfalls Optimierungsmöglichkeiten realisiert. Der Anwender kann zwischen verschiedenen Algorithmen für die Optimie-

nung seines Berechnungsbeispiels wählen, die innerhalb des Programmsystems zur Verfügung stehen. Die Kommunikation ist intern festgelegt, so daß der Anwender keinen Einfluß darauf hat und das Optimierungssystem nur mit dem jeweiligen Berechnungsprogramm genutzt werden kann. Da die Programmpakete universell einsetzbar sind, ist die Vorbereitung einer Berechnung sowie einer Optimierung sehr aufwendig. Aus einer Vielzahl von Eingabeparametern müssen die relevanten Designvariablen extrahiert werden. Das ist gerade bei geometrischen Größen im dreidimensionalen Raum sehr kompliziert und zeitraubend. Die Gestaltung der Zielfunktion erfordert wegen der vordefinierten Möglichkeiten des Postprocessing bisweilen einen hohen Aufwand. Da die Rechenzeiten dieser kommerziellen Programmpakete gerade für das dreidimensionale Anwendungsgebiet der Quersfelderwärmung sehr viel höher als bei problemangepaßten Programmen sind, eignen sie sich nicht für eine Gesamtoptimierung. Für abgegrenzte Teilaufgaben läßt sich das kommerzielle Programmpaket ANSYS jedoch gut einsetzen. Die 2D-Berechnungen zum optimalen Design des Spulenquerschnitts wurden mit dieser Software erfolgreich durchgeführt (Abschnitt 7.3.2).

6 Strategie des optimierten Designs

Bei der Auslegung von energietechnischen Anlagen spielen in der heutigen Zeit immer mehr mathematische Optimierungsmethoden bzw. automatisierte Optimierungstechniken eine wichtige Rolle [66,64,67]. Die Komplexität der zu lösenden Probleme und der wachsende Anspruch an eine immer höhere Qualität der Produkte und Effektivität der Anlagen erfordert die Verwendung von Optimierungswerkzeugen. Das rein experimentelle Design von Induktionsanlagen wurde durch die Verwendung mathematischer Modelle zur Simulation des Anlagenverhaltens am Computer abgelöst. Die Nachbildung der elektrothermischen Vorgänge durch derartige Berechnungsprogramme ermöglicht eine erhebliche Zeit- und somit Kostenersparnis. Der Weg zu einem optimalen Design, das am Ende nur einer punktuellen experimentellen Verifikation bedarf, wird durch die Verwendung von numerischen Programmen verkürzt.

Komplexe physikalische Zusammenhänge, wie sie bei der induktiven Quersfelderwärmung vorliegen, sind ohne die mathematische Modellierung auf experimenteller Basis nahezu unmöglich zu durchdringen. Die Fülle der beeinflussenden Größen ist mit vertretbarem Aufwand nur durch eine systematische Untersuchung im Rahmen von umfangreichen Parameterstudien beherrschbar. Im Zuge der stetigen Steigerung der Rechnerleistungen erfährt jedoch auch diese Methode eine Weiterentwicklung. Die Modelle werden verbessert und lassen eine 3D-Berechnung sämtlicher integraler und verteilter Größen mit vertretbarem Zeitaufwand zu.

Die Verwendung von mathematischen Optimierungsalgorithmen stellt nun einen weiteren Entwicklungsschritt in der verbesserten Auslegung von Induktionsanlagen dar. Mit dem Einsatz solcher Methoden wird der Projektierungsingenieur in die Lage versetzt, optimale Betriebspunkte schneller und mit größerer Sicherheit zu finden. Das Aufsuchen des Optimums wird von den Optimierungsalgorithmen übernommen und somit automatisiert. Schon ab einer Anzahl von zwei zu untersuchenden Parametern wirkt sich dieses Verfahren positiv auf die Zeitfrage gegenüber der manuellen Suche aus. Eine Überprüfung der auf diese Weise erzielten Ergebnisse durch experimentelle Untersuchungen ist dabei jedoch unerlässlich.

Das automatische Auffinden eines Optimums vereinfacht das Überprüfen der Wirksamkeit einzelner Systemänderungen der betrachteten Erwärmerkonfiguration hinsichtlich der definierten Zielfunktion. Der daraus resultierende notwendige Schritt zur Weiterentwicklung der Anordnung, wie z. B. das Erweitern der Designvariablen, kann einfach durchgeführt und systematisiert werden.

Für den Einsatz der in Kapitel 5 beschriebenen Optimierungsmethoden in Verbindung mit numerischen Berechnungsprogrammen ist neben der formalen Implementierung auch ein guter Kenntnisstand des Anwenders über die physikalischen Zusammenhänge erforderlich. Prinzipielle Abhängigkeiten der Kenngrößen können berücksichtigt werden und gehen in die Reduzierung der

formalen Eingangsparameter für die automatische mathematische Optimierung ein. Nur auf dieser Basis ist es möglich, die Werkzeuge der Optimierung effektiv und sinnvoll einzusetzen. Ohne die Reduzierung der Parameteranzahl wäre die Lösung des Optimierungsproblems auf rein formaler, mathematischer Ebene theoretisch ebenfalls möglich. Problematisch erweist sich in diesem Fall jedoch die Bestimmung der Zielfunktion, die nicht multifunktional sein kann. Sie besteht bestenfalls aus einer Summe von gewünschten Größen, wie z. B. Wirkungsgrad und Temperaturabweichung, so daß das Ergebnis nur eine lokale Lösung des komplexen Problems darstellt. Es ist zudem nicht gewährleistet, daß das Ergebnis physikalisch sinnvoll, in der Praxis realisierbar und eindeutig ist. Nachteilig würden sich die zahlreichen Einflußgrößen weiterhin auf die Berechnungszeit auswirken, da sie überproportional mit wachsender Anzahl der Parameter ansteigt.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Strategie zum optimalen Design von Quersfelderwärmern stützt sich aus den beschriebenen Gründen somit einerseits auf Erfahrungswerte von Experten und nutzt andererseits die Methoden der mathematischen Optimierung. Diese Vorgehensweise führt zu einem optimierten Verfahren zur Auslegung von elektrothermischen Anlagen, das auch in [27] empfohlen wird. Ein allgemeingültiges Verfahren zur optimalen Auslegung sämtlicher elektrothermischer Anlagen ist aufgrund der zu verschiedenen Probleme nicht möglich. In dieser Arbeit wird jedoch eine Methodik am Beispiel der induktiven Quersfelderwärmung vorgestellt, die auf andere Designvorhaben übertragen werden kann (Abschnitt 6.6).

6.1 Konzept der Optimierung

Ausgehend von den Anforderungen an den Prozeß werden zunächst im ersten Schritt der Optimierung die integralen Größen optimiert (Bild 6.1). Dabei wird auf bereits vorhandenes Expertenwissen über die physikalischen Zusammenhänge des Systems zurückgegriffen. Ergebnisse experimenteller, analytischer und numerischer Untersuchungen in der Vergangenheit werden hierbei berücksichtigt, um die Anzahl der Parameter zu reduzieren. Auf der Basis bekannter prinzipieller Abhängigkeiten von Betriebs- und Anlagengrößen werden aus den Anforderungen an die zu entwickelnde Anlage Arbeitsbereiche definiert, innerhalb derer sich die charakteristischen Größen des Prozesses befinden werden. Sie bilden die Grundlage für die Restriktionen der angeschlossenen automatischen Optimierung. Mit Hilfe von einfachen Modellen (vgl. Abschnitt 4.1) kann eine Optimierung des Wirkungsgrads η_{el} und des Leistungsfaktors $\cos \varphi$ manuell durchgeführt werden. Sich daraus ergebende formale Zusammenhänge der Designvariablen gehen in den zweiten Schritt der Optimierung ein.

Im zweiten Schritt, der Optimierung der verteilten Größen, werden mathematische Optimierungsalgorithmen zur Lösung des vereinfachten inversen Problems verwendet. Dazu muß als erstes eine Ausgangskonfiguration für die auszulegende Anlage festgelegt werden. Das primäre Ziel jedes

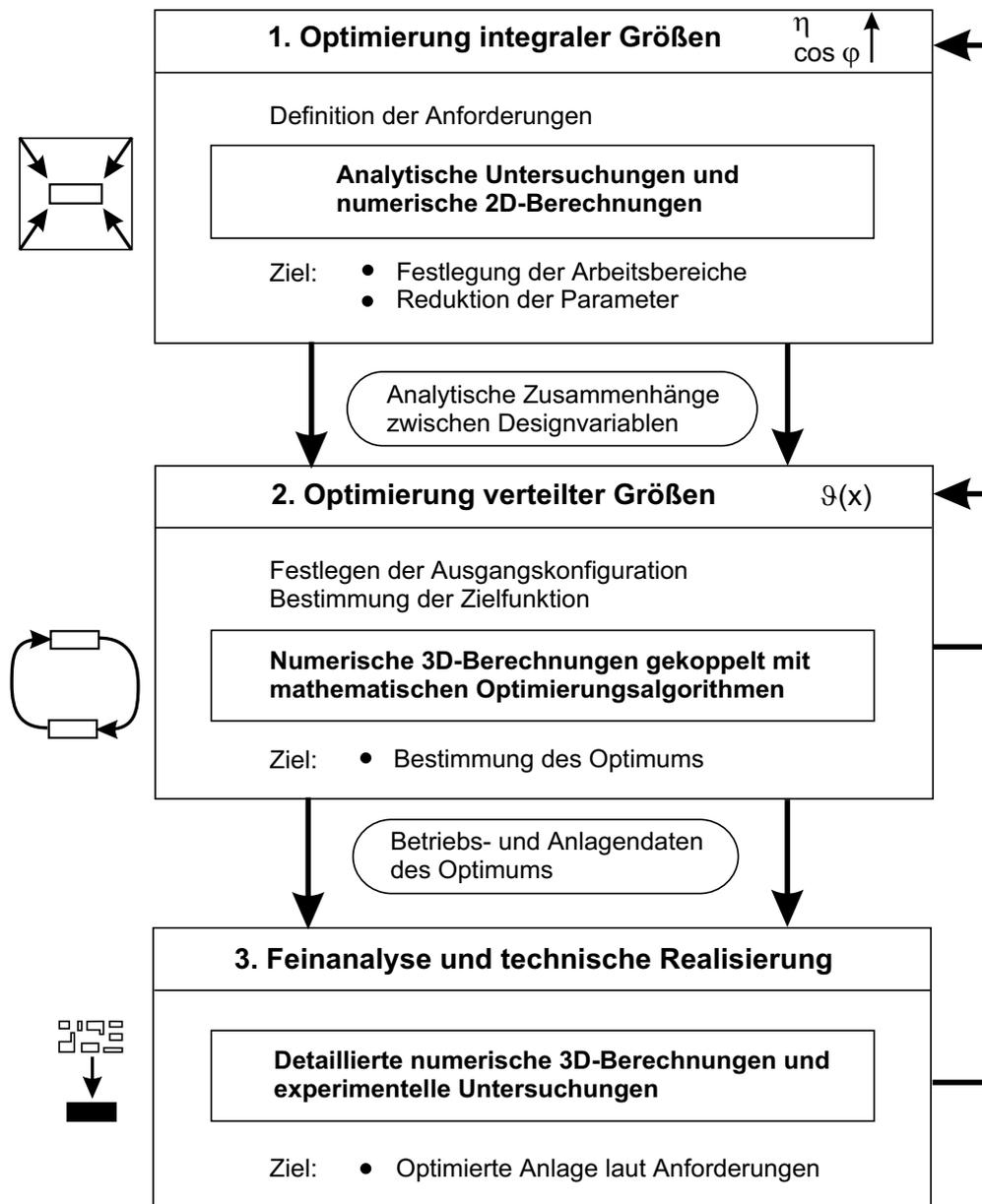


Abbildung 6.1: Konzept der Optimierung für die Auslegung von Quersfeld-Erwärmungsanlagen

Designvorhabens sollte sein, das gewünschte Ziel möglichst mit der einfachsten geometrischen und technologischen Anordnung zu erreichen. Auf diese Weise kann eine maximale Robustheit der entwickelten Anlage erzielt werden. Je weniger Komponenten sie aufweist, um so stabiler, wartungsfreundlicher und kostengünstiger ist sie. Anfällige Feinjustierungen oder aufwendige und teure Technologien werden dadurch vermieden. Der einfache Auslegungsansatz kann bei Bedarf schrittweise durch Hinzufügen von zusätzlichen Systemkomponenten oder Zulassen zusätzlicher Designvariablen erweitert werden, wenn die Ergebnisse der Analyse des ersten Ansatzes die Anforderungen nicht erfüllen. Zur Erleichterung der Wahl einer Quersfeldanordnung werden im folgenden Abschnitt sämtliche Quersfeldanordnungen in drei Gruppen eingeteilt, die nach ihrer Komplexität gestaffelt sind. Der automatische Teil der Optimierung konzentriert sich dann auf die Auslegung

des Erwärmers in Hinblick auf die verteilten Feldgrößen, wie Leistungsdichte und Temperatur, unter Einsatz des problemangepaßten Modells HIHTEC 3D (vgl. Abschnitt 4.2) und mathematischer Algorithmen (vgl. Abschnitt 5.2). Die Definition der Zielfunktion spielt hier eine wichtige Rolle, so daß in dieser Arbeit mögliche Zielfunktionen für unterschiedliche Anforderungen an das Temperaturprofil von Quersfelderwärmern vorgestellt werden. Die Wahl der Designvariablen hängt sehr stark von der ausgewählten Quersfeldanordnung entsprechend der zuvor definierten Gruppen ab. Aus diesem Grund werden im folgenden Abschnitt Optimierungsbeispiele aus den drei Gruppen vorgestellt.

Abgeschlossen wird der Prozeß des Designs mit einer Feinanalyse der optimierten Anordnung in Hinblick auf die Realisierbarkeit in der Praxis. Dazu ist es notwendig, in der Praxis auftretende mögliche Störgrößen oder parasitäre Effekte im Vorfeld zu überprüfen. Sämtliche für den Betrieb und die Realisierung der Anlage charakteristische Größen müssen hier detailliert analysiert werden. Bei Bedarf können Korrekturen, z. B. der Geometrie, durchgeführt werden, um die Anlage für den praktischen Einsatz optimal anzupassen. Die ideale mathematische Lösung des vorherigen Schritts wird so in eine technisch realisierbare Anordnung überführt.

Sind Zwischenergebnisse nicht zufriedenstellend und erfüllen sie nicht die Anforderungen und Wünsche des Anwenders, so kann zu jeder Zeit und an jedem Punkt der im folgenden beschriebenen Auslegungskette der Prozeß unterbrochen werden. Mit veränderten Bedingungen wird dann bei einer früheren Auslegungsstufe der Prozeß wieder aufgenommen.

6.2 Klassifikation von Quersfelderwärmern

Für die konzeptionelle Auslegung von Quersfelderwärmern wird in diesem Kapitel eine Übersicht über die unterschiedlichen Quersfeldanordnungen gegeben. Sie können unterschieden werden nach "Langer", "Kurz" und "Variabler" Induktor, entsprechend der Gruppen 1, 2 und 3. Die Klassifizierung richtet sich dabei hauptsächlich nach der Lage des Induktors im Verhältnis zu den Bandkanten, wobei mit steigender Gruppennummer die Komplexität und damit die Anzahl der beeinflussenden Parameter der Anlagen wächst (Bild 6.2). Im folgenden wird eine kurze Beschreibung der drei Quersfeldanordnungen unter Berücksichtigung der Vor- und Nachteile mit Hinweisen für den Einsatz in der Praxis gegeben.

Gruppe 1: „Langer Induktor“

In dieser Gruppe sind die einfachen Quersfelderwärmer, die aus einem oder mehreren identischen Induktorpaaren bestehen, zusammengefaßt. Sie alle zeichnen sich dadurch aus, daß die Induktionsspule so weit über die Bandbreite hinausragt, daß die Feldbeeinflussung im Kantenbereich des

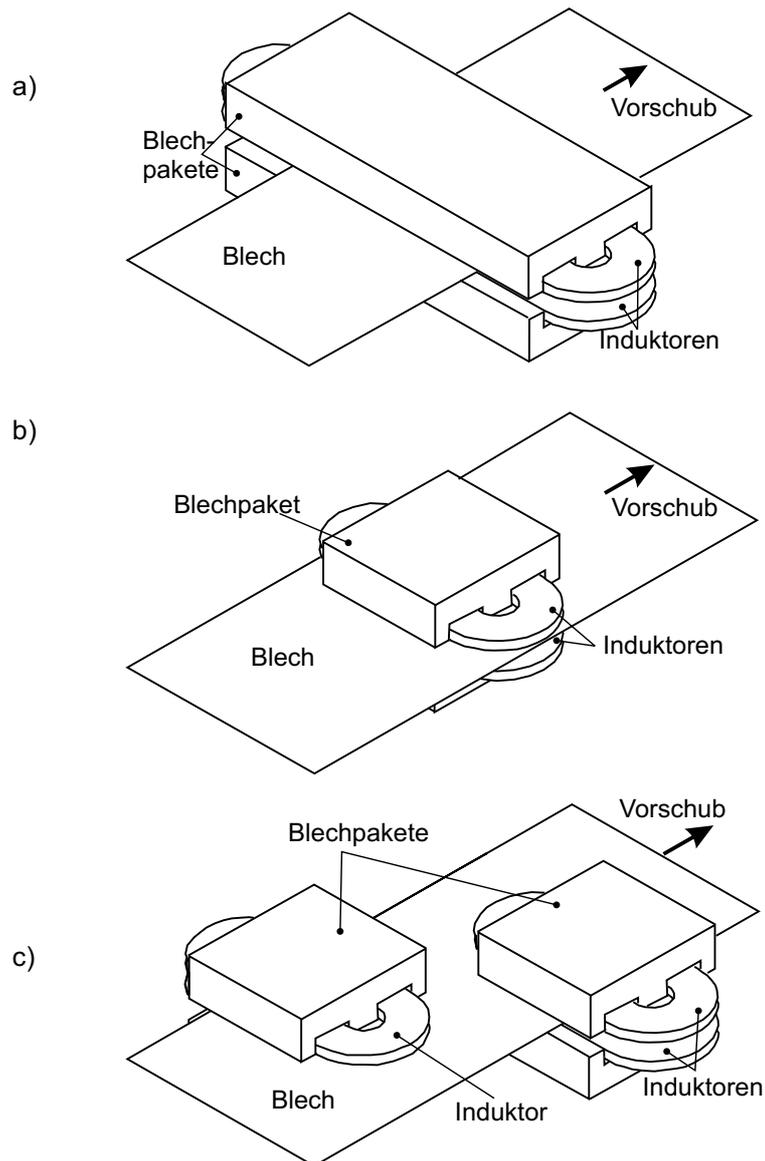


Abbildung 6.2: Klassifizierung verschiedener Quersfelderwärmer. a) Gruppe 1: „Langer Induktor“, b) Gruppe 2: „Kurzer Induktor“, c) Gruppe 3: „Variabler Induktor“.

Blechs durch die Spulenköpfe vernachlässigt werden kann (Bild 6.2 a).

Für alle Beispielanlagen dieser Gruppe gilt, daß aufgrund der überstehenden Induktoren von einer mehr oder weniger ausgeprägten Kantenüberhitzung im Blech ausgegangen werden muß. Dieser Effekt gilt bei ausreichend langen Spulen für einen weiten Bereich von Blechbreiten.

Aufgrund ihres einfachen Aufbaus und der begrenzten Zahl an veränderbaren Parametern handelt es sich hierbei um ein sehr robustes Konzept, das für Störgrößen von außen nicht anfällig ist. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, flexible Bandbreiten verwenden zu können. Eine präzise und aufwendige seitliche Bandführung ist aufgrund der weit überstehenden Induktoren nicht notwendig. Nachteilig ist, daß die Gestaltung des Temperaturprofils begrenzt ist. Eine Optimierung des Temperaturprofils ist nur in engen Grenzen möglich. Es wird sich immer eine Kantenüberhitzung

einstellen, die nur in ihrer Ausprägung beeinflusst werden kann.

Ein möglicher Anwendungsbereich für derartige Querfelderwärmer ist die Vorerwärmung von Material, das anschließend in einem konventionellen Ofen auf Endtemperatur gebracht wird. Die Erwärmungskonfiguration eignet sich jedoch auch für die Zwischenerwärmung von Blechen nach dem Gießen und vor dem Walzen. Die Kantenüberhitzung ist in diesem Fall von Vorteil, um den Temperaturabfall an den Kanten nach dem Gießen auszugleichen und einen sicheren Walzprozeß zu gewährleisten [8].

Gruppe 2: „Kurzer Induktor“

Werden ebenfalls die Spulenköpfe zur Gestaltung der Temperaturverteilung im Blech eingesetzt, handelt es sich um eine Querfeldanordnung der zweiten Gruppe. Charakteristisch für die Anlagen dieser Gruppe ist, daß sie aus einer oder mehreren gleichen Induktorpaaren bestehen, deren Abmessungen in der Größenordnung der Blechbreite liegen (Bild 6.2 b). Auf diese Weise kann die Kantentemperatur beliebig über die Form und Lage der Spulenköpfe eingestellt werden. Die Geometrie der Spulenköpfe kann von eckig über rund zu mäanderförmig ausgeprägt sein. Für die Zugehörigkeit zu Gruppe 2 ist jedoch wichtig, daß die Erwärmer symmetrisch zur Blechmittellachse sind.

Es ist möglich, nahezu homogene Temperaturprofile über der Blechbreite, aber auch Kantenüberhitzung und Kantenunterkühlung einzustellen. Das mit einer Spulenanordnung der Gruppe 2 erzielte Temperaturprofil ist jedoch nur für eine bestimmte Blechbreite gültig, da die Lage der Spulenköpfe zu den Blechkanten die Temperatur maßgeblich bestimmt.

Diese Art der Querfelderwärmer bietet ein sehr hohes Maß an Flexibilität bezüglich der Temperaturgestaltung und ist dabei immer noch relativ robust. Aufgrund der exakten Anpassung an die Bandbreite kann ein sehr hoher Wirkungsgrad für Erwärmer dieser Gruppe erreicht werden. Es treten keine zusätzlichen Verluste im Induktor durch einen Überstand der Induktoren auf. Die Bandführung im Induktor muß jedoch sehr präzise gestaltet sein, damit reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden können. Für variable Bandbreiten ist dieser Induktortyp nur bedingt einsetzbar. Bei größeren Bandbreitenänderungen ist es notwendig, für jede benötigte Bandbreite ein neues Spulenpaar anzupassen. Da die Ausführung jedoch relativ einfach ist und aus keinen komplizierten oder sensiblen Elementen besteht, kann sich die Herstellung eines Induktorsatzes zur Abdeckung eines Bandbreitenbereiches wirtschaftlich rechnen.

Die Erwärmer dieser Gruppe können überall dort eingesetzt werden, wo eine präzise und genau definierte Temperaturverteilung von Bedeutung ist. Aufgrund des erreichbaren sehr gleichmäßigen Temperaturprofils einer solchen Anlage sind bevorzugte Anwendungsbereiche das Glühen von Blechmaterial sowie das Erwärmen zum Oberflächenveredeln, Lackieren oder Beschichten.

Die Anwendungsgebiete der zweiten Gruppe schließen die der Aggregate der Gruppe „Langer Induktor“ ein. Einziger Unterschied ist die Wirksamkeit für eine feste Bandbreite.

Gruppe 3: „Variabler Induktor“

Alle Querfeldanordnungen, die aus Induktorpaaren komplizierterer geometrischer Form bestehen oder eine Kombination von unterschiedlichen Induktoren der ersten beiden beschriebenen Gruppen darstellen, sind in der dritten Gruppe zusammengefaßt. Die Anlagen können auch bewegliche Spulen beinhalten oder z. B. über spezielle Elemente zur partiellen Flußführung verfügen.

Ziel aller dieser in Gruppe 3 zusammengefaßten Ansätze ist, nahezu beliebige Temperaturprofile für variable Bandbreiten einstellen zu können. Als Vertreter dieser Gruppe ist in Bild 6.2 c eine Konfiguration dargestellt, bei der zwei einfache Induktoren der zweiten Gruppe nacheinander angeordnet sind. Durch die Möglichkeit, die Induktorpaare auch an unterschiedliche Blechbreiten durch Verschieben anzupassen, sollen für einen bestimmten Blechbreitenbereich ähnliche Temperaturprofil erreicht werden.

Die Gestaltungsmöglichkeiten für breitenadaptierbare Anordnungen sind nahezu unbegrenzt. Jedoch können die Konfigurationen auch beliebig kompliziert gestaltet werden, ohne daß der Aufwand den Nutzen rechtfertigt. Beginnend mit der einfachsten Anordnung eines Konzeptes kann die Optimierung hier genutzt werden, Grenzen aufzuzeigen. Schrittweise kann dann die Konfiguration durch zusätzliche Elemente erweitert werden, bis die Optimierung zu einem zufriedenstellenden Ergebnis führt.

Querfelderwärmer dieser Gruppe können zwar in der Auslegungsphase sehr flexibel gestaltet werden, sind jedoch häufig aufgrund ihrer relativ komplizierten Anordnung schwer während des Betriebs auf veränderte Anforderungen anzupassen. Es ist zudem möglich, daß das System sensibel auf Veränderungen der Umgebungsbedingungen und Störgrößen reagiert und damit nicht mehr so robust ist. Dies muß in Betrieben mit einer rauen Atmosphäre, die durch die Anwesenheit von Zunder oder Wasser bestimmt wird, berücksichtigt werden.

6.3 Optimierung integraler Größen

Die Optimierung der integralen Größen elektrischer Wirkungsgrad und Leistungsfaktor ist unabhängig von den oben definierten Querfelderwärmergruppen möglich, da diese integralen Größen vornehmlich durch die reguläre Zone bestimmt werden. Aus diesem Grund kann die folgende Optimierung auf der Basis von analytischen Untersuchungen und numerischen Berechnungen im zweidimensionalen Raum durchgeführt werden.

Die analytischen Abschätzungen dienen der Festlegung der Arbeitsbereiche für die einzelnen be-

einflussenden Parameter sowie der Bestimmung der integralen Größen, wie Wirkungsgrad, Leistungsfaktor, benötigte Leistungen und zu erwartende Verluste. Es werden Abhängigkeiten geometrischer und elektrischer Parameter hinsichtlich eines energieeffizienten Verfahrens formuliert.

Diese analytischen Abhängigkeiten werden anschließend in den numerischen 2D-Berechnungen verifiziert bzw. korrigiert. Dazu bietet es sich an, für repräsentative Parameterkonstellationen Parameterstudien durchzuführen. Die Analyse der Berechnungsergebnisse erlaubt die Bestimmung eines Arbeitspunktes, in dessen Umgebung die analytische Näherung zugelassen wird.

6.3.1 Vorbereitende analytische Untersuchungen

Basis aller Auslegungsaufgaben bilden im allgemeinen die Anforderungen der Industrie. Entsprechend der zu erfüllenden prozeßtechnischen Aufgabe sind die Rahmenbedingungen für das Design des Erwärmers vorgegeben. Zu Beginn der Auslegung sind daher sämtliche Vorgaben des Anwenders zusammenzustellen, um die Arbeitsbereiche der Designvariablen und aller notwendigen charakteristischen Größen für den Umrichter festlegen zu können. Zu den wichtigsten im Vorhinein festgelegten Größen und den durch den Prozeß definierten Anforderungen gehören

- das zu bearbeitende Blechmaterial mit seinen Materialeigenschaften,
- die möglichen Blechdicken d ,
- die zugehörigen Vorschubgeschwindigkeiten v ,
- das zu erreichende Temperaturniveau $\bar{\vartheta}$,
- das einzustellende Temperaturprofil $\vartheta(x)$ am Erwärmerende und
- die möglichen Blechbreiten b_s .

Für die Analyse des induktiven Erwärmungsprozesses müssen die physikalischen Eigenschaften des Blechmaterials bekannt sein. Zu jeder Blechdicke gehört üblicherweise eine bestimmte Vorschubgeschwindigkeit, damit der Umrichter möglichst mit Nennleistung betrieben wird. Die maximale Geschwindigkeit kann somit durch die Maximalleistung des Umrichters oder aber durch die Mechanik des Antriebs begrenzt sein. Das im Erwärmer zu erreichende Temperaturniveau und das Temperaturprofil über der Blechbreite sind durch das Prozeßziel festgelegt. Mögliche unterschiedliche Blechbreiten bestimmen ebenfalls die bereitzustellende Leistung.

Abhängig von den vorausgehenden Prozeßschritten und den Möglichkeiten bzw. Beschränkungen der Prozeßlinie ergeben sich weitere Rahmenbedingungen, die für die Auslegung der Anlage und die Definition der Prozeßfenster relevant sind. Die Kenntnis über

- das Temperaturprofil über der Blechbreite $\vartheta_E(x)$ am Eingang des Erwärmers,
- den maximalen Platzbedarf des Erwärmers und

- den minimalen lichten Spalt für den sicheren Transport des Bandes im Erwärmer, aus dem sich der minimale Koppelspalt h ableiten läßt,

ist dabei von Interesse. Das Temperaturprofil am Eingang des Erwärmers bestimmt maßgeblich die Verteilung der Temperatur des Blechs am Ausgang des Erwärmers. Aus dem zur Verfügung stehenden Platz kann die maximale Erwärmerlänge abgeleitet werden, die die Flächenleistungsdichte im Blech bestimmt. Der minimale Koppelspalt ist eine wichtige charakteristische Größe für die zu entwickelnde Quersfeldanlage und bildet die Basis für sämtliche weitere Auslegungsmaßnahmen.

Aus diesen Daten können der notwendige Arbeitsbereich des Generators und das Prozeßfenster der Polbreite sowie daraus die vom Umrichter bereitzustellenden Frequenzen bestimmt werden.

Bestimmung des Prozeßfensters der notwendigen Leistungen

Aus den oben aufgelisteten charakteristischen Daten kann die theoretisch für den betrachteten Erwärmungsfall notwendige, im Blech zu induzierende Leistung P_{BI} bestimmt werden, um den gewünschten Temperaturhub im Blech zu erreichen. Die minimal zu übertragende Leistung P_{theo} ergibt sich aus der Enthalpieerhöhung des Blechs zu

$$P_{\text{theo}} = c_p \cdot \rho \cdot \Delta\vartheta \cdot b_s \cdot d \cdot v, \quad (6.1)$$

wobei $\Delta\vartheta$ die Differenz aus Ausgangs- und Eingangstemperatur des Blechs darstellt. Die zu installierende Leistung soll ausreichend für die maximale Bandbreite sein, so daß für alle Abschätzungen in diesem Abschnitt für $b_s = b_{s,\text{max}}$ gilt.

Zusätzlich treten Wärmeverluste des Blechs auf, die sich aus Konvektions- und Strahlungsverlusten zusammensetzen und die durch die induzierte Leistung kompensiert werden müssen. Die auftretenden Verluste durch Konvektion können abgeschätzt werden durch

$$P_{\text{Konvektion}} = 2 \cdot A_{\text{BI}} \cdot \alpha \cdot (\bar{\vartheta}_{\text{BI}} - \vartheta_{\text{U}}), \quad (6.2)$$

mit der Oberfläche des Blechs A_{BI} innerhalb der Erwärmungsanlage, $\bar{\vartheta}_{\text{BI}}$ als der über der Erwärmerlänge gemittelten Blechtemperatur und ϑ_{U} als der Temperatur der umgebenden Luft. Der Wärmeübergangskoeffizient α kann über die Zusammenhänge für freie Konvektion oder bei größeren Vorschubgeschwindigkeiten für erzwungene Konvektion des Blechs bestimmt werden [68]. Die Strahlungsverluste, die sich durch Wärmestrahlung in die Umgebung ergeben, lassen sich analytisch abschätzen durch den Ansatz

$$P_{\text{Strahlung}} = 2 \cdot A_{\text{BI}} \cdot C_S \cdot \varepsilon \cdot \left[\left(\frac{\bar{T}_{\text{BI}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{U}}}{100} \right)^4 \right], \quad (6.3)$$

wobei \bar{T}_{BI} die über der Erwärmerlänge gemittelte absolute Blechtemperatur und T_{U} die absolute Umgebungstemperatur darstellen. Im allgemeinen überwiegen im unteren Temperaturbereich die

Konvektionsverluste, während zu höheren Temperaturen die Strahlungsverluste die thermischen Gesamtverluste bestimmen. Liegen die Wärmeverluste in der Größenordnung der theoretisch notwendigen Leistung P_{theo} , müssen sie in den folgenden Optimierungsschritten berücksichtigt werden, da sie nicht nur Einfluß auf das Temperaturniveau, sondern auch auf das Temperaturprofil nehmen. Die im Blech zu induzierende Leistung P_{Bl} errechnet sich aus der Summe der theoretisch notwendigen Leistung und den Wärmeverlusten zu

$$P_{\text{Bl}} = P_{\text{theo}} + P_{\text{Strahlung}} + P_{\text{Konvektion}} \quad (6.4)$$

Aus der Blechleistung P_{Bl} und der Oberfläche des Blechs A_{Bl} kann direkt die zu übertragende Leistung pro Fläche überprüft werden. Steigt die Flächenleistungsdichte im Mittel über 1 MW/m^2 bis $1,5 \text{ MW/m}^2$, so muß mit mechanischen Effekten wie Vibration und Lärm gerechnet werden. In diesem Fall ist es ratsam, im Vorfeld vor der Herstellung der Industrieanlage mögliche Phänomene numerisch in einer Simulation abzuschätzen oder einen Prototypen zu bauen, an dem experimentelle Untersuchungen durchgeführt werden können.

Aus dem Verhältnis der Nutzleistung P_{theo} und der induzierten Leistung P_{Bl} läßt sich der thermische Wirkungsgrad bestimmen zu

$$\eta_{\text{th}} = \frac{P_{\text{theo}}}{P_{\text{Bl}}} \quad (6.5)$$

Der Umrichter muß zusätzlich zur Blechleistung P_{Bl} die Stromwärmeverluste im Induktor P_{Ind} aufbringen. Diese bestimmen den elektrischen Wirkungsgrad η_{el} nach Gleichung (3.1).

Bestimmung der Prozeßfenster der Polbreite t und der Frequenz f

Um ein möglichst energieeffizientes Verfahren zu entwickeln, werden im folgenden sinnvolle Arbeitsbereiche für die den elektrischen Wirkungsgrad und den Leistungsfaktor beeinflussenden Parameter definiert. Der Koppelspalt h ist so klein wie möglich zu wählen und ergibt sich direkt aus den mechanischen Gegebenheiten, d. h. dem notwendigen lichten Spalt für die Bandführung, beim späteren Anwender. Die Festlegung des Koppelspaltes sollte sehr sorgfältig in enger Absprache mit dem Industriepartner geschehen, da das weitere Vorgehen der Auslegung auf diesem Wert basiert. Eine spätere Änderung des Koppelspaltes hat zur Folge, daß der Auslegungsprozeß an dieser Stelle wieder aufgenommen werden muß.

Entsprechend der allgemeinen Auslegungsgrundlagen sollte die Polbreite t mindestens doppelt so groß wie der Koppelspalt sein (Kapitel 3.2). Nach oben wird die Polbreite durch die maximale Anlagenlänge und die Anzahl der Induktoreinheiten begrenzt. Im Falle von vorhandenen Blechpaketen (BP) ist die maximale Polbreite einer Induktoreinheit auf die Hälfte der Anlagenlänge l , bzw. den für diese Einheit zur Verfügung stehenden Platz beschränkt. Dabei wird zunächst davon ausgegangen, daß die Leiterbreite a_i der Hälfte der Polbreite entspricht. Ohne Blechpakete steht der

Spule mehr Platz zur Verfügung, so daß die maximale Polbreite in diesem Fall $2l/3$ beträgt. Daraus ergibt sich bei konstantem Koppelspalt der Arbeitsbereich für die Polbreite unter der Annahme eines einzelnen Induktorpaares auf der Anlagenlänge l von

$$t_{\min} = 2h \quad \text{und} \quad t_{\max} = \begin{cases} l/2 & \text{mit BP} \\ 2l/3 & \text{ohne BP} \end{cases} \quad (6.6)$$

Die Wahl der Frequenz richtet sich zunächst nach dem primären Ziel, möglichst den maximalen elektrischen Wirkungsgrad der Anlage zu erreichen. Dazu bietet sich für die erste Abschätzung der analytisch ermittelte Zusammenhang aus Abschnitt 3.3 zwischen optimaler Frequenz, Materialdaten des Blechs und geometrischer Größen an. Der für die Produktpalette notwendige Frequenzbereich kann mit Hilfe der Gleichung (3.16) für die Extremfälle der Polbreite abgeschätzt werden. Der Koppelspalt ist bereits auf den minimalen Wert festgelegt worden, so daß dessen Abhängigkeit nicht berücksichtigt werden muß. Dieser Ansatz kann abhängig vom Variationsspektrum der Blechdicken und -materialien einen sehr weiten Frequenzbereich ergeben, der in der Praxis von einem Umrichter bereit gestellt werden muß. Aufgrund des schwach ausgeprägten Maximums des Wirkungsgradverlaufs ist es möglich, auch andere Frequenzen zu wählen, bei denen ebenfalls ein sehr hoher Wirkungsgrad erreicht wird. Sinnvollerweise sollte die Frequenz auf Werte gesetzt werden, die auch im Leistungsfaktor einen maximalen Wert ergibt. Dadurch können Kapazitäten des Schwingkreises zur Kompensation der Blindleistung eingespart werden und das Verfahren wird insgesamt energetisch und wirtschaftlich günstiger.

Umfangreiche Parameterstudien haben in der Vergangenheit gezeigt, daß zum Erreichen eines möglichst effizienten Verfahrens eine optimale Frequenz laut Gleichung (3.4) gewählt werden sollte (vgl. Abschnitt 3.2). In diesem Fall wird neben dem Erreichen eines sehr hohen elektrischen Wirkungsgrades auch der Leistungsfaktor berücksichtigt und die Frequenz in der Nähe seines Maximums gehalten. Die Anwendung dieser Berechnungsvorschrift liefert einen kleineren notwendigen Frequenzbereich als die rein analytische Betrachtung aus Abschnitt 3.3. Abhängig von Blechdicke und -material läßt sich für unterschiedliche Polbreiten die Frequenz f_{opt} bestimmen. Für jedes Material kann dann der Arbeitsbereich der Frequenz in Abhängigkeit der zu bearbeitenden Blechdicken und der Polbreiten abgeschätzt werden durch

$$f = f_{\text{opt}} \quad \text{mit} \quad \begin{cases} f_{\min} = f_{\text{opt}}|_{d_{\max}, t_{\max}} \\ f_{\max} = f_{\text{opt}}|_{d_{\min}, t_{\min}} \end{cases} \quad (6.7)$$

6.3.2 Zweidimensionale numerische Untersuchungen

Nach der analytischen Festlegung der Arbeitsbereiche der Designvariablen, die die integralen Größen Wirkungsgrad und Leistungsfaktor beeinflussen, erfolgt nun die Verifikation und gegebenenfalls Korrektur dieser Werte. Anhand der Analyse des Wirkungsgradverlaufs über der Frequenz und

des Vergleichs der oben genannten Frequenzen ist es möglich, für den jeweiligen Prozeß günstige Zusammenhänge zu finden, die in die automatische Optimierung der verteilten Größen eingehen. Dazu wird die numerische 2D-Simulation eingesetzt. Zur genaueren numerischen Analyse bieten sich die Programmpakete HIHTEC 2D oder das 2D-Modell von ANSYS an. Da sich Parameterstudien mit dem problemangepaßten Berechnungswerkzeug HIHTEC 2D mit geringem Aufwand komfortabel durchführen lassen, wurde es in dieser Arbeit ausschließlich eingesetzt. Vergleichsrechnungen, die exemplarisch mit ANSYS durchgeführt wurden, bestätigen die mit HIHTEC 2D erhaltenen Ergebnisse.

Für die Berechnungen ist es im allgemeinen ausreichend, eine Parameteruntersuchung für eine mittlere Blechdicke und eine mittlere elektrische Leitfähigkeit durchzuführen. Für die ausgewählte Blechdicke und das entsprechende Material erfolgen dann Parameterstudien für jeweils feste Polbreiten, bei denen abhängig von der Frequenz der elektrische Wirkungsgrad und der Leistungsfaktor berechnet werden. Bei zusätzlicher Variation der Polbreite in den analytisch bestimmten Grenzen ergeben sich zwei Kurvenscharen (Bild 6.3).

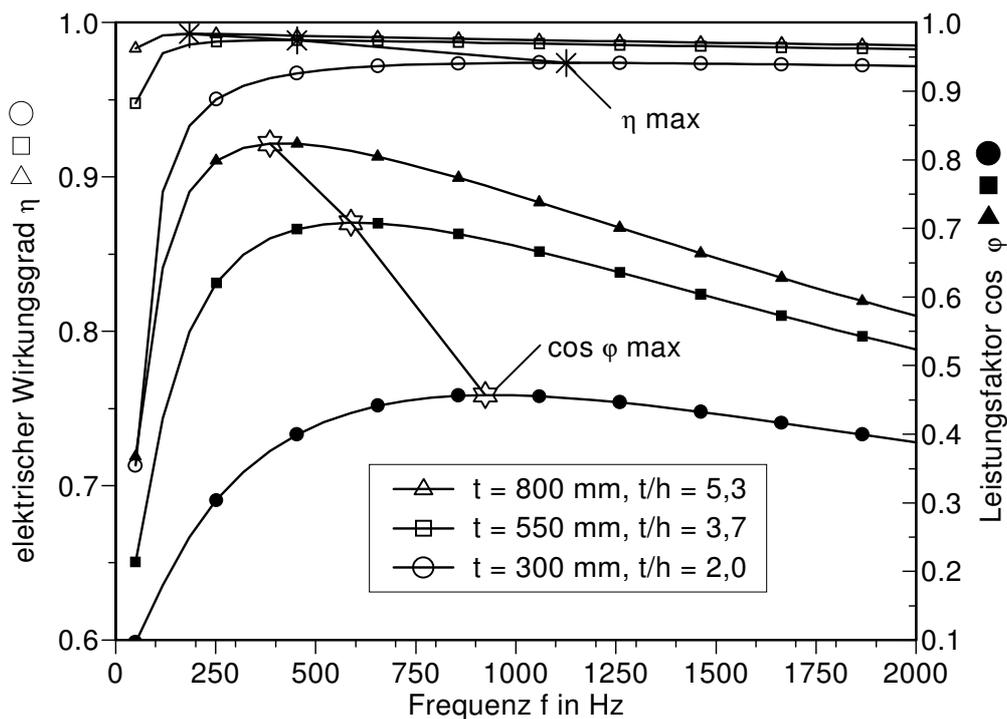


Abbildung 6.3: Elektrischer Wirkungsgrad und Leistungsfaktor für verschiedene Polbreiten t in Abhängigkeit von der Frequenz mit d und $\kappa_{BI}=\text{konst}$

Aufgrund der besseren Ankopplung des Blechs wird mit wachsender Polbreite t eine signifikante Zunahme des Wirkungsgrades und des Leistungsfaktors erzielt. Es ist zudem deutlich die Verschiebung der optimalen Frequenz zu niedrigeren Werten bei zunehmender Polbreite zu erkennen. Während der elektrische Wirkungsgrad in einem weiten Frequenzbereich maximale Werte zeigt, ist das jeweilige Maximum beim Leistungsfaktor stärker ausgeprägt.

Im weiteren Vorgehen wird nun der zuvor analytisch aufgestellte Zusammenhang zwischen Frequenz und Polbreite, der für beide charakteristischen Größen Wirkungsgrad und Leistungsfaktor hohe Werte liefern soll, überprüft und gegebenenfalls angepaßt. In Bild 6.3 sind die Maximalwerte für die einzelnen Polbreiten abhängig von den dazu notwendigen Frequenzen in beiden Kurvenscharen eingetragen. Hier ist deutlich zu erkennen, daß der analytische Zusammenhang nicht exakt im Maximum beider integraler Größen η_{el} und $\cos \varphi$ liegen kann, sondern einen Kompromiß darstellen muß. Ziel dieses Auslegungsschrittes ist es, einen analytischen Zusammenhang zwischen den Designvariablen Polbreite und Frequenz zu finden, der den Anforderungen des Anwenders genügt.

Ein empfehlenswertes Vorgehen ist es, im mittleren Polbreitenbereich einen Arbeitspunkt anhand der zweidimensionalen Berechnungen festzulegen, in dessen Umgebung die analytische Näherung aus Gleichung (3.4) zugelassen wird. Dieser Arbeitspunkt wird als Referenzwert in den neu formulierten analytischen Zusammenhang

$$f_{opt} = f_{ref} \cdot \frac{t_{ref}}{t}, \quad (6.8)$$

eingesetzt. Diese Gleichung kann direkt in die angeschlossene automatische Optimierung integriert werden. Für jede Polbreite t ergibt sich die entsprechende optimale Frequenz f_{opt} auf der Basis des Referenzpaares t_{ref} und f_{ref} .

Mit der Wahl der optimalen Frequenz ist eine erste Auslegung bezüglich eines elektrisch hocheffizienten Erwärmungsprozesses durchgeführt worden. Die Temperaturverteilung blieb in diesem Schritt noch unberücksichtigt. In der angeschlossenen automatischen Optimierung der verteilten Größen, die mit Hilfe von mathematischen Algorithmen durchgeführt wird, sollte diese Abhängigkeit der Frequenz berücksichtigt werden. Mit der Veränderung der Polbreite als Designvariablen findet demnach immer eine Anpassung der Frequenz statt, um ein elektrisch möglichst effizientes Aggregat zu entwerfen. Allerdings kann diese Abhängigkeit aufgelöst werden, wenn bestimmte Temperaturprofile nur durch Variation der Frequenz außerhalb dieses Bereiches erreicht werden können und somit ein Kompromiß zwischen dem elektrischen Wirkungsgrad und der gewünschten Temperaturverteilung gefunden werden muß.

6.4 Optimierung verteilter Größen

Das Hauptziel der Auslegung von Quersfelderwärmern ist es, eine vom Prozeß vorgegebene Temperaturverteilung zu erreichen. Dieses dreidimensionale Problem ist nicht mehr manuell zu lösen. Gerade der Einfluß der geometrischen Größen ist sehr komplex, so daß in diesem Schritt mathematische Methoden zur Unterstützung verwendet werden.

Bevor eine Auswahl an Optimierungsbeispielen erläutert wird, sind für die Optimierung zunächst

die technologischen Anforderungen als mathematische Zielfunktion zu formulieren. Verschiedene Zielfunktionen werden unabhängig von der Wahl des Quersfelderwärmerkonzeptes erläutert. Die für die Durchführung der Optimierung wichtige Definition der Designvariablen richtet sich dann nach den in Abschnitt 6.2 beschriebenen Quersfelderwärmergruppen. Stellvertretend für jede Klasse werden Beispieloptimierungen vorgestellt.

6.4.1 Zielfunktion

Die Anforderungen an die Temperaturverteilung im Blech von Seiten des späteren Anwenders können sehr unterschiedlich sein, jedoch sind sie alle durch zwei charakteristische Merkmale zu beschreiben. Das ist zum einen das zu erreichende Temperaturniveau und zum anderen das geforderte Temperaturprofil über der Blechbreite. Die festgelegte Endtemperatur $\bar{\vartheta}$ ist mit einer vom Anwender bestimmten Genauigkeit zu erreichen. Weiterhin ist die Position in Vorschubrichtung des kontinuierlichen Erwärmungsprozesses zu bestimmen, an der das geforderte Temperaturprofil $\vartheta(x)$ erreicht werden soll (Bild 6.4). Der Anwender bestimmt zudem die maximal erlaubte Abweichung vom Temperaturprofil, die sich aus den Prozeßbedingungen ergibt. Zusätzliche Bedingung kann sein, daß aus metallurgischen oder sicherheitstechnischen Gründen eine bestimmte Maximaltemperatur innerhalb des Erwärmers nicht überschritten werden darf. Dies kann ebenfalls durch die Zielfunktion berücksichtigt werden. Hierzu eignen sich die sogenannten Straffunktionen (siehe Abschnitt 5.2.1), die bei Überschreiten der Maximaltemperatur den bestehenden Zielfunktionswert mit einer Strafe beaufschlagen, so daß der Optimierungsalgorithmus das Minimum nicht in diesem gefährdeten Bereich findet.

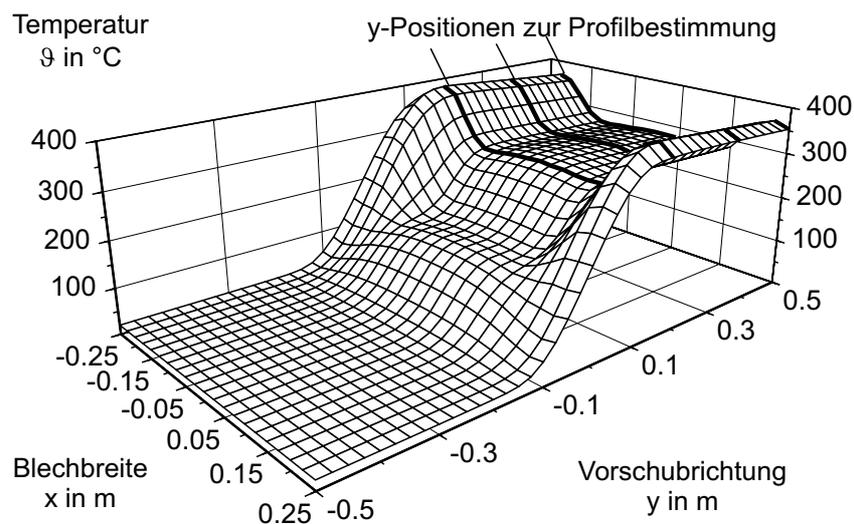


Abbildung 6.4: Temperaturverteilung im Blech über der gesamten Erwärmerlänge mit Temperaturprofil an verschiedenen y -Positionen

Im allgemeinen sind die Wärmeverluste bei der numerischen Berechnung im dreidimensionalen

Raum nicht zu vernachlässigen. Sie beeinflussen direkt die Temperaturverteilung und wirken sich bei wechselnden Temperaturniveaus unterschiedlich aus. Aus diesem Grund müssen in der 3D-Simulation die Leistung an das zu erreichende Temperaturniveau angepasst und zusätzlich auch die Wärmeverluste berücksichtigt werden. Nur in seltenen Fällen, wie z. B. bei niedrigem Temperaturniveau, geringen Vorschubgeschwindigkeiten oder niedrigem Emissionsgrad, können die Verluste vernachlässigt werden.

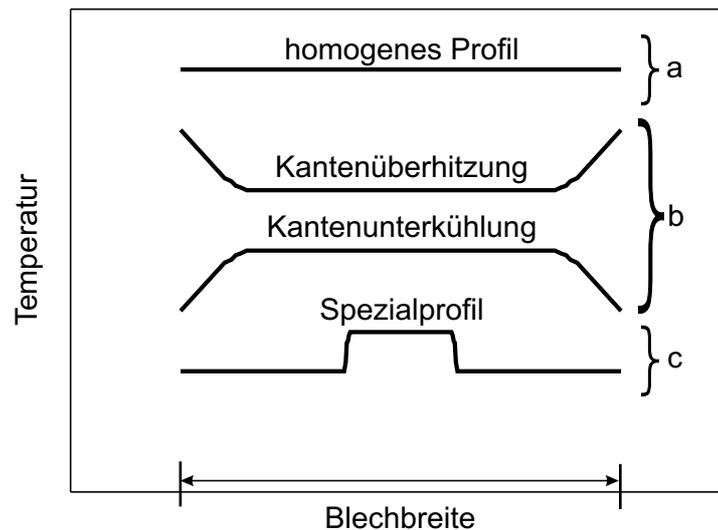


Abbildung 6.5: Beispiele von Anforderungen an das Temperaturprofil

Da die Zielvorstellungen der Anwender so verschiedenartig sind, ist keine allgemeingültige Definition der Zielfunktion möglich. Im folgenden werden daher eine Vielzahl vorstellbarer Ziele aus Übersichtsgründen in drei Kategorien a, b und c eingeteilt (Bild 6.5). Im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Zielfunktionen werden im folgenden erläutert und deren Effektivität anhand der in der Optimierung erhaltenen Ergebnisse diskutiert. In allen Fällen wird das zu erreichende Temperaturprofil $\vartheta(x)$ auf eine charakteristische Größe, wie z. B. die maximale Temperaturabweichung zur Mittentemperatur, reduziert (vgl. Abschnitt 5.1.2).

a) Homogene Temperatur

In vielen Bereichen der Erwärmung von dünnen Bändern und Blechen ist das Ziel die homogene Erwärmung des Materials. Der Anwender fordert dabei oft sehr geringe Abweichungen über der Breite, die z. B. unterhalb von $\pm 2\%$ bis $\pm 5\%$ der Endtemperatur bzw. des Temperaturhubs liegen sollen. Um dieses Ziel zu erreichen, werden in dieser Arbeit drei unterschiedliche Ansätze für die Definition der Zielfunktion gewählt. In allen Fällen wird von der Temperaturverteilung am Ende der Erwärmungsstrecke über der Blechbreite ausgegangen (Bild 6.6).

Im ersten Fall wird der Betrag der maximalen Abweichung von der Temperatur in der Blechmitte

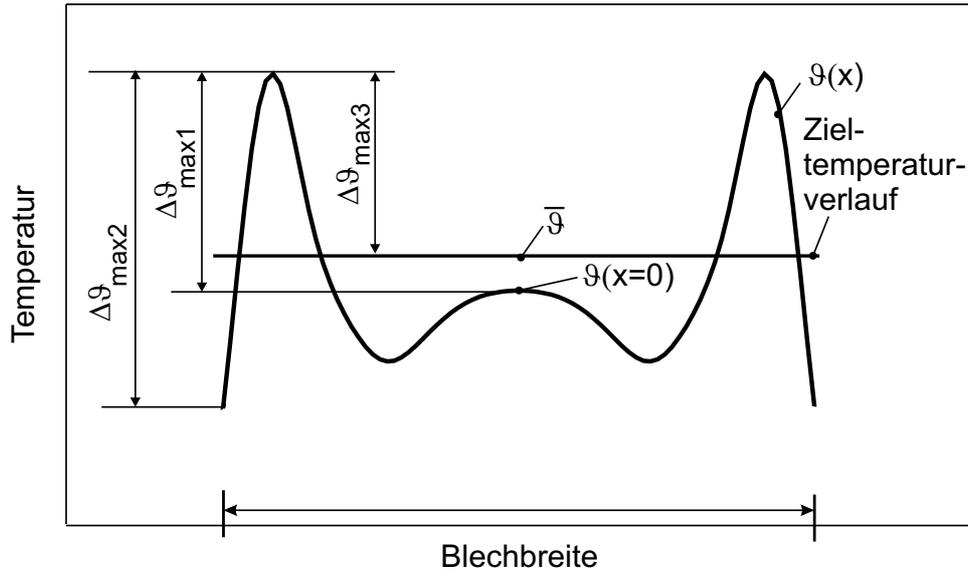


Abbildung 6.6: Temperaturprofil am Ende der Erwärmerstrecke zur Definition der Zielfunktion für eine homogene Verteilung

$\Delta\vartheta_{\max1}$ bezogen auf die Temperatur in der Blechmitte $\vartheta(x=0)$ als zu minimierende Zielfunktion f_{z1}

$$f_{z1} = \frac{\Delta\vartheta_{\max1}}{\vartheta(x=0)} \cdot 100\% \quad (6.9)$$

definiert. Die Zielfunktion f_{z2} setzt sich zusammen aus der Differenz der maximalen und der minimalen Temperatur $\Delta\vartheta_{\max2}$ bezogen auf die Temperatur in der Blechmitte $\vartheta(x=0)$

$$f_{z2} = \frac{\Delta\vartheta_{\max2}}{\vartheta(x=0)} \cdot 100\% \quad (6.10)$$

und wird im folgenden als Temperaturspanne oder Temperaturschwankung bezeichnet. Einen weiteren Ansatz, nämlich die Standardabweichung, stellt die Zielfunktion f_{z3} dar. Das Integral der realen Temperaturverteilung wird aufgrund der numerischen Berechnung durch die Summe der n diskreten Werte der Temperatur über der Blechbreite angenähert

$$f_{z3} = \sqrt{\frac{1}{b_s} \int_{-\frac{b_s}{2}}^{\frac{b_s}{2}} (\vartheta(x) - \bar{\vartheta})^2 dx} \quad \text{bzw.} \quad f_{z3} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\vartheta_i(x) - \bar{\vartheta})^2} \quad (6.11)$$

Als weitere Ansätze wurden ebenfalls Funktionen getestet, die in ihrer Art den beiden Funktionen f_{z1} und f_{z2} entsprechen, sich jedoch nicht auf die Blechmittentemperatur, sondern auf die über der Breite gemittelte Temperatur $\bar{\vartheta}$ beziehen. Sie zeigen im Verhalten keine signifikanten Unterschiede zu f_{z1} und f_{z2} .

Um die Wirksamkeit der drei oben definierten Zielfunktionen zu überprüfen, wurde eine 1D-Optimierung mit dem Verfahren nach *Brent* durchgeführt. Als Parameter wurde die Länge des

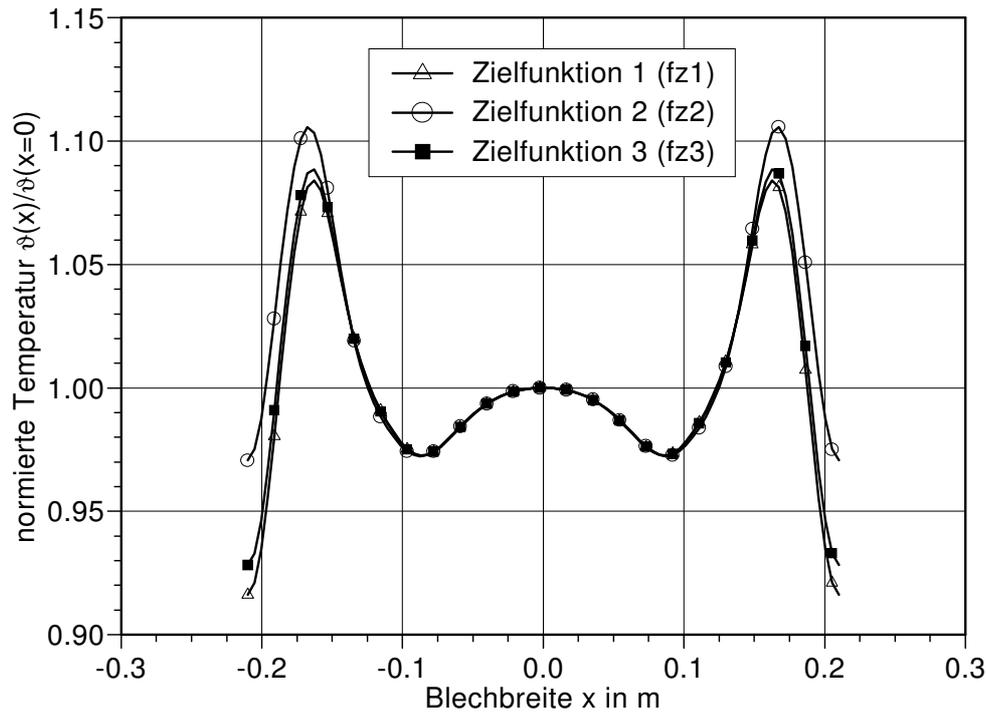


Abbildung 6.7: Temperaturprofile optimiert mit den Zielfunktionen f_{z1} bis f_{z3}

Induktors b_i für eine Beispielanlage aus der Gruppe 2, „Kurzer Induktor“, gewählt (siehe Bild 6.14, S. 71).

Die drei Zielfunktionen führen zu Endwerten des Parameters b_i , die sich nur geringfügig unterscheiden. Alle Zielfunktionen eignen sich daher für die Optimierung, jedoch zeigen sich im optimierten Temperaturverlauf geringe Unterschiede (Bild 6.7). Das mit f_{z2} erreichte Temperaturprofil bietet einen praktischen Vorteil, da die bei den anderen beiden Temperaturprofilen ausgeprägte Kantenunterkühlung hier kaum auftritt. Dafür sind die Temperaturüberhöhungen etwas stärker ausgeprägt. Insgesamt ergibt sich damit jedoch eine bessere Homogenität und die Sicherheit, daß das Blech an den Kanten nicht unterkühlt ist. Dieser positive Effekt soll ausgenutzt werden, so daß in allen weiteren automatischen Optimierungen zum Erreichen einer homogenen Temperatur die Zielfunktion f_{z2} zum Einsatz kommt.

b) Kantenüberhitzung

Bevor die Definition der Zielfunktionen für diese Gruppe durchgeführt wird, ist zunächst eine Festlegung der charakteristischen Größen, die das Profil beschreiben, zweckmäßig. Der industrielle Anwender fordert im allgemeinen, daß innerhalb eines festgelegten Kantenbereiches eine Überhitzung um einen bestimmten Temperaturerhöhungsfaktor \ddot{u} gegenüber der Temperatur in der Mitte des Bandes erreicht werden soll. Das zu erzielende Temperaturprofil wird mit Hilfe einfacher linearer Abhängigkeiten beschrieben (Bild 6.8). Von den Kanten sinkt die Temperatur von der Kan-

tentemperatur $\ddot{u} \cdot \vartheta(x=0)$ linear auf der Breite e , um dann konstant bis zur Blechmitte auf dem Wert $\vartheta(x=0)$ zu bleiben. Der weitere Verlauf der Temperatur ist symmetrisch.

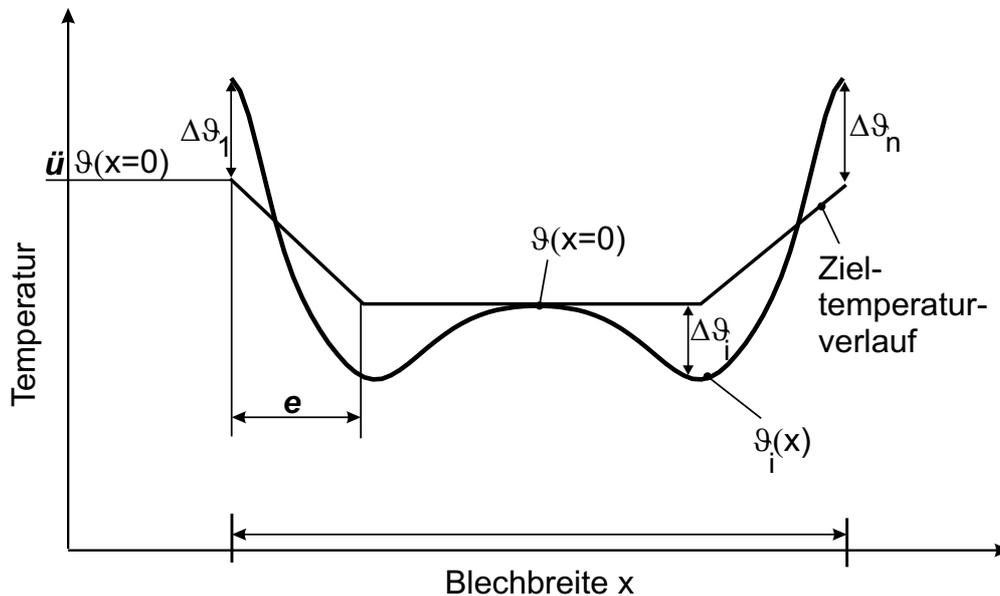


Abbildung 6.8: Temperaturprofil am Ende der Erwärmerstrecke zur Definition der Zielfunktion für eine Temperaturverteilung mit Kantenüberhitzung

Als Ansatz für die Definition der Zielfunktionen dieser Gruppe dient jeweils die betragliche Differenz an n Punkten über der Blechbreite zwischen Ist-Temperatur $\vartheta_i(x)$ und der Solltemperatur an der Stelle i (vgl. Gleichung 5.6). Die Summe dieser Werte liefert die Zielfunktion

$$f_{z4} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\vartheta_i(x) - \vartheta_{\text{soll},i}(x)|, \quad (6.12)$$

mit der bereits gute Ergebnisse erzielt werden können. In diesem Fall kann jedoch das Temperaturniveau Einfluß auf die Größe des Zielfunktionswertes nehmen, so daß in manchen Fällen größere Abweichungen zwischen Ist- und Solltemperatur stark ins Gewicht fallen und das Ergebnis verfälschen. Aus diesem Grund wird bei der Zielfunktion f_{z5} eine Verbesserung durch den Bezug der Temperaturdifferenz auf die Blechmittentemperatur erreicht.

$$f_{z5} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\vartheta_i(x) - \vartheta_{\text{soll},i}(x)|}{\vartheta(x=0)} \cdot 100\% \quad (6.13)$$

Die beiden vorgestellten Zielfunktionen wurden in verschiedenen Optimierungsläufen verwendet. Sie führten in den Beispielfällen zu zufriedenstellenden Ergebnissen, die in Abschnitt 6.4.2 präsentiert werden. Dennoch können mit diesen Zielfunktionsansätzen nicht alle Optimierungsaufgaben zur Kantenüberhitzung und -unterkühlung gelöst werden. Eine andere Möglichkeit zur Zielfunktionsgestaltung ist die Verwendung realitätsnäherer Zieltemperaturverläufe. Dennoch kann selbst mit den einfachen, hier vorgestellten Ansätzen das große Potential der automatischen Optimierung für dieses Problemfeld aufgezeigt werden.

c) Spezielle Temperaturprofile

In die Gruppe der speziellen Temperaturprofile fallen alle Temperaturverteilungen, die nicht den ersten beiden Gruppen zuzuordnen sind. Wie in Bild 6.5 dargestellt, kann es sich dabei z. B. um eine lokale Erwärmung des Bandes zum anschließenden Umformen handeln. Weiterhin sind Zielfunktionen denkbar, die beispielsweise den Temperaturgradienten über der Blechbreite während der Aufheizvorganges minimieren oder aufgrund von thermischen Spannungen verursachte Deformationen so klein wie möglich halten sollen. Jede derartige Anforderung an den Prozeß kann mit Hilfe der entsprechenden Definition der Zielfunktion erfüllt werden, wenn die dafür benötigten Informationen über den Erwärmungsprozeß, d. h. Leistungsdichte- und Temperaturverteilung innerhalb des Erwärmers, bekannt sind und durch das numerische Programm bestimmt werden können. HIHTEC 3D bietet in dieser Hinsicht sämtliche Daten des Quersfelderwärmungsprozesses an. Allerdings muß berücksichtigt werden, daß mit der Komplexität der Zielvorstellungen auch der Aufwand zur Definition der Zielfunktion und damit die Fehlerwahrscheinlichkeit und die Rechenzeit ansteigen.

Im Rahmen dieser Arbeit sind keine Zielfunktionen der Gruppe c implementiert worden. Die vorstellbaren Ansätze entsprechen jedoch denen der zuvor erläuterten Zielfunktionsdefinitionen.

6.4.2 Variablendefinition, Restriktionen und Optimierungsbeispiele

Die Definition der Variablen richtet sich sehr stark nach dem gewählten Quersfeldkonzept, das einer Gruppe der Klassifikation aus Abschnitt 6.2 zuzuordnen ist. Aus diesem Grund werden die potentiellen Variablen mit ihren Restriktionen abhängig von den drei Klassen von Quersfelderwärmern beschrieben. Abgeschlossen werden diese Abschnitte jeweils mit Optimierungsbeispielen, die das Potential dieser Auslegungsmethode aufzeigen. Zur Anwendung kommt das spezielle 3D-Modell HIHTEC, das in Verbindung mit den mathematischen Algorithmen zu einer n D-Optimierung in Abhängigkeit von n Designvariablen führt.

Um zunächst den Berechnungsaufwand zu reduzieren, bietet sich an, die Induktoren als symmetrische Schleifen zu diskretisieren (vgl. Bild 6.2, S. 49). Zuleitungen sollten zunächst ohne Berücksichtigung bleiben. Ihr Einfluß wird später nach der Optimierung in der Feinanalyse untersucht. Damit kann das prinzipielle Potential dieser Anordnung, das definierte Ziel zu erreichen, mit vermindertem Zeitaufwand bestimmt werden. Für die Simulationen sollten zusätzlich sämtliche Symmetrien der Anordnung ausgenutzt werden und wenn möglich nur ein Achtel oder ein Viertel der Anlage berechnet werden. Die Genauigkeit der Berechnungen leidet darunter nicht, jedoch kann dadurch die Rechenzeit drastisch gesenkt werden.

Die Form der Blechpakete ist für alle numerischen Berechnungen und Beispielloptimierungen, die in dieser Arbeit verwendet werden, identisch. Sie alle sind nur im regulären Bereich der Spu-

le vorhanden und verfügen über Pole. Die Leiterbahnen der Breite a_i des Induktors sind in die Blechpakete eingebettet. Die Länge der Blechpakete wird daher direkt durch die Länge des regulären Bereiches der Spulen festgelegt. Die Spulenköpfe ragen aus den Blechpaketen heraus. Dieses wirksame Blechpaket läßt sich mit vertretbarem Aufwand aufgrund der einfachen geometrischen Form der einzelnen Bleche in der Praxis gut realisieren.

Als Basismaterial für das Blech wird für sämtliche exemplarisch durchgeführten Optimierungen Messing verwendet, dessen physikalischen Eigenschaften in Tabelle 6.1 zusammengefaßt sind. Der spätere Einsatz von unterschiedlichen Materialien im optimierten Erwärmer ist durch die Anpassung der Frequenz möglich (siehe Abschnitt 6.5.2).

Tabelle 6.1: Materialdaten von Messing (CuZn37) bei $\vartheta = 150^\circ\text{C}$ nach [69]

elektrische Leitfähigkeit κ	$13,5 \cdot 10^6 \text{ 1}/\Omega\cdot\text{m}$
spezifische Wärmekapazität c_p	$404 \text{ Ws}/\text{kg}\cdot\text{K}$
Wärmeleitfähigkeit λ	$142 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$
Dichte ρ	$8440 \text{ kg}/\text{m}^3$
Emissionsgrad ϵ	0,03
Längenausdehnungskoeffizient α	$21 \cdot 10^{-6} \text{ 1}/\text{K}$

Für alle Quersfelderwärmer-Gruppen, die im folgenden analysiert werden, können Basisgrößen einer konkreten technischen Industrieanordnung definiert werden, so daß ein Vergleich zwischen den einzelnen Systemen direkt möglich ist (Tabelle 6.2). Zu den fixen Daten gehört neben dem Koppelspalt, der schon als Basis in der Optimierung der integralen Größen festgelegt wurde, die Blechbreite. Bei Systemen, die auch eine variable Bandbreite zulassen sollen, wird nach dem ersten Schritt der Auslegung für die hier festgelegte Bandbreite eine weitere Breite überprüft. Die Blechdicke wird ebenfalls zunächst festgelegt, da deren Änderung durch die Anpassung der Frequenz einfach möglich ist. Mit der Blechdicke ist auch die entsprechende Vorschubgeschwindigkeit bestimmt.

Tabelle 6.2: Geometrische und prozeßtechnische Daten der Basisanordnung

Koppelspalt h	40 mm
Blechbreite b_s	420 mm
Blechdicke d	0,8 mm
Vorschubgeschwindigkeit v	10 m/min

6.4.2.1 Gruppe 1 „Langer Induktor“

Aufgrund der geometrischen Anordnung ist die Anzahl der unabhängigen Parameter dieser Konzeptgruppe von sich aus stark reduziert. Da die Spulenköpfe weit über die Blechbreite hinausragen, kommen sie als Optimierungsparameter nicht in Betracht.

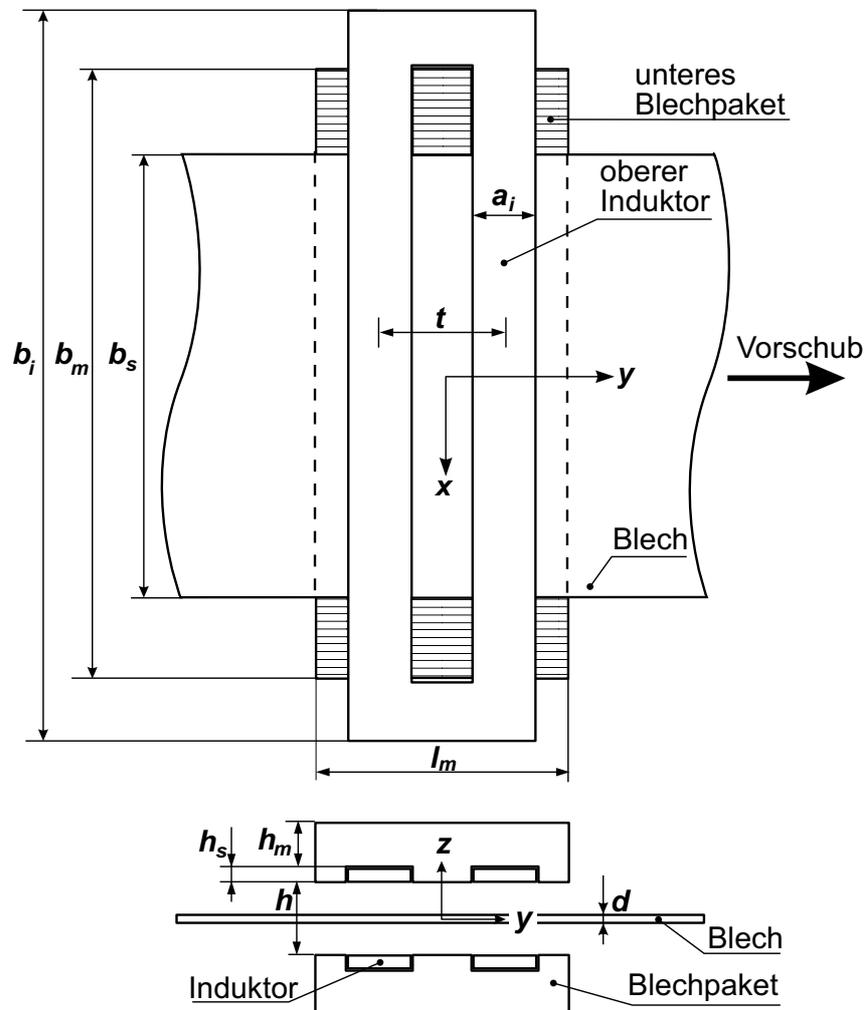


Abbildung 6.9: Geometrie einer Anordnung der Gruppe 1 „Langer Induktor“ zur Variablendefinition (oberes Blechpaket nicht dargestellt)

Potentielle geometrische Designvariablen sind die Polbreite t und die Leiterbreite a_i im regulären Spulenbereich (Bild 6.9). Die Überprüfung ihrer Wirksamkeit als Designvariablen wird mittels einer Parameterstudie durchgeführt.

Variablenprüfung für die Gruppe 1

In Bild 6.10 ist die normierte Temperaturverteilung über der Blechbreite am Erwärmerausgang in Abhängigkeit von verschiedenen Polbreiten dargestellt. Für jede Polbreite wurde die entsprechende für den elektrischen Wirkungsgrad optimale Frequenz f_{opt} verwendet. Zunächst ist deutlich die

für dieses Querfeldkonzept charakteristische Kantenüberhitzung zu erkennen. Mit steigender Polbreite wächst diese Kantenüberhitzung an und der lokale Temperaturabfall zwischen regulärem Bereich und Kantenbereich nimmt ab. Die parametrische Untersuchung des Einflusses der Leiterbreite zeigt ebenfalls eine Abhängigkeit des Temperaturprofils, die jedoch weniger stark ausgeprägt ist.

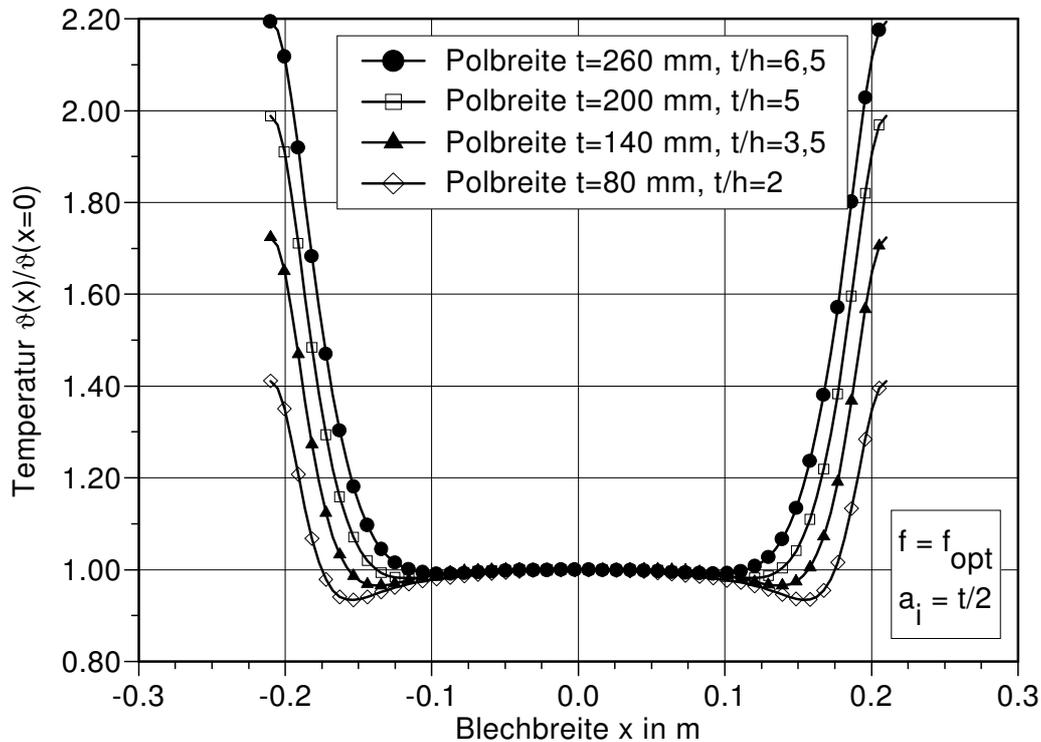


Abbildung 6.10: Normierte Temperaturverteilung über der Blechbreite am Erwärmerausgang für verschiedene Polbreiten t bei optimaler Frequenz f_{opt}

Wie schon im Abschnitt 6.3 angedeutet, kann auf die interne Anpassung der Frequenz an die Polbreite verzichtet werden, wenn die Gestaltung der Temperaturverteilung vorrangigen Charakter hat. Der elektrische Wirkungsgrad wird dann nicht mehr automatisch im Optimum gehalten, sondern stellt sich abhängig von der verwendeten Frequenz und den übrigen in der Optimierung frei wählbaren geometrischen Größen ein. Das bedeutet, daß die Frequenz in einem solchen Fall als weitere Designvariable genutzt werden kann. Die Wirksamkeit der Frequenzvariation hinsichtlich des Temperaturprofils für die hier betrachtete Querfelderwärmergruppe zeigt Bild 6.11. Bei konstanter Pol- und Leiterbreite läßt sich ebenfalls über die Frequenz die Ausprägung der Kantenüberhitzung beeinflussen. Bei der halben optimalen Frequenz sinkt die Überhitzung beispielsweise von 1,73 auf 1,3.

Weiterhin beeinflußt auch die Form der Blechpakete das Temperaturprofil. Innerhalb der vorgegebenen Geometrie, Blechpakete mit Polen im regulären Bereich, ist jedoch eine Formulierung von Designvariablen nicht sinnvoll. Der Übergang auf eine andere Blechpaketform ist denkbar

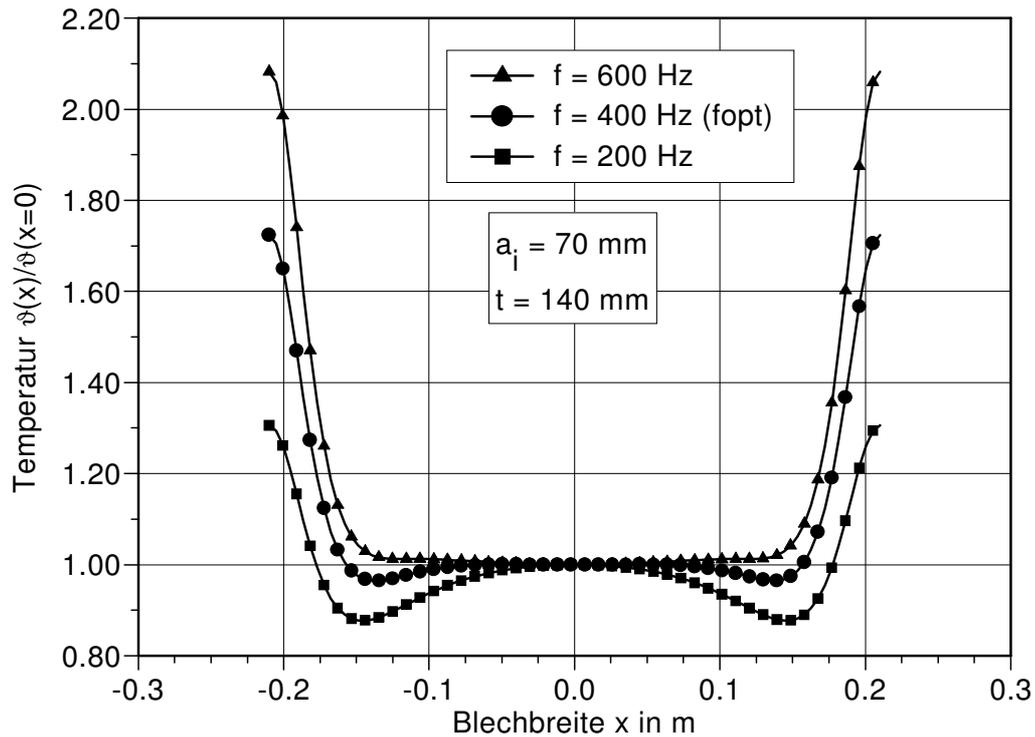


Abbildung 6.11: Normierte Temperaturverteilung über der Blechbreite am Erwärmerausgang für verschiedene Frequenzen f bei fester Polbreite t und Leiterbreite a_i

Tabelle 6.3: Übersicht der potentiellen Designvariablen für Quersfelderwärmer der Gruppe 1

Variable	Charakt. Geometrie
Polbreite t	Blechpaketform
Leiterbreite a_i	
Frequenz f	

und würde zu einem anderen System mit entsprechenden Designvariablen führen. Die Form der Blechpakete wird daher als charakteristische Geometrie mit in die Übersicht der potentiellen Designvariablen der Gruppe „Langer Induktor“ aufgenommen (Tabelle 6.3).

Beispieloptimierungen für die Gruppe 1

Nach der Definition der potentiellen Variablen kann eine automatische Optimierung durchgeführt werden. Die zulässigen Bereiche der Variablen sind bereits im vorherigen Abschnitt bei der Abschätzung der Arbeitsbereiche diskutiert worden, so daß die expliziten Restriktionen der Variablen für die Eingangsdatei der Optimierung festgelegt sind. Für die Durchführung der Optimierung muß nun der Entwicklungsingenieur entscheiden, welche Variable er als erste zuläßt. Dies hängt

in erster Linie von den Anforderungen aus der Industrie ab.

Für die hier vorgestellten Beispieloptimierungen wurden zwei Szenarien geschaffen, bei denen als Hauptziel das Erreichen einer bestimmten Kantenüberhitzung definiert ist. Im ersten Fall soll im Kantenbereich $e = 12,5\%$ eine Temperaturerhöhung von 1,3 erreicht werden, im zweiten Fall von 1,1. Dazu wird die oben beschriebene Zielfunktion f_{z5} eingesetzt.

Tabelle 6.4: Variablen mit zulässigem Bereich für die Beispieloptimierungen in Gruppe 1

	1. Konfiguration		2. Konfiguration	
	Variable	Grenzen	Variable	Grenzen
x_1	a_i	32 mm–160 mm	f	93 Hz–1400 Hz
x_2	t	80 mm–300 mm	t	80 mm–300 mm
impl. Restriktion	f	$f_{opt} = f(t)$	a_i	$\frac{t}{2} = f(t)$

Diese Ziele sollen mit zwei unterschiedlichen Konfigurationen, die jeweils zwei Designvariablen x_1 und x_2 zulassen, erreicht werden. Die notwendigen Eingangsdaten, die Variablen und deren explizite und implizite Restriktionen sind in Tabelle 6.4 zusammengestellt. Sie werden durch das Implementieren in den Schnittstellenprogrammen berücksichtigt. Für die erste Konfiguration ergibt sich als implizite Nebenbedingung die interne Anpassung der Frequenz an die Polbreite, so daß jeweils f_{opt} verwendet wird. Bei der zweiten Konfiguration wird intern die Leiterbreite a_i auf die halbe Polbreite gesetzt.

Mit den zuvor festgelegten zwei Variablenkonfigurationen und zwei Zielfunktionen werden insgesamt vier 2D-Optimierungsprozesse durchgeführt. Als Optimierungsalgorithmus wird die deterministische Complex-Methode verwendet (siehe Abschnitt 5.2.2), die nach durchschnittlich 30 Optimierungsläufen ein Ergebnis liefert.

Das erste Ziel, die 1,3fache Überhitzung der Kanten, wird mit beiden Variablenkonfigurationen näherungsweise erreicht (Bild 6.12). Der prinzipielle Verlauf der Zieltemperatur findet sich in den beiden optimierten Kurvenverläufen wieder. Allerdings ist die maximale Kantenüberhitzung stärker ausgeprägt und es tritt ein lokaler Temperaturabfall zwischen Kantenbereich und regulärer Zone auf. Dieser Effekt ist in der Wahl des Querfeldkonzeptes begründet. Eine Reduzierung der Kantenüberhitzung ist im allgemeinen durch eine Verringerung der Polbreite oder der Frequenz zu erreichen. Damit verbunden ist jedoch auch ein größerer Temperaturabfall zwischen Blechmitte und -kante. Die Beispiele zeigen, daß die Optimierung der ersten Variablenkonfiguration a_i und t zum besseren Ergebnis hinsichtlich der Temperaturverteilung führt. Mit den kleinsten möglichen Werten für Pol- und Leiterbreite wird der Zieltemperaturverlauf angenähert (Tabelle 6.5). Die Frequenzverringerung während der Optimierung der zweiten Konfiguration mit f und t als Variablen

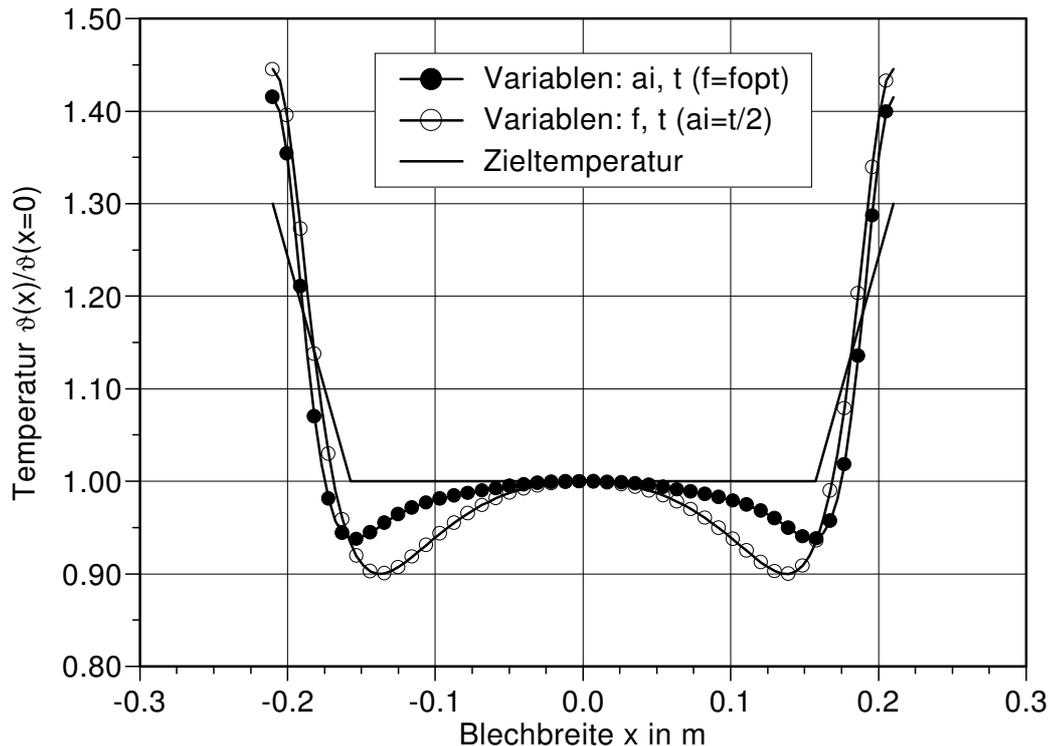


Abbildung 6.12: Normierte Temperaturverteilung über der Blechbreite am Erwärmerausgang als Ergebnis der Beispieloptimierungen bei einer Kantenüberhitzung von 1,3 (Ziel 1)

führt nicht zum gleichen Ergebnis. Die Temperaturbereiche mit Abweichung zum Zieltemperaturverlauf sind stärker ausgeprägt. Der elektrische Wirkungsgrad liegt mit 90,9 % jedoch höher als der für die erste Konfiguration mit 79,5 %, da das Optimierungsergebnis mit einer größeren Polbreite erreicht wird (Tabelle 6.5). Die Reduzierung der Frequenz nimmt in diesem Beispiel somit weniger starken Einfluß auf den Wirkungsgrad als die Verkleinerung der Polbreite.

Tabelle 6.5: Ergebnisse der Beispieloptimierungen für Gruppe 1

	Ziel 1: $1,3 \cdot \vartheta(x=0)$		Ziel 2: $1,1 \cdot \vartheta(x=0)$	
	1. Konfig. (a_i, t)	2. Konfig. (f, t)	1. Konfig. (a_i, t)	2. Konfig. (f, t)
a_i	32 mm	84 mm	32 mm	44 mm
t	80 mm	168 mm	80 mm	88 mm
f	700 Hz	190 Hz	700 Hz	224 Hz
η_{el}	79,5 %	90,9 %	79,5 %	75,9 %

Die zweite gestellte Aufgabe, eine geringe Kantenüberhitzung von 1,1 zu erreichen, führt die beiden verwendeten Variablenkonfigurationen an ihre Grenzen. Beide Optimierungen liefern Temperaturprofile, die nicht mit den Zielvorstellungen übereinstimmen. Die Variation von a_i und t liefert

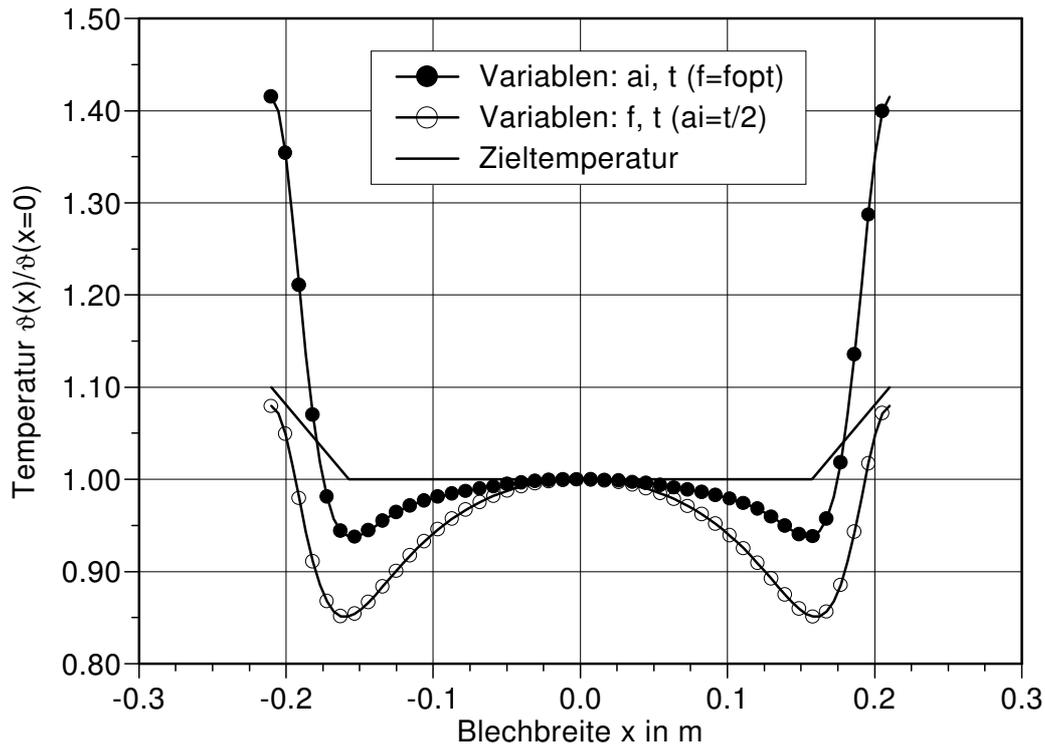


Abbildung 6.13: Normierte Temperaturverteilung über der Blechbreite am Erwärmerausgang als Ergebnis der Beispieloptimierungen bei einer Kantenüberhitzung von 1,1 (Ziel 2)

das gleiche Ergebnis wie bei der 1,3fachen Kantenüberhitzung, da die unteren Grenzen der Variablen dort bereits erreicht waren. Eine weitere Reduzierung der Überhitzung ist nicht möglich. Die zweite Konfiguration erlaubt neben der Verkleinerung der Polbreite auch die Verringerung der Frequenz, so daß die Kantenüberhitzung von 1,1 erreicht werden kann. Dieses Ergebnis wird jedoch nur in Verbindung mit einem extremen Temperaturabfall zwischen Kantenbereich und Blechmitte möglich. Der elektrische Wirkungsgrad für diesen Fall ist aufgrund der kleinen Werte für Polbreite und Frequenz mit 75,9 % ebenfalls gering (Tabelle 6.5).

Um die zweite definierte Zieltemperatur mit der geringen Kantenüberhitzung von 1,1 besser zu erreichen, sind nach den bereits durchgeführten Optimierungen folgende Schritte denkbar. Mittels einer erweiterten Optimierung, in der nicht nur zwei sondern alle drei potentiellen Designvariablen variiert werden, können die Möglichkeiten des Quersfeldkonzeptes „Langer Induktor“ in bezug auf das geforderte Temperaturprofils überprüft werden. Möglicherweise ergibt sich eine Lösung, die die Ansprüche des späteren Anwenders der Anlage erfüllt. Dann wäre die Auslegungsphase mittels Optimierung an dieser Stelle abgeschlossen und die Feinanalyse (siehe Abschnitt 6.5) kann durchgeführt werden. Ist keine zufriedenstellende Lösung mit dieser Methode erreichbar, kann die Blechpaketform geändert werden und können wiederum Optimierungen mit den schon beschriebenen Variablen durchgeführt werden. Schlagen auch diese Versuche fehl, das Ziel zu erfüllen, bleibt zuletzt der Wechsel in eine andere Quersfelderwärmergruppe.

6.4.2.2 Gruppe 2 „Kurzer Induktor“

Für die Auslegung von Quersfelderwärmern der zweiten Gruppe können zusätzlich zu den potentiellen Designvariablen Polbreite t , Leiterbreite a_i und Frequenz f die Induktorlänge b_i und Leiterbreite a_{ie} des Spulenkopfes als Parameter definiert werden. Durch sie wird die Ausdehnung sowie die relative Lage der Spulenköpfe zu den Blechkanten beschrieben (Bild 6.14). Als freier Parameter wird aus Übersichtsgründen in dieser Arbeit nicht die Leiterbreite a_{ie} selbst, sondern der Spulenkopffaktor $k = a_{ie}/a_i$ verwendet, der sich aus dem Verhältnis der Leiterbreiten des Induktors im Spulenkopfbereich a_{ie} und im regulären Bereich a_i berechnet.

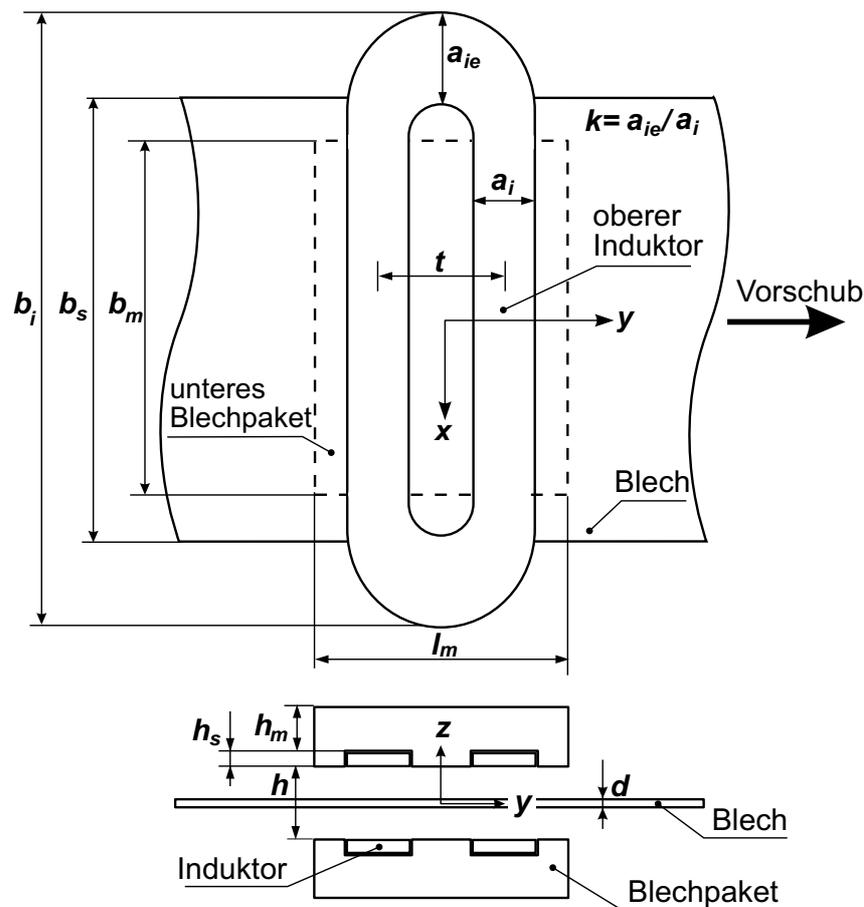


Abbildung 6.14: Geometrie einer Anordnung der Gruppe 2 „Kurzer Induktor“ zur Variablendefinition (oberes Blechpaket nicht dargestellt)

Variablenprüfung für die Gruppe 2

Zur Überprüfung der Wirksamkeit der Variable b_i wird eine 1D-Optimierung mit dieser Größe durchgeführt. Als Ziel wird eine möglichst homogene Verteilung der Temperatur festgelegt, so daß die im vorherigen Abschnitt vorgestellte Zielfunktion f_{z2} zum Einsatz kommen kann. In Bild 6.15 sind neben dem Endergebnis von 9,8 % Zieltemperaturschwankung auch die Zwischenwerte der Optimierung, die chronologisch in der History-Datei gespeichert werden, grafisch dargestellt. Der

Suchverlauf kann anhand der Numerierung der Zwischenwerte abgelesen werden. Nach anfänglichen großen Schritten in Richtung des Minimums werden die Abstände am Ende der Suche kleiner. Die Kurve besitzt ein ausgeprägtes Minimum, in dessen Umgebung es zu einer Häufung von berechneten Punkten kommt. Die Induktorlänge b_i kann somit als wirkungsvolle Designvariable genutzt werden.

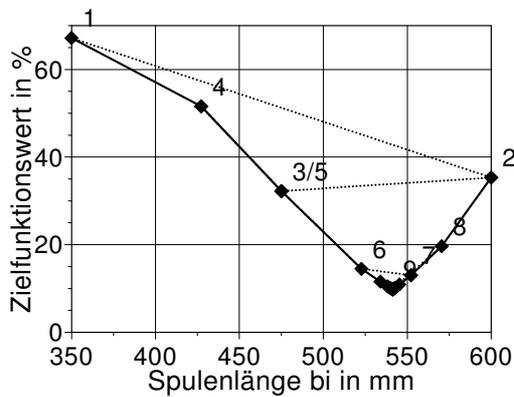


Abbildung 6.15: Zielfunktionswerte von f_{z2} in Abhängigkeit von der Induktorlänge b_i

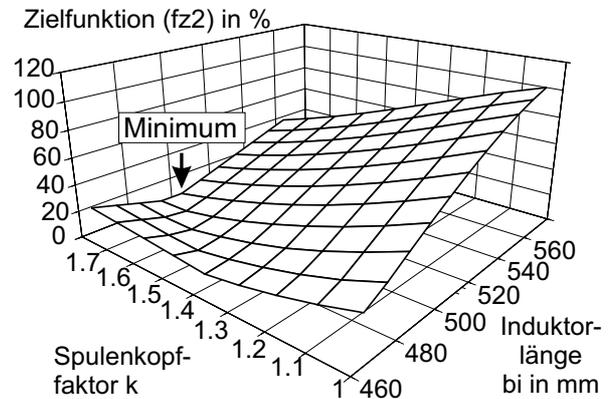


Abbildung 6.16: Zielfunktionswerte von f_{z2} über dem Spulenkopffaktor k und der Induktorlänge b_i

Die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit haben gezeigt, daß die Wirkungsweise des Spulenkopffaktors k abhängig von vorhandenen oder fehlenden Blechpaketen unterschiedlich ausgeprägt ist. In Kapitel 7 wird ein System mit Blechpaketen sehr ausführlich untersucht, so daß in diesem Abschnitt kurz auf ein Quersfeldsystem der Gruppe 2 ohne Blechpaket eingegangen werden soll. Zur Überprüfung des Einflusses des Spulenkopffaktors k wird daher eine Parameterstudie für das Basissystem gemäß Bild 6.14, jedoch ohne Blechpakete, durchgeführt. Als freie Parameter werden die Induktorlänge b_i und der Spulenkopffaktor k gewählt. Die Polbreite t bleibt mit 200 mm und die Leiterbreite a_i mit 100 mm konstant. Das Ergebnis dieser Studie, in der für jedes Parameterpaar b_i und k der Zielfunktionswert f_{z2} bestimmt wird, ist in Bild 6.16 dargestellt. Die Abhängigkeit von beiden Variablen ist deutlich zu erkennen. Es ergibt sich ein Minimum von $f_{z2} = 3,6\%$ für $b_i = 505$ mm und $k = 1,8$. Daraus läßt sich ableiten, daß eine homogene Temperaturverteilung mit einer Anordnung der Gruppe 2 ohne Blechpakete durch die Ausbildung eines großen Spulenkopfes mit $k > 1$ erreicht werden kann.

In dem oben angegebenen Beispiel sind die Spulenköpfe in runder Form ausgebildet. Es ist aber auch denkbar, jede andere Geometrie der Köpfe zuzulassen. Die Berücksichtigung eines fließenden Übergangs von einer Form zur anderen durch charakteristische geometrische Größen ist jedoch sehr aufwendig. Es bietet sich wie bei der Wahl der Blechpaketform an, vor der Optimierung die Anordnung auch bezüglich der Spulenköpfe festzulegen und innerhalb des Systems die in Tabelle 6.6 aufgelisteten Variablen zuzulassen. Die Änderung der Spulenkopfform zieht dann eine erneute Optimierung, jedoch wiederum mit einer überschaubaren Anzahl an Variablen, nach sich.

Tabelle 6.6: Übersicht der potentiellen Designvariablen für Quersfelderwärmer der Gruppe 2

Variable		Charakt. Geometrie
Polbreite	t	Spulenkopfform
Leiterbreite	a_i	Blechpaketform
Induktorlänge	b_i	
Spulenkopffaktor	k	
Frequenz	f	

Beispieloptimierung für die Gruppe 2

Als Beispieloptimierung für einen Anwendungsfall der Gruppe 2 „Kurzer Induktor“ wird als Ziel, wie in der ersten Gruppe, eine Kantenüberhitzung von 1,1 innerhalb von $e = 12,5\%$ der Blechbreite festgelegt, das durch die Zielfunktion f_{z5} beschrieben wird. Damit ist die an dieser Stelle durchgeführte Optimierung eine echte Weiterführung der bereits erläuterten Auslegungsoptimierungen innerhalb der Gruppe 1. Als Designvariablen werden für die hier betrachtete Anlage mit kurzem Induktor vier unabhängige Parameter gewählt, die zusammen mit ihren Einsatzgrenzen in Tabelle 6.7 aufgelistet sind. Die mit diesen Größen gestartete automatische 4D-Optimierung berücksichtigt intern die Anpassung der Frequenz an die Polbreite.

Tabelle 6.7: Variablen mit Grenzen und Ergebnisse der Beispieloptimierung für Gruppe 2

	Variable	Grenzen	Ergebnis
x_1	b_i	420 mm–600 mm	480,2 mm
x_2	a_i	32 mm–140 mm	106,6 mm
x_3	t	80 mm–280 mm	238,4 mm
x_4	k	0,3–1,5	0,63
impl. Restr.	f	$f_{\text{opt}} = f(t)$	235 Hz

Nach 236 Berechnungsschritten erreicht das Complex-Verfahren ein Minimum für die Zielfunktion. Die Endwerte der Variablen sind ebenfalls Tabelle 6.7 zu entnehmen. Der normierte Temperaturverlauf ist in Bild 6.17 über der Blechbreite dargestellt. Die Abweichungen zur Zieltemperatur sind kaum erkennbar und somit die zuvor definierten Anforderungen sehr gut erfüllt. Im direkten Vergleich zu den Ergebnissen aus dem vorherigen Abschnitt, der Optimierung eines langen Induktors hinsichtlich der geringen Kantenüberhitzung von 1,1 (Bild 6.13, S. 70), wird das große Potential einer Systemerweiterung für diesen Anwendungsfall deutlich. Mit einer Anordnung der

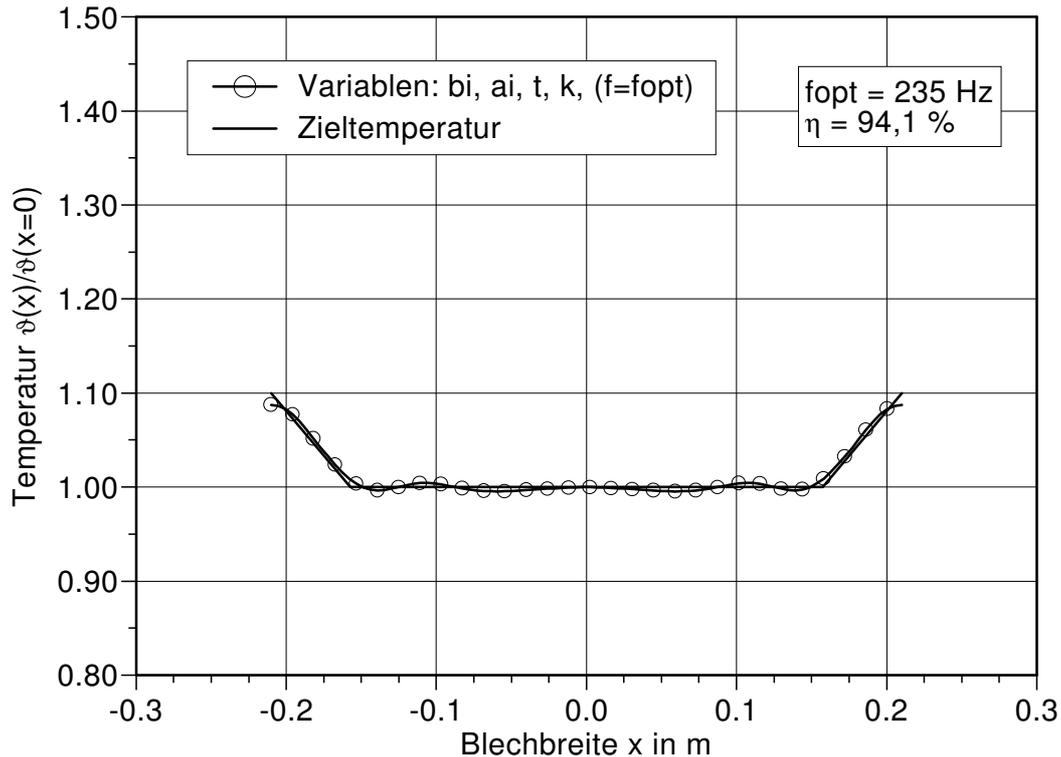


Abbildung 6.17: Normierte Temperaturverteilung über der Blechbreite am Erwärmerausgang als Ergebnis der Beispieloptimierung der Gruppe 2

Gruppe 2 kann die Temperaturverteilung wesentlich genauer eingestellt werden. Zudem ist der elektrische Wirkungsgrad mit 95,1 % für die Erwärmung von hochleitfähigem Messing sehr hoch. Diese Vorteile gelten jedoch nur für eine feste Bandbreite. Sollen auch andere Blechbreiten mit einer ähnlichen Temperaturverteilung erwärmt werden, ist dies durch zwei Maßnahmen möglich. Entweder wird ein weiterer Induktor entwickelt, der für die neue Bandbreite optimiert wird oder es findet der Übergang zu einer Anordnung der dritten Gruppe für variable Bandbreiten statt.

6.4.2.3 Gruppe 3 „Variabler Induktor“

Die Möglichkeiten der Gestaltung eines Erwärmers der dritten Gruppe sind sehr vielfältig. Aus diesem Grund ist es auch nicht möglich, allgemeingültige Designvariablen für diese Gruppe zu definieren. Dies muß abhängig vom gewählten System geschehen. Beispielphaft werden deshalb in diesem Abschnitt zwei Vertreter der Gruppe „Variabler Induktor“ vorgestellt und die Ergebnisse exemplarischer Optimierungen analysiert.

Variablendefinition und 1. Beispieloptimierung der Gruppe 3

Im ersten Beispiel werden zwei identische Induktoreinheiten in y -Richtung nacheinander im Abstand g angeordnet. Sie sind entgegengesetzt aus der Blechmittellachse verschoben und haben beide

den Abstand c zur Blechkante (Bild 6.18). Die beiden Größen g und c sind als Designvariablen der Liste der potentiellen Parameter aus der Gruppe 2 hinzuzufügen (Tabelle 6.8). Mit dieser Anordnung soll eine möglichst homogene Temperaturverteilung für unterschiedliche Blechbreiten erreicht werden. Dafür kommt wiederum die Zielfunktion f_{z2} zum Einsatz. Um den Rechenaufwand gering zu halten, wird vor der eigentlichen Optimierung der Einfluß einzelner Parameter untersucht und wenn möglich, die Anzahl der freien Variablen reduziert. Das kann durch Festlegen von Parametern auf besonders günstige Werte für den hier betrachteten Fall geschehen. Weiterhin wird das während der Analyse der Quersfelderwärmer der Gruppe 1 gewonnene Know-how über das Verhalten weit über die Blechkante hinausragender Spulen eingesetzt.

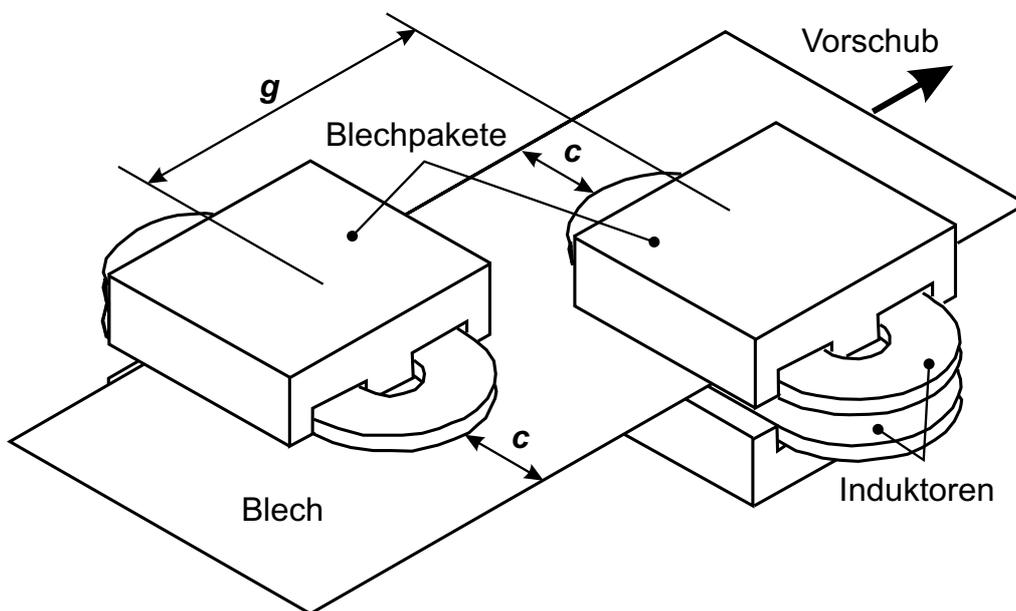


Abbildung 6.18: Geometrie einer Quersfeld-Konfiguration der Gruppe 3 zur Erwärmung variabler Bandbreiten, Beispiel 1 (achsenverschobene Induktoren)

Tabelle 6.8: Übersicht der potentiellen Designvariablen für Quersfelderwärmer der Gruppe 3, Beispiel 1

Variable		Charakt. Geometrie
Polbreite	t	Spulenkopfform
Leiterbreite	a_i	Blechkpaketform
Spulenkopffaktor	k	
Spulenabstand	g	
Spulenüberstand	c	
Frequenz	f	

Aus den im Vorfeld durchgeführten Untersuchungen ergibt sich, daß die Polbreite t möglichst klein gewählt werden sollte, damit die Kantenüberhitzung an der überstehenden Seite des Blechs nicht überproportional hoch ist. Andernfalls kann durch den zweiten nachgeschalteten Induktor kein Ausgleich der Temperatur über der Blechbreite mehr erreicht werden. Der kleinste Wert für die Polbreite ergibt sich aus dem doppelten Koppelspalt und entspricht 80 mm. Für die Leiterbreite a_i wird mit 40 mm der empfohlene Wert der halben Polbreite gewählt. Der Spulenkopffaktor k erweist sich als wirksames Mittel, um den Temperaturabfall zwischen Kantenüberhitzung und Blechmittentemperatur auszugleichen. Dies ist besonders durch eine hohe Konzentration des Stromes, also einen möglichst kleinen Spulenkopffaktor zu realisieren. Er wird auf 0,3 festgelegt, der einem gerade noch praktikablen Wert für eine Leiterbreite von 40 mm entspricht. Der Abstand g zwischen den beiden Spulen wird ebenfalls für die hier durchgeführte exemplarische Optimierung konstant gehalten. In der Praxis wird er nach unten durch die Abmessungen der Induktoreinheiten und nach oben durch den maximal zur Verfügung stehenden Raum begrenzt. Im betrachteten Beispiel wird der feste Abstand g auf 1000 mm festgelegt. Dieser Wert ist groß genug, um ausschließen zu können, daß sich die beiden Induktoreinheiten gegenseitig elektromagnetisch beeinflussen. In diesem Fall kann eine gekoppelte Simulation der beiden Induktoreinheiten entfallen und der Zeitaufwand der Berechnung ist weniger hoch. Die optimale Frequenz f würde bei der verwendeten Polbreite bei 700 Hz liegen. Aus den vorherigen Untersuchungen ist jedoch bekannt, daß die Reduzierung der Frequenz in gewissen Grenzen bei einer noch akzeptablen Wirkungsgradverminderung gut zur Verringerung der Kantenüberhitzung der überstehenden Seite des Induktors eingesetzt werden kann. Aus diesem Grund wird sie auf die Hälfte der optimalen Frequenz zu 350 Hz festgelegt. Als freier Parameter für die Optimierung wird der Spulenabstand zur Blechkante c verwendet, der für beide Induktoreinheiten parallel und in gleichem Maße geändert wird.

Die Ergebnisse zweier 1D-Optimierungen mit dem deterministischen Suchverfahren nach *Brent* für zwei verschiedene Blechbreiten sind in Bild 6.19 dargestellt. Es kann damit das Verhalten des Systems bezüglich der Temperaturverteilung für ein 420 mm und ein 300 mm breites Blech analysiert werden. Prinzipiell zeigt sich, daß die Temperaturprofile aufgrund der verschobenen Induktoren nicht mehr symmetrisch ausgeprägt sind. Bis das Blech mit einer einseitigen Kantenüberhitzung durch die Wirkung des ersten Induktors den zweiten Induktor erreicht, sind bereits thermische Ausgleichsvorgänge quer zur Vorschubrichtung aufgetreten, die zu einem Verwischen des ursprünglichen Profils führen (links in Bild 6.19). Die Temperaturverläufe für beide Blechbreiten sind jedoch sehr ähnlich ausgebildet. Dieser Aspekt unterstreicht die Anwendbarkeit des Quersfelderwärmers für variable Bandbreiten, die sich hier um den Faktor 1,4 unterscheiden. Allerdings ist die hier erreichte Homogenität der Temperatur weniger gut ausgeprägt. Die maximalen Zieltemperaturschwankungen bezogen auf die Blechmittentemperatur am Ausgang liegen bei 13,97 % für das breite und 17,01 % für das schmale Band. Variationen der Polbreite, der Leiterbreite und des Abstandes der beiden Induktoreinheiten führen zu keiner signifikanten Verbesserung

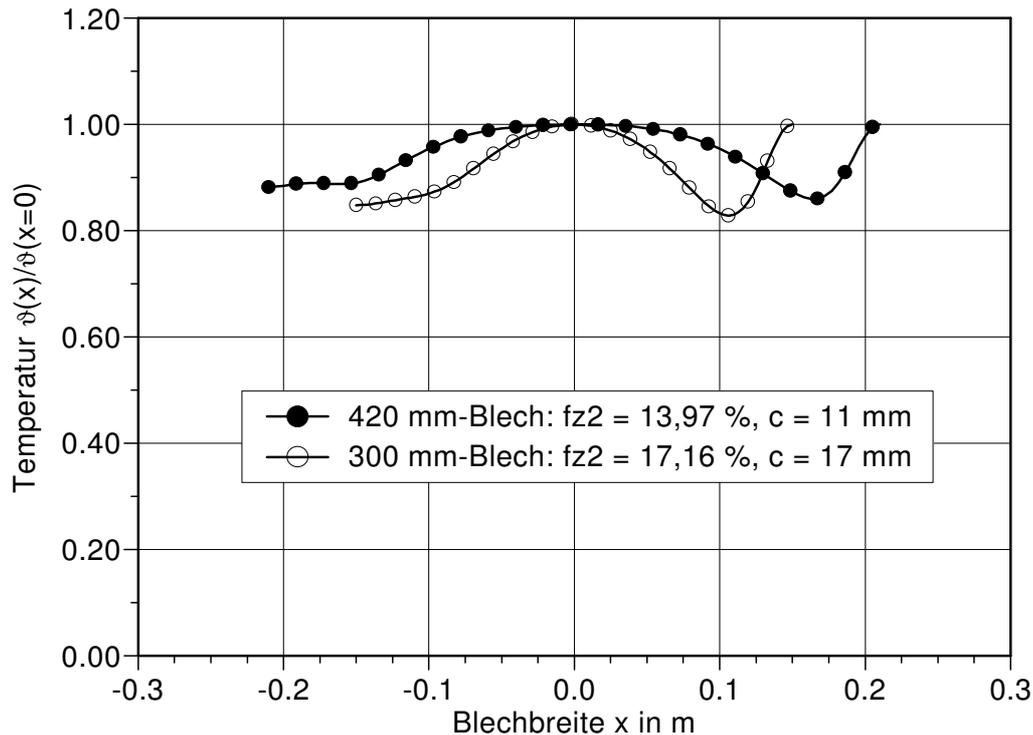


Abbildung 6.19: Normierte Temperaturverteilung über der Blechbreite am Erwärmerausgang als Ergebnis der 1. Beispieloptimierung der Gruppe 3

des Verhaltens. Die Grenzen der hier betrachteten Anordnung sind erreicht, so daß nur eine Änderung der Systemkomponenten zur weiteren Optimierung in Frage kommt. Erste Schritte, in denen die Spulenkopfform von einer runden auf eine eckige Geometrie geändert wurden, zeigen jedoch noch keine relevanten Einflüsse. Als weitergehende Maßnahme erscheint daher die Untersuchung komplizierterer Spulenkopfformen sinnvoll, die beispielsweise im Randbereich eine lokale Veränderung der Polbreite bewirken. Speziell im Spulenkopfbereich angeordnete Blechpakete ergeben ebenfalls eine Systemerweiterung, die potentiell zu einer homogeneren Temperaturverteilung führen kann.

Variablendefinition und 2. Beispieloptimierung der Gruppe 3

Im zweiten Beispiel dieser Quersfelderwärmer-Gruppe wird eine Anordnung gemäß Bild 6.20 ebenfalls hinsichtlich einer homogenen Temperaturverteilung unter Einsatz der Zielfunktion $f_{z2} = (\Delta\vartheta_{max2}/\vartheta(x=0)) \cdot 100\%$ optimiert. Dabei können die Erfahrungen der Untersuchung des ersten Beispiels genutzt werden. Es werden wiederum zwei Induktoren im Abstand g nacheinander angeordnet. Die erste Induktoreinheit entstammt der Gruppe 1 „Langer Induktor“, die zweite der Gruppe 2, „Kurzer Induktor“. Zur Anpassung der Induktoren an verschiedene Blechbreiten ist der zweite Induktor drehbar um den Winkel β ausgeführt. Die potentiellen Designvariablen für dieses System sind in Tabelle 6.9 zusammengestellt.

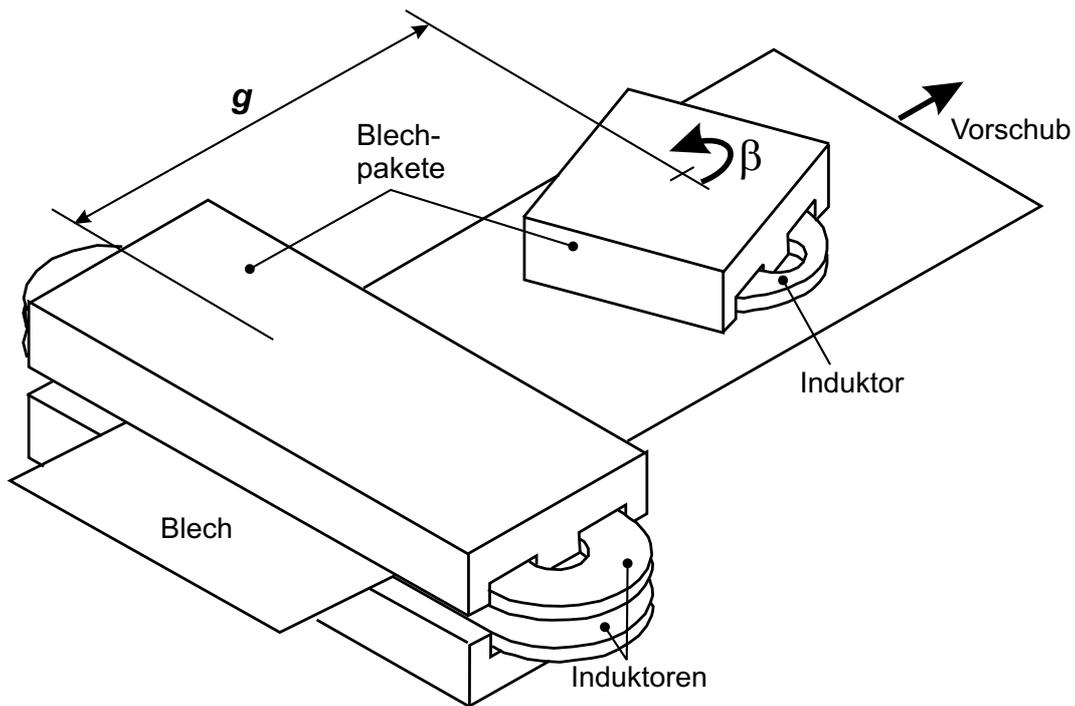


Abbildung 6.20: Geometrie einer Querfeld-Konfiguration der Gruppe 3 zur Erwärmung variabler Bandbreiten, Beispiel 2 (drehbarer Induktor)

Tabelle 6.9: Übersicht der potentiellen Designvariablen für Querfelderwärmer der Gruppe 3, Beispiel 2

Variable		Charakt. Geometrie
Polbreite	t	Spulenkopfform
Leiterbreite	a_i	Blechpaketform
Länge Induktor 2	b_i	
Spulenkopffaktor	k	
Spulenabstand	g	
Spulendrehung	β	
Frequenz	f	

Parametrische Untersuchungen dieser Anordnung zeigen, daß die Wahl einer Polbreite von 140 mm zu besseren Ergebnissen führt als kleinere Polbreiten. Aus diesem Grund wird für den ersten Versuch der Optimierung die Polbreite konstant auf diesem Wert gehalten. Das klassische Verhältnis der Leiterbreite als halbe Polbreite wird ebenfalls beibehalten. Der Abstand g der beiden Induktoreinheiten wird wie im vorangegangenen Fall zu 1000 mm angenommen, um ein vergleichbares Ergebnis zu erhalten. In der ersten Optimierungsrechnung für die maximale Blechbreite von 420 mm werden die Länge b_i und der Spulenkopffaktor k des zweiten Induktors als freie Parameter variiert.

Die zweite Spule wird in dieser 2D-Optimierung nicht verdreht, β somit auf Null gesetzt. Die Frequenz wird auf dem optimalen Wert von 400 Hz gehalten. Die automatische 2D-Optimierung führt zu der normierten Temperaturverteilung, die in Bild 6.21 dargestellt ist. Der optimale Wert für die Länge b_i der zweiten Spule ergibt sich zu 378 mm, der Spulenkopffaktor k liegt im Optimum wiederum bei 0,3. Mit einem optimalen Zielfunktionswert von 3,94 %, was gleichbedeutend ist mit ca. $\pm 2\%$ maximaler Abweichung von der Blechmittentemperatur, können die Anforderungen der Industrie gut erfüllt werden.

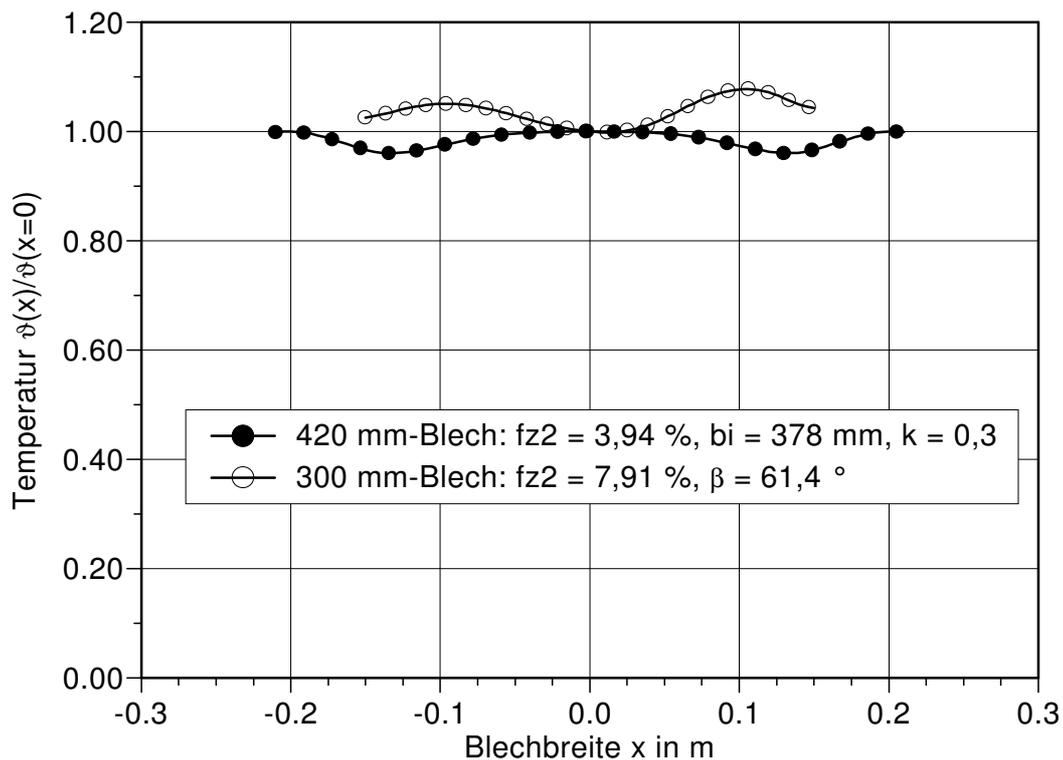


Abbildung 6.21: Normierte Temperaturverteilung über der Blechbreite am Erwärmerausgang als Ergebnis der 2. Beispieloptimierung der Gruppe 3

Abschließend wird eine 1D-Optimierung für ein schmaleres Blech von 300 mm Breite durchgeführt. Hierzu ist es nötig, die oben ausgelegte zweite Induktoreinheit ohne Veränderung in den Abmessungen zu verwenden. Die Anpassung an die Blechbreite geschieht über die Drehung um den Winkel β dieser zweiten Induktoreinheit. Die 1D-Optimierung liefert bei einem Wert von $\beta = 61,4^\circ$ ein homogenes Temperaturprofil mit maximaler Zieltemperaturspanne von 7,91 % (Bild 6.21). Dieser Wert liegt im noch akzeptablen Bereich für zulässige Temperaturabweichungen und zeigt gleichzeitig das große Potential dieses Quersfeldsystems auf. Durch die Hinzunahme freier Parameter sind weitere Verbesserungen hinsichtlich der Homogenität der Temperaturverteilung zu erwarten.

Anhand der oben präsentierten Ergebnisse wird deutlich, daß auch für kompliziertere Anordnungen der Gruppe 3 die in dieser Arbeit entwickelte Optimierungsmethode anwendbar ist. Unter

Berücksichtigung von Expertenwissen werden die Parameter reduziert und somit realistische und in der Praxis einsetzbare Ergebnisse erzielt. Das Aufzeigen der Grenzen für das erste Beispiel verdeutlicht einen weiteren Vorteil des Einsatzes der Optimierungsmethode. Der Projektierungsingenieur kann schon nach wenigen automatisch durchgeführten Optimierungen die Möglichkeiten des Systems erkennen und muß nicht mit Hilfe von manuell durchgeführten Parameterstudien lange nach einem nicht erreichbaren Ziel suchen. Die Erkenntnisse aus der Untersuchung des ersten Beispiels der dritten Gruppe erweitern das Wissen über die Verhaltensweise dieser Art von Quersfelderwärmern. Darauf aufbauend konnte ein neues System entwickelt werden, welches als zweites Beispiel vorgestellt wurde. Damit ist nur der Anfang für umfangreiche in Zukunft interessierende Studien getan, die nun durch die mathematische Optimierung unterstützt werden können. Die geschaffenen Werkzeuge bieten zahlreiche Möglichkeiten zur Untersuchung der unterschiedlichsten Anlagenanordnungen der dritten Gruppe.

6.5 Feinanalyse und technische Realisierung

Nach der erfolgreichen automatischen Optimierung liegt im allgemeinen ein mathematisch ideales Ergebnis vor, resultierend aus den für die numerische Berechnung notwendigen Annahmen. Dazu zählen z. B. die Wahl eines groben Diskretisierungsnetzes oder die symmetrische Anordnung der Spulen ohne Berücksichtigung der Anschlüsse, wodurch die mathematische Optimierung dieser komplexen Aufgabe unter vertretbarem Aufwand erst möglich wurde. Die Optimierung zeigt nun mit ihrem Ergebnis den für das gewählte mathematische Modell optimalen Punkt auf. Für eine vollständige Auslegung eines Quersfelderwärmers ist aber die Überprüfung dieses Ergebnisses notwendig. Neben der Verifikation der Ergebnisse, z. B. durch ein unabhängiges Programm, ist auch die Untersuchung sämtlicher möglicher parasitärer Effekte sinnvoll. Ein System, das eine sehr gute Temperaturverteilung zuläßt, jedoch im Erwärmungsvorgang nicht stabil läuft, kann in der Praxis nur unter erschwerten Bedingungen verwendet werden. Aus diesem Grund wird im folgenden aufgezeigt, welchen Aspekten in der Feinanalyse Aufmerksamkeit gewidmet werden sollte, um gegebenenfalls die Optimierung zu einem früheren Zeitpunkt mit veränderten Rahmenbedingungen wieder aufnehmen zu können. Liefert auch die Feinanalyse gute Ergebnisse, kann die Transformation der idealen mathematischen Lösung in eine technische durchgeführt werden.

6.5.1 Untersuchung möglicher parasitärer Effekte

Die in dieser Arbeit vorgestellte Strategie zum optimalen Design sieht schon zu Beginn der Auslegung die Berücksichtigung aller Faktoren vor, die zu möglichen negativen Effekten, wie Instabilität der Erwärmung bei Blechversatz oder Deformation, führen können. Die Vielzahl an beeinflussenden Parametern kann jedoch nicht in allen Fällen intern berücksichtigt und ihre gegenseitige Be-

einflussung vorhergesehen werden. Daher ist eine detaillierte Feinanalyse des erhaltenen Systems auf numerischer Ebene sehr sinnvoll, bevor die Anordnung in die Praxis umgesetzt wird.

Das numerische Ergebnis der Optimierung basiert im allgemeinen auf einem Kompromiß aus Rechengenauigkeit und -zeit. Daher sollte zunächst eine erneute elektromagnetisch-thermisch gekoppelte Berechnung der optimierten Anlage mit einer feineren Vernetzung durchgeführt werden, um Diskretisierungsungenauigkeiten ausschließen zu können. Auch vergleichende Berechnungen mit kommerziellen oder anderen problemangepaßten Programmpaketen eignen sich, prinzipielle Fehler aufzudecken oder das Ergebnis zu bestätigen. Stellt sich bei dieser Analyse heraus, daß die Ergebnisse bei feinerer Diskretisierung von den zuvor erhaltenen Optimierungsergebnissen abweichen, wird eine erweiterte automatische Optimierung der gleichen Art, wie schon beschrieben, empfohlen. Die zulässigen Bereiche der Designvariablen können dabei in sehr engen Grenzen gewählt werden, da der Zielbereich prinzipiell feststeht.

Die Stabilität des Erwärmungsprozesses, d. h. parasitäre Rückwirkungen auf das Temperaturfeld durch Positionsänderungen des Bandes im Koppelspalt, sollte in jedem Fall überprüft werden. Für den industriellen Betrieb ist es besonders wichtig zu untersuchen, inwiefern sich eine Verschiebung des Blechs in vertikaler und horizontaler Richtung auf den Erwärmungsprozeß auswirkt. Ihr Einfluß auf das Temperaturprofil des optimalen Designs kann durch numerische Berechnungen abgeschätzt werden. Ein derartiger Versatz aus der optimalen Lage des Blechs ist beispielsweise auf die Toleranzen des Transportsystems aber auch auf Deformationen des Blechs zurückzuführen. Der Einfluß vertikaler Bandverschiebungen sollte durch die Auslegung des Systems selbst abgefangen werden. Wird durch die horizontale Blechverschiebung das Temperaturprofil stark beeinflusst, da beispielsweise ein Aggregat der Gruppe 2 „Kurzer Induktor“ entwickelt wurde, kann eine zusätzliche Bandrichteinheit notwendig werden. Eine andere Möglichkeit ist, die Kanten des Bandes permanent zu detektieren und den Induktor diesen nachzuführen. Dies kann durchaus aufgrund der kompakten Bauweise des Erwärmers von Vorteil sein.

Deformationen des Blechs können auf unterschiedlichen Ursachen beruhen. Einerseits kann als Folge einer Vorbehandlung das Blech uneben oder verformt sein. Andererseits ist es möglich, daß thermische Spannungen zu Deformationen des Blechs führen. Diese sind in der Erwärmung selbst begründet, da innerhalb der Erwärmlänge das Blech auf eine bestimmte Temperatur erwärmt wird. Allein dieser Effekt bewirkt Temperaturgradienten im Blech, die zu drei ausgeprägten Beulungsbereichen führen können. Unter der Voraussetzung, daß das Verhältnis b_s/d größer als 300 ist, kann der maximale Versatz $u_{z,max}$ aus der Symmetrieebene in vertikale z -Richtung analytisch mit Hilfe der Gleichung

$$|u_{z,max}| \approx \frac{b_s}{4} \cdot \sqrt{\frac{l_B}{l_E}} \cdot \sqrt{\alpha(\vartheta_A - \vartheta_E)} \quad \text{mit} \quad (6.14)$$

$$l_B \approx l_E \quad \text{für} \quad b_s > l_E \quad \text{bzw.} \quad l_B \approx b_s \quad \text{für} \quad b_s < l_E, \quad (6.15)$$

abgeschätzt werden [20], wobei l_B die charakteristische Länge der Ausdehnung der Beulung, l_E die Länge der Erwärmerstrecke, α den Längenausdehnungskoeffizienten und $\vartheta_A - \vartheta_E$ die Temperaturerhöhung darstellen. Mittels der numerischen Simulation lassen sich die elastischen Verformungen aufgrund der thermischen Spannungen ebenfalls berechnen. Dazu wird die Temperaturverteilung im Blech als Ergebnis der elektromagnetisch-thermisch Simulation als Eingangsgröße verwendet. Mit Hilfe des kommerziellen Programmpaketes ANSYS läßt sich die Deformationsverteilung bestimmen.

Da die thermischen Deformationen ihre Ursache im Erwärmungsprozeß selbst finden, sind sie nicht primär durch die Auslegung der Anlage bei vorgegebener maximaler Länge und Mindesttemperaturhub zu vermeiden. Ihre Rückwirkungen auf das Temperaturprofil sollten jedoch so gering wie möglich sein. Dies ist gut durch die geometrischen Gestaltung des Erwärmungsaggregates zu erreichen, so daß damit die Deformation sekundär berücksichtigt wird. Entsprechende Aspekte sind bei der Auslegung nach der hier vorgestellten Strategie bereits berücksichtigt worden. Das Verhältnis der Polbreite zum Koppelspalt sollte aus den genannten Gründen bei Anordnungen mit Blechpaketen mindestens zwei betragen. Eine Überprüfung der Wirksamkeit der verwendeten Auslegungsrichtlinien sollte jedoch vor der Realisierung der Anlage noch einmal numerisch durchgeführt bzw. anhand einer Testanlage experimentell überprüft werden.

Ebenso können aufgrund der Wechselwirkung des EM-Feldes mit dem im System fließenden Strömen sowie feldführenden Elementen EM-Kräfte entstehen, die auf die strom- bzw. feldführenden Anlagenkomponenten wirken [20]. Zeitlich konstante Anteile der Kräfte können in nichtsymmetrischen Systemen unkontrollierte Bewegungen des Bandes verursachen. Die periodisch veränderlichen Kräfte führen möglicherweise zu Vibrationen und Lärm und sollten ebenso wie die konstanten Anteile daher im Vorfeld abgeschätzt oder im Experiment untersucht werden. Damit wird sichergestellt, daß die Anlage nicht überraschende negative Eigenschaften aufweist.

Bei nicht ferromagnetischem Material wirken die konstanten Kräfte in vertikaler Richtung, die aus Symmetriegründen nur dann auftreten, wenn das Blech aus der Mittellage verschoben ist, zentrierend. Das bedeutet, daß auf das Blech Kräfte wirken, die es in die Mittellage zurück bewegen. Bei ferromagnetischen Blechen können die Kräfte dezentrierend wirken und das Blech in Richtung der Induktoren oder der Blechpakete drücken. Dieser Fall bedarf dann einer genaueren Untersuchung. Die zeitabhängigen harmonischen Kräfte können unter Umständen zu Vibrationsbrüchen und starker Geräuschentwicklung führen. Eine numerische Bestimmung der auftretenden Kräfte hilft, die zu erwartenden Effekte abschätzen zu können. Wird eine zu hohe Geräuschentwicklung festgestellt, können noch im Rahmen der Auslegung der Anlage Maßnahmen zu deren Reduzierung, beispielsweise durch Projektierung einer Lärmkapselung, entwickelt werden.

Der Einfluß von fehlerhaftem oder ungleichmäßigem Blechmaterial darf in der Feinanalyse nicht fehlen. Risse oder Löcher im Blech, schiefe oder ausgefranste Kanten, aber auch inhomogene Ma-

terialeigenschaften beeinflussen gerade beim induktiven Erwärmungsvorgang die Wärmequellen und damit die Temperaturverteilung aufgrund des geänderten Stromflusses. In extremen Fällen ist sogar das Aufschmelzen des Materials durch lokale Überhitzungen denkbar.

Die großen im System fließenden Ströme haben ein hohes EM-Feld zur Folge, über das die Energie auf das zu erwärmende Blech übertragen wird. Bei fehlenden Blechpaketen oder Konstruktionselementen, wie Treibrollen, Gerüsten und Verschiebemechanismen, die in unmittelbarer Nähe zu den aktiven Bereichen des Querfelderwärmers liegen, sind eventuelle Beeinflussungen durch Streufelder zu berücksichtigen. Sie können im ungünstigen Fall zu einer unerwünschten Erwärmung der metallischen Elemente führen. Nicht zuletzt ist darauf hinzuweisen, daß die möglicherweise in der Umgebung der Anlagen auftretenden Streufelder unterhalb der gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte liegen müssen, um den Personenschutz zu gewährleisten. Bei vorhandenen Blechpaketen sind detailliertere Untersuchungen des Streufeldes in der Umgebung der Anlagen zumeist überflüssig, da das gesamte Feld in den Blechpaketen geführt wird und kaum streuende Anteile außerhalb der Anlage auftreten.

6.5.2 Überführung der mathematischen in eine technische Lösung

Bei der Übertragung der numerischen Ergebnisse auf eine real existierende Anlage sind einige grundlegende Aspekte zu berücksichtigen. Prinzipiell ist damit zu rechnen, daß die ideale mathematische Lösung sich nicht ohne Einschränkungen in der Praxis realisieren läßt. Im günstigen Fall ist das mathematische Ergebnis so gut, daß genügend Spielraum vorhanden ist, um auch bei der realen Auslegung immer noch die industriellen Anforderungen zu erfüllen. Andernfalls sind weitergehende Optimierungsmaßnahmen notwendig, die im folgenden beschrieben werden. In einigen Fällen können in der Praxis von den mathematischen Voraussetzungen abweichende Bedingungen durch die Veränderung elektrischer Größen angepaßt werden. Diese sogenannten Beeinflussungskanäle werden in diesem Abschnitt ebenfalls vorgestellt. Zudem werden die wichtigsten Anlagenkomponenten einer Querfeld-Erwärmungsanlage und deren Berücksichtigung bei der Realisierung analysiert.

Nach der mathematischen Optimierung der Anlage liegen die geometrischen und elektrischen Größen vor, mit denen das geforderte Verhalten erreicht wird. Bei der Realisierung müssen jedoch die Fertigungstoleranzen der Spule, des Blechpaketes und auch des Blechs selbst berücksichtigt werden. Bei vorheriger Walzbehandlung des Blechs kann die Blechdicke im Kantenbereich beispielsweise etwas geringer ausfallen als im Mittenbereich. Wie im vorherigen Abschnitt erläutert, hat auch die Führung des Bandes Einfluß auf das Erwärmungsergebnis, da der Transport nicht ideal wie in der Simulation ablaufen kann. Wird ein Schwingkreis zum Erzeugen der benötigten Frequenz verwendet, können die Frequenzen in bestimmten Grenzen von der optimalen abweichen. Es wird somit nicht möglich sein, die exakten Größen der Optimierung einzustellen und das reine

mathematische Ergebnis in der Praxis zu realisieren.

Mathematisch sehr genaue Ergebnisse lassen sich oftmals in der technischen Lösung nicht mehr überprüfen, da die Meßtechnik dies nicht zuläßt. Alle Meßverfahren von thermischen und elektrischen Größen, wie Strom, Spannung oder Frequenz, sind mit Meßfehlern entsprechend ihrer Fehlerklasse und dem Ablesefehler behaftet. Temperaturdifferenzen von unter 20 K sind auf sehr hohem Temperaturniveau von z. B. 1200 °C nicht mehr genau darstellbar. Gerade die Messung der Temperaturverteilung über der Blechbreite mit Hilfe von Infrarot- oder Scanningsystemen hat zum Nachteil, daß im Kantenbereich die Temperatur aufgrund des starken Abfalls zur Umgebung hin nicht exakt aufgenommen werden kann. Die integrierende Wirkung der räumlich ausgedehnten Meßpunkte verfälschen das Ergebnis gerade in diesem Bereich.

Spulen

Einen großen Einfluß können auch die Anschlüsse der Spule haben, die in der automatischen Optimierung unberücksichtigt blieben. In der mathematischen Lösung wurde ein symmetrisches System ohne Verbindungsleitungen zum Umrichter und zwischen den Spulen verwendet. Ist jedoch die Geometrie einer Spule der Gruppe 2 oder 3 optimiert worden, so kann eine Veränderung dieser Art Einfluß auf das Temperaturprofil nehmen und sollte dahingehend untersucht werden. Können die Anschlußleitungen der Spule außerhalb des Einflußbereiches des Blechs gelegt werden, ist eine weitergehende Analyse nicht notwendig. Dies ist z. B. bei der Verwendung eines Induktors der Gruppe 1 möglich, bei dem die Spulenköpfe weit über das Blech hinausragen und ein Anschluß an dieser Stelle die Temperatur im Blech nicht beeinflussen wird. Für die Abschätzung des Einflusses ist in jedem Fall eine einzelne numerische 3D-Berechnung der Zuleitungen und Verbindungsleitungen sehr hilfreich. Weicht das Ergebnis vom idealen ab, so muß eine erweiterte Optimierung unter Berücksichtigung der Anschlüsse stattfinden. Dies ist im allgemeinen nicht mehr mit dem automatischen Verfahren möglich, da die Geometrie zu kompliziert wird. Hier muß daher die Optimierung manuell durchgeführt und somit die reine Expertenlösung gewählt werden. An diesem Punkt ist vor allem die Gestaltung der Spulenköpfe, die in unmittelbarer Nähe zum Blech und möglicherweise außerhalb des Wirkungsbereiches von Blechpaketen liegen, von Interesse.

Im allgemeinen wird bei der mathematischen Optimierung der Temperaturverteilung auch ein idealisierter Spulenquerschnitt verwendet. Die Spule wird als einlagiges flaches Material der optimalen Dicke $d_{\text{Ind}} = \delta\pi/2$ mit homogener Stromverteilung angenommen. Bei genügend hoher Windungszahl in der realen Anlage, kann diese Verteilung näherungsweise auch mit Hohlprofilen, die zur integrierten Wasserkühlung notwendig sind, erreicht werden. Ihr Einfluß sollte aber ebenfalls überprüft werden. An dieser Stelle soll auf eine weitere Optimierungsmaßnahme, unabhängig von der Gesamtgeometrie der Spule, aufmerksam gemacht werden. Die Stromwärmeverluste im Induktor können, ohne das zuvor erzielte Ergebnis der Temperaturverteilung zu beeinflussen,

mittels einer Schichtung der Windungen in mehreren Lagen reduziert werden [70]. Gerade bei den niedrigen Frequenzen der Quersfelderwärmung kann die Verwendung von diesen sogenannten Multilayer-Induktoren zu einer erheblichen Verbesserung des elektrischen Wirkungsgrades führen. Hierzu kann das Programmpaket ANSYS für 2D-Berechnungen im regulären Bereich herangezogen werden. Wie in Abschnitt 4.3 beschrieben, sind mit diesem Werkzeug unter vertretbarem Aufwand Optimierungen des Querschnittes mit dem ANSYS eigenen Optimierungswerkzeug möglich. Der Mehraufwand zur praktischen Spulengestaltung bei Multilayer-Induktoren mit Wasserkühlung muß in die Wirtschaftlichkeitsrechnung einfließen.

Analytische und numerische Untersuchungen zur Analyse des Einflusses mehrerer Leiterschichten zeigen das prinzipielle Potential zur Wirkungsgradverbesserung auf. Bei niedrigen Frequenzen um Netzfrequenz kann mit Vollprofilen rechteckigen Querschnitts, deren einheitliche Dicke d_{Ind} sich nach der Anzahl N der Induktorschichten richtet, eine Reduktion der Verlustleistung um den Faktor \sqrt{N} gegenüber einer einlagigen Anordnung der optimalen Dicke $\delta\pi/2$ erzielt werden. Eine weitere Verbesserung um 12 % bis 15 % ist durch die zusätzliche Anpassung der optimalen Dicke in den einzelnen Schichten zu erreichen [71]. Steigt die Frequenz stark an, kann dieser Effekt aufgrund der notwendigen geringen Leiterdicken in der Praxis nicht mehr realisiert werden. Bei der Verwendung von Hohlprofilen, die im allgemeinen aufgrund der notwendigen Wasserkühlung Anwendung finden, gestaltet sich die Auslegung von Multilayer-Induktoren schwieriger. Numerische Untersuchungen zeigen, daß die Wände des Kühlrohrs durch parasitäre Wirbelströme ebenfalls Verluste aufweisen und sogar zu einer Verschlechterung des Wirkungsgrades führen können. Es ist daher ratsam, für jeden entsprechenden Anwendungsfall numerische Berechnungen auf der Basis der FEM durchzuführen, um das Potential der Verbesserung abschätzen zu können.

Im allgemeinen wird Kupferhohlprofil zur Gestaltung des Induktors verwendet, das in zahlreichen Größen und gängigen Abmessungen lieferbar ist. Sieht die optimale Lösung jedoch eine besondere Form der Spulenköpfe des Induktors vor, kann eine Spezialanfertigung mit besonderer Kühlwasserführung wie oben beschrieben preisgünstiger und effizienter sein (siehe Abschnitt 7.3).

Feldführende Elemente

Die in der numerischen Berechnung simulierten Blechpakete bzw. Ferrite wurden als verlustfrei angenommen. Dies ist in der praktischen Realisierung nicht möglich. Blechpakete bestehen aus gegeneinander elektrisch isolierten Blechen, die über eine sehr hohe relative Permeabilität verfügen. Die Bleche werden geometrisch so angeordnet, daß die Ausbildung von Wirbelströmen, die zu Verlusten im Blechpaket führen, unterdrückt wird. Als Ferrite eignen sich Materialien mit sehr niedriger elektrischer Leitfähigkeit und hoher relativer Permeabilität, die z. B. durch eine Hochdruckverbindung von feinen Eisenteilchen mit einem temperaturbeständigen Binder hergestellt werden können. Geringe Wärmeverluste durch die nicht vollständig zu unterdrückenden Wirbel-

ströme sind auch in diesem Fall nicht zu verhindern. Aus fertigungstechnischen Gründen kann die reale Geometrie sowohl des laminierten als auch des ferritischen Materials von der optimierten abweichen und dadurch zu einer veränderten Feldführung und somit zu einem anderen Ergebnis in der Temperaturverteilung führen. In diesem Fall ist wiederum eine erneute Optimierung im Zielgebiet der Designvariablen mit der angepaßten Geometrie empfehlenswert, um die besten Abmessungen der neuen Geometrie zu finden. Dabei sollte gleichfalls überprüft werden, ob mit Sättigungseffekten im Blechpaket zu rechnen ist.

Im Dauereinsatz und gerade auch bei hohen Temperaturen des Blechs kann aufgrund der zusätzlichen Strahlungswärme zu den eigenen Stromwärmeverlusten eine Kühlung der Blechpakete notwendig sein, um die Wirksamkeit und Haltbarkeit der feldführenden Elemente zu gewährleisten. Die Kühlung kann oft durch den Einsatz von Ventilatoren realisiert werden. Bei der Verwendung von Blechpaketen ist es auch möglich, Kupferbleche in die Schichtung des Paketes zu integrieren, die die Wärme nach außen ableiten. Aufgelötete, wassergekühlte Kupferrohre können dann für die Abfuhr der Verlustleistung sorgen.

Prozeßführung und zusätzliche Anlagenkomponenten

Für den Betrieb der Anlage bei wechselnden Chargen muß der Quersfelderwärmer mit entsprechend benötigter Leistung bei passender Frequenz versorgt werden. Die Frequenzen richten sich im allgemeinen bei einer einmal ausgelegten Anlage mit konstanter Polbreite nach dem Material, d. h. der elektrischen Leitfähigkeit κ und der Dicke d des zu erwärmenden Blechs sowie nach der gewünschten Kantentemperatur $\ddot{u} \cdot \vartheta(x=0)$, die um den Temperaturerhöpfungsfaktor \ddot{u} größer als die Blechmittentemperatur ist. Abhängig von der Vorschubgeschwindigkeit des Materials und dem geforderten Temperaturhub im Blech ist zudem die zu übertragende Leistung anzupassen. Der Quersfelderwärmer ist aus den genannten Gründen somit ein Teil eines Erwärmungssystems, das sich neben der reinen Erwärmereinheit aus der Energieversorgung und zugehöriger Prozeßführungstechnik zusammensetzt. Im folgenden werden daher die Möglichkeiten der Prozeßführung und die Gestaltung der Energieversorgung des Quersfelderwärmers unter Berücksichtigung des wechselnden Betriebes erläutert.

In welcher Weise elektrische Beeinflussungsmöglichkeiten zur Anpassung an abweichende Betriebsgrößen genutzt werden können, ist in Tabelle 6.10 zusammengefaßt. Handelt es sich zusätzlich um einen breitenadaptierbaren Induktor, ist auch die Erfassung der Blechbreite b_s als Eingangsgröße für eine entsprechende Anpassung der Geometrie des Erwärmers an die Breite notwendig.

Die Anlage sollte daher mit umfangreicher Meßtechnik ausgestattet werden, um die automatische Anpassung der elektrischen Größen an die aktuellen Anforderungen zu ermöglichen. Eine rechnergestützte Prozeßführung und -überwachung ist in der Lage, Material- oder Vorschubänderungen

Tabelle 6.10: Beeinflussungsmöglichkeiten zur Kompensation der Änderungen von Eingangsgrößen

Eingangsgröße			Stellgröße		
Blechdicke	d	$\uparrow \implies$	Frequenz	f	\downarrow
		\implies	Leistung	P	\uparrow
el. Leitfähigkeit	κ	$\uparrow \implies$	Frequenz	f	\downarrow
Vorschubgeschwindigkeit	v	$\uparrow \implies$	Leistung	P	\uparrow
Temperaturhub	$\Delta\vartheta$	$\uparrow \implies$	Leistung	P	\uparrow
Kantenüberhitzung	$\ddot{u} \cdot \vartheta(x=0)$	$\uparrow \implies$	Frequenz	f	\uparrow
Blechbreite	b_s	$\uparrow \implies$	Erwärmergeometrie		$\leftrightarrow\updownarrow$

während des Betriebes zu detektieren und die Frequenz sowie die Leistung in entsprechender Weise zu regeln. Dies wird dadurch erreicht, daß der Prozeßrechner auf ein eingespeichertes mathematisches Modell des Prozesses zurückgreifen kann, das durch Erfahrungswerte aus dem Betrieb den realen Prozeß gut nachbildet. Die zusätzliche meßtechnische Erfassung der Ausgangsgröße, nämlich der Temperatur des Blechs, kann zu einer weiteren Verbesserung der Regelstrecke führen.

Im einfachsten Fall kann der wechselnde Betrieb jedoch derart realisiert werden, daß zu Beginn des Erwärmens einer Charge die charakteristischen Daten, d. h. das Material und die Blechdicke vom Bedienpersonal erfaßt und der einfachen Steuerung zugänglich gemacht werden. Sämtliche Erwärmungskonfigurationen sind zuvor rechnerisch ermittelt und gespeichert worden, so daß die Steuerung abhängig von den Eingabedaten die entsprechenden elektrischen Größen einstellt.

Die klassische Leistungsversorgung von induktiven Erwärmungsanlagen besteht aus einem Frequenzumrichter und den Kompensationskondensatoren, die zusammen mit der induktiven Last einen Schwingkreis bilden. Zusätzlich kann bei der Quersfelderwärmung für die dort recht niedrigen Frequenzen ein Mittelfrequenz-Transformator zur Anpassung der Spannung an den Induktor niedriger Windungszahl notwendig sein. Durch den Betrieb des Schwingkreises am lastgeführten Umrichter stellt sich eine Betriebsfrequenz ein, die in der Nähe der Resonanzfrequenz des ungedämpften Schwingkreises liegt [72]. Der Umrichter liefert in diesem Fall im wesentlichen Wirkleistung. Die Änderung der Frequenz ist durch Zu- oder Abschalten von Kondensatoren möglich, kann jedoch nur in bestimmten Grenzen und nicht unter Last durchgeführt werden. Gerade aber vor dem Hintergrund der notwendigen Frequenzanpassung bei unterschiedlichen Blechmaterialien für die Quersfelderwärmung tritt in der heutigen Zeit neben der Thyristortechnik der Transistorumrichter mit variabel einstellbarer Frequenz in den Vordergrund. Nach dem Gleichrichten des Drehstromes wird ein Gleichspannungs-Zwischenkreis durch Glättungsdrossel und Kondensatorbatterie

gebildet. Auf der Basis der Pulsbreitenmodulation wird die Last direkt mit wechselnder Polarität auf die Klemmen des Zwischenkreises geschaltet, so daß beliebige Frequenzen in einem weiten Bereich eingestellt werden können. Dieses Verfahren eignet sich vornehmlich für Anlagen mit hohem Leistungsfaktor, da ansonsten ein zu hoher Blindleistungsbedarf auftreten würde. Mit Blechpaketen zur Feldführung ausgestattete Querfelderwärmer eignen sich daher besonders für diesen Anwendungsfall. Nachteilig sind bei diesem Verfahren der Leistungs- und Frequenzbereitstellung die nicht mehr sinusförmigen Spannungen und Ströme. Neben der Grundschwingung treten auch Oberschwingungen vornehmlich der dritten und fünften Ordnung auf, die zu einer Verfälschung des optimierten Temperaturprofils führen können. In welcher Weise sie die Wirkungsweise des Querfelderwärmers beeinflussen, bedarf noch einer genaueren Untersuchung.

6.6 Übertragung der Optimierungsstrategie auf andere Auslegungsaufgaben

Die in dieser Arbeit entwickelte Methodik zum Design von Querfeld-Erwärmungsanlagen ist so strukturiert, daß sie auch auf andere Auslegungsvorhaben übertragen werden kann (vgl. Bild 6.1, S. 47).

Ausgehend von einer einfachen Anordnung, die die integralen Verhältnisse ausreichend abbildet, können auf analytischem oder einfachem numerischen Weg die Arbeitsbereiche des Systems mit geeigneten Grenzen für die Einflußgrößen bestimmt werden. Analytische Zusammenhänge können im ersten Schritt der Optimierung integraler Größen, d. h. des elektrischen Wirkungsgrades und des Leistungsfaktors, formuliert werden und damit eine Reduktion der Parameter ermöglichen.

Im zweiten Schritt, der Optimierung verteilter Größen, ist die Verwendung der zuvor erarbeiteten analytischen Zusammenhänge sinnvoll. Die in diesem Schritt vorgesehene automatische Optimierung unter Einsatz von mathematischen Optimierungsalgorithmen ist vollständig auf andere Optimierungsaufgaben übertragbar. Das Optimierungssystem ist modular aufgebaut und die notwendigen Schnittstellen sind definiert (vgl. Bild 5.2, S. 43). Die für eine neue Aufgabe notwendigen Simulationsprogramme können ebenso direkt wie die vorhandenen mathematischen Optimierungsalgorithmen verwendet werden. Allein die Schnittstellenprogramme zur Erzeugung der Ein- und Ausgangsdaten für die Berechnung sind der aktuellen Auslegungsaufgabe anzupassen.

Eine Feinanalyse zur Überprüfung der numerisch ermittelten Ergebnisse und zur detaillierten Untersuchung des optimalen Designs ist sinnvoll. Anschließend kann das mathematische Ergebnis in ein technisch realisierbares überführt werden. Eine experimentelle Verifikation des optimalen Designs sollte dann durchgeführt werden, wenn ein spezielles Erwärmerkonzept zum ersten Mal realisiert wird. Dadurch ist eine Bestätigung der getroffenen Vereinfachungen für die Optimierung möglich.

Neben der Kopplung des am Institut für Elektrowärme entwickelten Programmpaketes HIHT-EC mit den mathematischen Algorithmen der Optimierungsdatenbank ist auch die Verbindung mit anderen Simulationsprogrammen untersucht worden. Zum Einsatz kam alternativ zum 2D-Modell des kommerziellen Programmpaketes ANSYS auch ein weiteres problemangepaßtes Simulationsprogramm zur Berechnung der induktiven Querfelderwärmung. Die mit diesen Programmen durchgeführten Versuche verliefen erfolgreich.

Vorstellbar ist darüber hinaus der Einsatz des automatischen Optimierungsverfahrens zur Auslegung von weiteren komplizierten Erwärmungs- oder Schmelzaggregaten, deren Betrieb von zahlreichen Parametern beeinflußt wird. Mögliche Anwendungsbereiche stellen z. B. die Auslegung von Induktionstiegelöfen, Schmiedeblockerwärmern oder Induktoren zur Erwärmung von speziell geformten Werkstücken dar, deren charakteristische Eigenschaften stark durch die Geometrie der Anlage geprägt sind. Insbesondere für die Auslegung von Schmelzverfahren, die durch komplizierte hydrodynamische Vorgänge geprägt sind, wie z. B. Verfahren zur Herstellung von Siliziumeinkristallen oder der Kaltwand-Induktions-Tiegelöfen für hochschmelzende Legierungen, ist der Einsatz der automatischen Optimierung wünschenswert. Hier könnte sich die Verwendung des Optimierungssystems zunächst auf die Lösung von Teilproblemen konzentrieren, da die Berechnung des Strömungsfeldes mit den derzeit zur Verfügung stehenden Rechnerleistungen sehr zeitaufwendig ist. Mit dem Fortschritt in der Computertechnologie ist in Zukunft auch die unterstützte Auslegung z. B. hinsichtlich günstiger Strömungsverteilungen in der Schmelze denkbar. Insgesamt bietet das entwickelte Verfahren weitreichende Möglichkeiten, die Auslegung und Optimierung von elektrothermischen Anlagen zu unterstützen, für die ein numerisches Modell vorliegt.

7 Optimierung und Realisierung eines industriellen Querfelderwärmers

Nach der allgemeinen Beschreibung der Optimierungsstrategie in Kapitel 6 werden hier die einzelnen Schritte des Designs für die Beispielauslegung eines industriellen Querfelderwärmers durchgeführt. Ziel ist es, das entwickelte Auslegungskonzept zu bestätigen und eine Querfeldanlage zu entwickeln, die die zuvor definierten Zielvorstellungen des Anwenders erfüllt. Dabei wird die eigentliche Aufgabe der Optimierung der verteilten Größen durch Teiloptimierungen mit verminderter Anzahl an Designvariablen erweitert. Es werden 1D- bis 4D-Optimierungen mit entsprechend ein bis vier unabhängigen Designvariablen durchgeführt. Diese Vorgehensweise erscheint vor dem Hintergrund, daß zum ersten Mal 3D-Berechnungen induktiver Erwärmer mit mathematischen Optimierungsalgorithmen in einer automatischen Schleife gekoppelt werden, sinnvoll. Dadurch ist es möglich, die Wirkungsweise und Effektivität der Algorithmen und des Optimierungssystems zu untersuchen. Anhand der erzielten Teilergebnisse wird eine erweiterte Kenntnis über die Beeinflussungsmöglichkeiten durch einzelne Parameter und über das Verhalten der Anlage bezüglich der Temperaturverteilung erlangt.

Die anhand der entwickelten Optimierungsstrategie erhaltenen Ergebnisse der numerisch-mathematischen Auslegung der industriellen Beispielanlage¹ werden zusammenfassend dargestellt und einer detaillierten Feinanalyse unterzogen. Zur experimentellen Verifikation des optimierten Designs wurde der Querfelderwärmer mit realen Abmessungen im Labor aufgebaut und meßtechnisch untersucht. Die Ergebnisse dieser Analysen sind in diesem Kapitel zusammen mit weitergehenden Vorschlägen zur praktischen Umsetzung der Anlage in der Industrie beschrieben.

7.1 Definition der industriellen Anforderungen

Die im folgenden beschriebenen Anforderungen richten sich nach den praxisnahen Bedürfnissen eines industriellen Anwenders der Querfelderwärmung. Für eine bereits bestehende Gluhanlage im kontinuierlichen Betrieb für Kupfer- und Messingblech soll mit Hilfe der Querfeldtechnologie eine Erwärmereinheit zur Vorerwärmung vor dem eigentlichen gasbefeuchten Glühofen entwickelt werden. Das Band soll in diesem Aggregat von Raumtemperatur auf 300 °C erwärmt werden. Dieser Schritt versetzt den Betreiber der Glühstrecke in die Lage, bei geringfügigen baulichen Maßnahmen die Produktivität der vorhandenen Gesamtanlage zu steigern. Eine kompakte Querfeld-Erwärmereinheit mit maximal 800 mm Länge ist ohne grundlegende bauliche Änderungen in die

¹ von der Europäischen Union gefördertes CRAFT-Projekt, JOE3-CT98-7023, Partner: Institut für Elektrowärme der Universität Hannover, Dipartimento di Ingegneria Elettrica der Universität Padua, Messingwerk Plettenberg Herfeld GmbH & Co KG, Schellhorn und Roth KG, ATE, G.ELF

ca. 100 m lange vorhandene Strecke zum Glühen integrierbar.

In der Anlage wird eine Vielzahl unterschiedlicher Kupferlegierungen prozessiert. Die physikalischen Eigenschaften dreier repräsentativer Materialien sind in Tabelle 7.1 dargestellt. Die Auslegung des Erwärmers wird zunächst für das am häufigsten bearbeitete Messingblech CuZn37 durchgeführt. Die Übertragung auf weitere Blechmaterialien ist über die Frequenzanpassung entsprechend der elektrischen Leitfähigkeit möglich (siehe Abschnitt 7.3.2). Die Temperaturabhängigkeit der Materialeigenschaften wird in den Berechnungen nicht berücksichtigt. Aufgrund des relativ kleinen Temperaturbereiches können gemittelte Werte zum Einsatz kommen (vgl. Tabelle 6.1, S. 64).

Tabelle 7.1: Materialeigenschaften der bearbeiteten Bleche nach [69]

Name	ρ	κ		λ		c_p	ϵ
	kg/m ³	1/Ω·m		W/m·K		Ws/kg·K	
	20 °C	20 °C	200 °C	20 °C	200 °C	20 °C bis 300 °C	20 °C bis 300 °C
E-Cu57	8930	57·10 ⁶	33·10 ⁶	394	381	400	0,03
CuZn30	8550	16·10 ⁶	13·10 ⁶	121	147	398	0,03
CuZn37	8440	15·10 ⁶	12·10 ⁶	120	142	404	0,03

In dem bestehenden Glühofen, der aus drei nacheinander geschalteten Zonen besteht, wird vornehmlich Bandmaterial der Breite $b_s = 420$ mm erwärmt. Die Blechdicken d variieren zwischen 0,1 mm und 1,5 mm. Die entsprechende Vorschubgeschwindigkeit v , der sich jeweils ergebende Durchsatz und die Verweilzeit pro Erwärmerzone sind Tabelle 7.2 zu entnehmen.

Bei dünnen Bändern von 0,1 mm und 0,2 mm Dicke ist der Durchsatz reduziert, da aus anlagenspezifischen Gründen eine Erhöhung der Transportgeschwindigkeit des Bandes nicht möglich ist. Bei dicken Bändern ist die Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit durch die indirekte Wärmeübertragung im Gasofen begrenzt. Für dickere Bleche soll daher eine Steigerung der Produktivität durch einen zusätzlichen Wärmeeintrag erreicht werden. Durch eine Quersfelderwärmungsanlage als Vorerwärmer fährt das Band bereits mit höherer Temperatur in die bestehende Erwärmerstrecke ein, so daß die Haltezeit im Gasofen reduziert und der Durchsatz erhöht werden kann. Eine Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit um 20 % bis 30 % ist Ziel der Entwicklung der Quersfelderanlage für diesen Anwendungsfall.

Die zu erreichende Temperatur am Ende des Vorerwärmers soll für alle Blechdicken bei 300 °C liegen. Ein weiteres Ziel ist das möglichst homogene Temperaturprofil über der Blechbreite. Die maximal erlaubten Abweichungen liegen bei $\pm 4\%$ von der Endtemperatur. Da das Material von Raumtemperatur erwärmt wird, ist von einer homogenen Temperaturverteilung über der Blech-

Tabelle 7.2: Prozeßbedingungen und Produktionsleistungen für CuZn37 bei $b_s = 420$ mm

Blechdicke d in mm	Vorschub v in m/min	Durchsatz in kg/h	Haltezeit pro Zone in s
0,1	40,0	825	3,00
0,2	25,4	1050	4,72
0,3	24,2	1500	4,96
0,4	18,2	1500	6,95
0,5	14,5	1500	8,26
0,6	12,1	1500	9,92
0,8	9,1	1500	13,19
1,0	7,3	1500	16,53
1,5	4,8	1500	24,79

breite am Erwärmereingang auszugehen.

Die Analyse der Bandführung ergibt, daß der minimal mögliche Koppelspalt h bei 40 mm liegt. Dieser Wert wird als Basisgröße für die folgende Auslegung festgelegt. Das verwendete Transportsystem verfügt über sogenannte S-Rollen zur präzisen Bandführung direkt vor dem Eingang der zu entwickelnden Querfeldanlage. Die maximalen horizontalen Verschiebungen des Blechs liegen bei ± 5 mm. Vertikale Schwankungen des Bandes treten in der Größenordnung von 5 mm bis maximal 10 mm auf. Lediglich beim Wechsel des Bandes entsteht eine Heftstelle, die größere Ausmaße hat. Für diesen Fall ist das Öffnen des Induktors erforderlich, um die Nahtstelle ohne mechanischen Kontakt passieren zu lassen. Dies ist beispielsweise durch das hydraulische Anheben des oberen Induktors möglich.

7.2 Durchführung der Optimierung

In Anlehnung an die in Kapitel 6 beschriebene Strategie der Optimierung werden in diesem Abschnitt die einzelnen Schritte der Auslegung für das Beispiel durchgeführt. Nach der Optimierung der integralen Größen folgt die Optimierung der Temperaturverteilung mit Hilfe von mathematischen Algorithmen. Einen Schwerpunkt stellt neben der anwendungsorientierten Auslegung auch die Erweiterung der Kenntnis über besondere Einflußfaktoren auf die Querfelderwärmung dar. Speziell die Wirkung des Spulenkopffaktors soll hier untersucht werden. Die Steigerung von der 1D-Optimierung bis hin zur 4D-Optimierung liefert zudem Erfahrungswerte bezüglich des Einsatzes von automatischen Optimierungswerkzeugen.

7.2.1 Optimierung der integralen Größen

Auf der Basis der vorgegebenen Zusammenhänge zwischen Blechdicke und Vorschub läßt sich die theoretisch notwendige Leistung P_{theo} für alle verwendeten Materialien nach Gleichung (6.1) bestimmen. Aufgrund der angepaßten Bandgeschwindigkeit wird für alle Banddicken nahezu die gleiche Leistung benötigt. Mit einer um 30 % gesteigerten Vorschubgeschwindigkeit liegt der theoretische Leistungsbedarf für die drei Beispielmaterialien aus Tabelle 7.1 zwischen 63 kW und 66 kW um einen Temperaturhub von 280 K zu erreichen.

Die folgende Abschätzung der Verluste dient vornehmlich der Festlegung des mathematischen Modells. Es wird überprüft, inwiefern die möglichen Wärmeverluste in der späteren Berechnung während der Optimierung der verteilten Größen berücksichtigt werden müssen. Aufgrund der verhältnismäßig geringen Geschwindigkeiten überwiegt in dem hier betrachteten Anwendungsfall die freie Konvektion gegenüber der erzwungenen. Der Wärmeübergangskoeffizient zwischen Blech und umgebender Luft kann nach [68] zu ca. $\alpha = 8 \text{ W/m}^2\text{K}$ bestimmt werden. Unter der Annahme einer Anlagenlänge l von 800 mm und einer mittleren Blechtemperatur von 150°C errechnen sich die konvektiven Verluste nach Gleichung (6.2) zu ca. 700 W. Sie sind klein gegenüber der theoretisch notwendigen Leistung zum Aufheizen und können daher vernachlässigt werden. Die Oberfläche des Blechs ist glänzend, jedoch nicht spiegelnd. Der Emissionsgrad läßt sich daher mit $\varepsilon = 0,03$ annehmen [73]. Damit können die maximalen Strahlungsverluste gemäß Gleichung (6.3) zu 150 W bestimmt werden. Dabei wird wiederum eine Anlagenlänge von 800 mm zugrunde gelegt sowie die Annahme getroffen, das Blech strahle über der gesamten Länge mit der mittleren Temperatur 150°C gegen die Umgebung. Im Vergleich zu der oben angegebenen theoretisch notwendigen Leistung sind diese Verluste ebenfalls vernachlässigbar.

Aus dem bereits festgelegten Koppelspalt $h = 40 \text{ mm}$ und dem maximal zur Verfügung stehenden Platz ergibt sich der Arbeitsbereich für die Polbreite t aus Gleichung (6.6). Der minimale Wert für die Polbreite liegt bei 80 mm. Aufgrund der Verwendung von Blechpaketen ist die maximale Länge auf die Hälfte des für die Anlage vorgesehenen Platzes beschränkt, das entspricht 400 mm. In diesem Fall würde die Polbreite sehr nahe dem Wert der Blechbreite liegen und die Ausprägung eines regulären Bereiches im Blech wäre unwahrscheinlich. Um sicherzustellen, daß die prinzipielle Geometrie des Induktors gewahrt bleibt und die Breite des Induktors, die maßgeblich durch die Polbreite bestimmt wird, kleiner als die Länge des Induktors ist, wird die maximale Polbreite auf 300 mm gesetzt. Dadurch kann auf sämtliche Erfahrungswerte aus bisher durchgeführten Untersuchungen und Parameterstudien [20] von Quersfelderwärmern zurückgegriffen werden.

Die analytische Abschätzung der optimalen Frequenzen zur Erlangung eines maximalen Wirkungsgrades nach Gleichung (3.16) liefert für den hier betrachteten Anwendungsfall einen sehr weiten Frequenzbereich von 12 Hz bis 2708 Hz. Diese Grenzen ergeben sich auf der Basis der zwei verwendeten Blechmaterialien mit extremen Materialeigenschaften, CuZn37 und E-Cu57.

Mit Hilfe der praktisch orientierten optimalen Frequenzen nach Gleichung (3.4) aus [20] läßt sich der oben angegebene Bereich nach Gleichung (6.7) sinnvoll einschränken. Die niedrigste Frequenz tritt bei der größten Polbreite von 300 mm für das 1,5 mm dicke Blech auf und liegt bei 30 Hz (Tabelle 7.3). Der maximale Frequenzwert bei der kleinsten Polbreite von 80 mm für eine Blechdicke von 0,1 mm beträgt 1870 Hz.

Tabelle 7.3: Optimale Frequenzen f_{opt} in Hz nach Gleichung (3.4) für die Blechmaterialien CuZn37 und E-Cu57

Blechdicke d	CuZn37		E-Cu57	
	$t_{\text{min}} = 80 \text{ mm}$	$t_{\text{max}} = 300 \text{ mm}$	$t_{\text{min}} = 80 \text{ mm}$	$t_{\text{max}} = 300 \text{ mm}$
0,3	1870	500	560	150
0,8	700	190	210	60
1,5	370	100	110	30

Mit Hilfe von EM-Berechnungen durch HIHTEC 2D wird die Abhängigkeit der Frequenz von den geometrischen Größen und physikalischen Eigenschaften überprüft. Die aus der reinen analytischen Berechnung bestimmten optimalen Frequenzen nach Gleichung (3.16) dienen als Anhaltswerte für den Variationsbereich der Frequenz. Der oben definierte Bereich für die Frequenz wird dabei gegebenenfalls korrigiert. Exemplarisch wird eine Parameterstudie der Frequenz für vier Polbreiten bei einer mittleren Blechdicke von 0,8 mm hinsichtlich des Einflusses auf den elektrischen Wirkungsgrad und den Leistungsfaktor durchgeführt. In den Bildern 7.1 und 7.2 sind die Ergebnisse der numerischen Berechnung dargestellt. Die für die spätere automatische Optimierung verwendete optimale Frequenz f_{opt} liegt jeweils zwischen den Frequenzen, die maximale Werte für Wirkungsgrad und Leistungsfaktor ergeben und wird daher auf der Basis des aus der numerischen Berechnung bestimmten Referenzwertes $f = 400 \text{ Hz}$ für $t = 140 \text{ mm}$ durch den Zusammenhang

$$f_{\text{opt}} = 400 \text{ Hz} \cdot \frac{140 \text{ mm}}{t} \quad (7.1)$$

beschrieben. Damit wird den beiden charakteristischen Größen Wirkungsgrad und Leistungsfaktor Rechnung getragen. Dieses Ergebnis stimmt gut mit der analytischen Abschätzung der Frequenz nach Gleichung (3.4) aus [20] überein. Im weiteren Verlauf der Optimierung wird daher die Abhängigkeit aus Gleichung (7.1) verwendet.

7.2.2 Optimierung der Temperaturverteilung

Nach der Optimierung der integralen Größen wird nun die automatische Optimierung zur Gestaltung der Temperaturverteilung durchgeführt. Für die reine Auslegung einer Querfeldanlage im

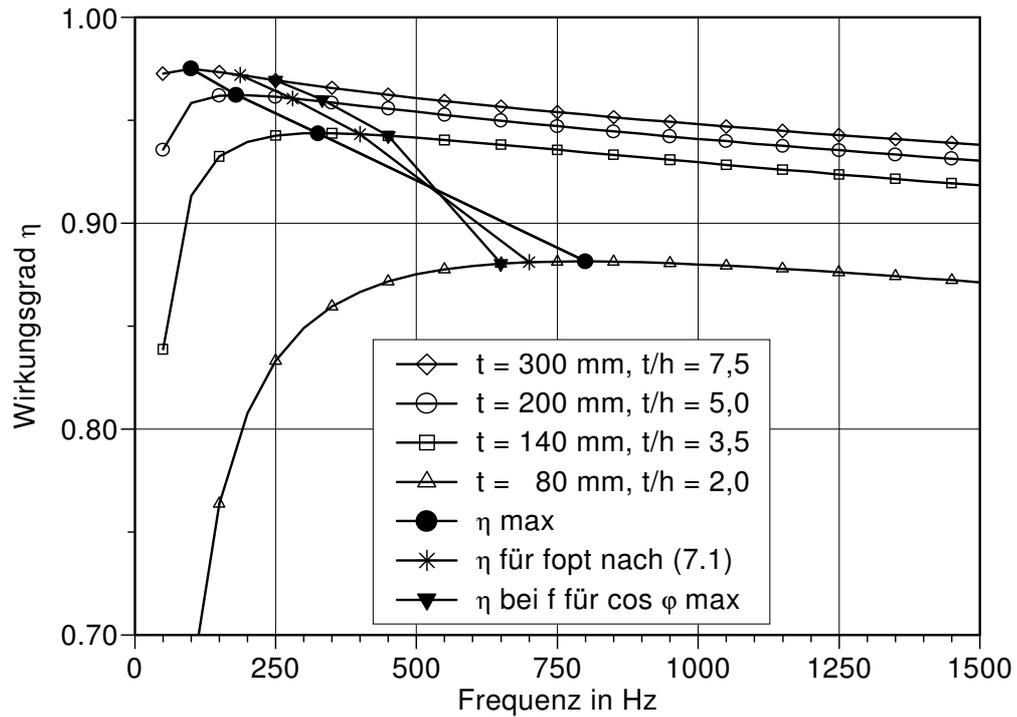


Abbildung 7.1: Elektrischer Wirkungsgrad η für verschiedene Polbreiten t in Abhängigkeit von der Frequenz für 0,8 mm dickes CuZn37-Blech

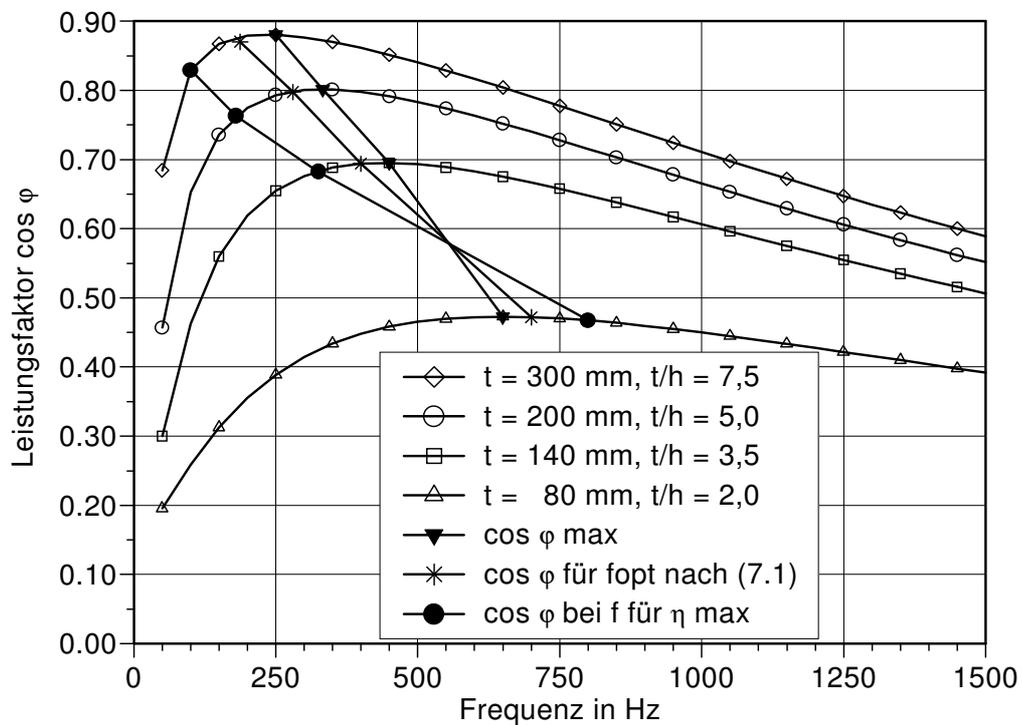


Abbildung 7.2: Leistungsfaktor $\cos \varphi$ für verschiedene Polbreiten t in Abhängigkeit von der Frequenz für 0,8 mm dickes CuZn37-Blech

betrachteten industriellen Anwendungsfall ist eine 4D-Optimierung ausreichend. Zusätzlich werden jedoch 1D-, 2D- und 3D-Optimierungen durchgeführt. Mit ihrer Hilfe wird der Einfluß unterschiedlicher Größen auf die Temperaturverteilung untersucht und gleichzeitig die Effektivität und Handhabung der mathematischen Algorithmen überprüft. Zukünftige Anlagenentwicklungen bedürfen nicht dieser ausführlichen Vorgehensweise, sondern können sich auf die in dieser Arbeit gesammelten Erfahrungen stützen und direkt alle Designvariablen berücksichtigen.

7.2.2.1 Zielfunktion und Wahl des Querfelderwärmerkonzeptes

Der Forderung nach möglichst homogener Temperaturverteilung über der Blechbreite mit maximalen Abweichungen von $\pm 4\%$ von der Blechmittentemperatur wird durch die Verwendung der in Abschnitt 6.4.1 definierten Zielfunktion f_{z2} nachgekommen. Der zu erreichende Wert dieser Zielfunktion, welche die Differenz aus Maximal- und Minimaltemperatur bezogen auf die Temperatur in der Blechmitte bestimmt, liegt somit bei 8% erlaubter Temperaturschwankung.

Aufgrund der festgelegten Bandbreite von 420 mm und der Forderung nach möglichst homogener Temperaturverteilung ohne Kantenüberhitzung wird als Basisanordnung ein Induktor der zweiten Gruppe „Kurzer Induktor“ gewählt. Als Designvariablen kommen die in Abschnitt 6.4.2.2 aufgeführten Größen in Betracht, so daß als unabhängige Variablen die Induktorlänge b_i , die Leiterbreite a_i , die Polbreite t und der Spulenkopffaktor k verwendet werden (vgl. Tabelle 6.6, S. 73). Die Frequenz f wird intern durch die im vorherigen Abschnitt angegebene Gleichung (7.1) an die Polbreite angepaßt und entfällt daher als unabhängige Einflußgröße. Sämtliche Berechnungen beziehen sich auf das CuZn37-Band mittlerer Dicke von 0,8 mm. Es wird dabei ein Vorschub von 10 m/min zugrunde gelegt. Die Übertragung auf andere Materialien und Dicken ist über elektrische Beeinflussungskanäle möglich (siehe Abschnitt 7.3.2).

Als geeignete Ausführungsform der feldführenden Elemente werden Blechpakete mit Polen, in die die Spulen eingebettet sind, ausgewählt. Die Geometrie des Blechpaketes wird jeweils der Form und Größe der Spule angepaßt, um die Anzahl der Designvariablen gering zu halten. Als Basisgeometrie der Spule wird ein runder Spulenkopf verwendet (vgl. Bild 6.14, S. 71). Die Länge des Blechpaketes b_m wird in diesem Fall durch die Länge und die Leiterbreite der Spule sowie den Spulenkopffaktor k bestimmt

$$b_m = b_i - t + a_i(1 - 2k) . \quad (7.2)$$

Die Breite des Blechpaketes l_m ergibt sich aus dem Ansatz, daß die gleiche magnetische Flußdichte innerhalb und außerhalb der Spule auftreten soll. Dem magnetischen Fluß steht zwischen den beiden Spulenschenkeln innerhalb der Spule eine durch die Polbreite festgelegte Fläche zur Verfügung. Wenn für die Blechpaketbreite

$$l_m = 2t \quad (7.3)$$

gilt, so ergibt sich für die beiden Außenbereiche der Spule die gleiche magnetische Flußdichte wie im Innern. Der gleiche Ansatz wird verwendet, um die Höhe des Blechpaketes h_m festzulegen. Sie ergibt sich entsprechend Bild 6.14, S. 71 zu

$$h_m = \frac{1}{4} t . \quad (7.4)$$

Die Kanalhöhe h_s wird in allen Berechnungen konstant auf 30 mm gehalten. Dieser Platz ist notwendig, um eine wassergekühlte Spule vollständig in das Blechpaket integrieren zu können.

7.2.2.2 Variablendefinition und Optimierung

Ausgehend von nur einer unabhängigen Designvariable in der 1D-Optimierung werden die Parameter schrittweise erhöht, bis sämtliche potentielle Designvariablen der Gruppe 2 in der 4D-Optimierung berücksichtigt sind. Die 1D-Optimierung wurde dabei als Hilfsmittel zur parametrischen Untersuchung unterschiedlich gearteter Systeme verwendet. Die Zuordnung der Parameter zu den Optimierungen sind Tabelle 7.4 zu entnehmen. Die Reihenfolge der Designvariablen ist dabei so gewählt worden, daß das System schrittweise komplizierter gestaltet wurde. Nach der Induktorlänge und der Induktorbreite wird die Polbreite als Parameter hinzugenommen. Der Spulenkopffaktor folgt als letzter zusätzlicher Parameter. Die Frequenz wird bei der 3D- und 4D-Optimierung, bei denen die Polbreite t als Designvariable auftritt, intern entsprechend Gleichung (7.1), angepaßt. Beispielhaft wird in der 4D-Optimierung zusätzlich auch die Spulenkopfform variiert, um auch deren Einfluß zu untersuchen.

Tabelle 7.4: Zuordnung der Designvariablen für die durchgeführten Optimierungen

Variable		Optimierung			
		1D	2D	3D	4D
Induktorlänge	b_i	×	×	×	×
Leiterbreite	a_i		×	×	×
Polbreite	t			×	×
Spulenkopffaktor	k				×
Frequenz	f			×	×

1D-Optimierung

Die 1D-Optimierung der Temperaturverteilung durch Variation der Induktorlänge kann gewinnbringend zur parametrischen Untersuchung des Verhaltens der Quersfeldanordnung der gewählten Gruppe (vgl. Abschnitt 6.2) eingesetzt werden.

Bevor die eigentlichen 1D-Optimierungen zur Analyse des betrachteten Querfelderwärmers der Gruppe 2 durchgeführt wird, ist die Arbeitsweise der automatischen Optimierung und vor allem die Wirkungsweise unterschiedlicher mathematischer Algorithmen zu untersuchen. Dazu wird eine 1D-Test-Optimierung durchgeführt, in der die Induktorlänge b_i im Bereich von 350 mm bis 600 mm geändert wird. Alle anderen Parameter werden dabei auf typische Werte, die Frequenz auf ihren optimalen Wert gesetzt. Als mathematische Optimierungsalgorithmen kommen die Methode des Goldenen Schnitts und zwei unterschiedliche Versionen des Verfahrens von *Brent* zum Einsatz, die alle den deterministischen Methoden zuzuordnen sind (vgl. Abschnitt 5.2.2).

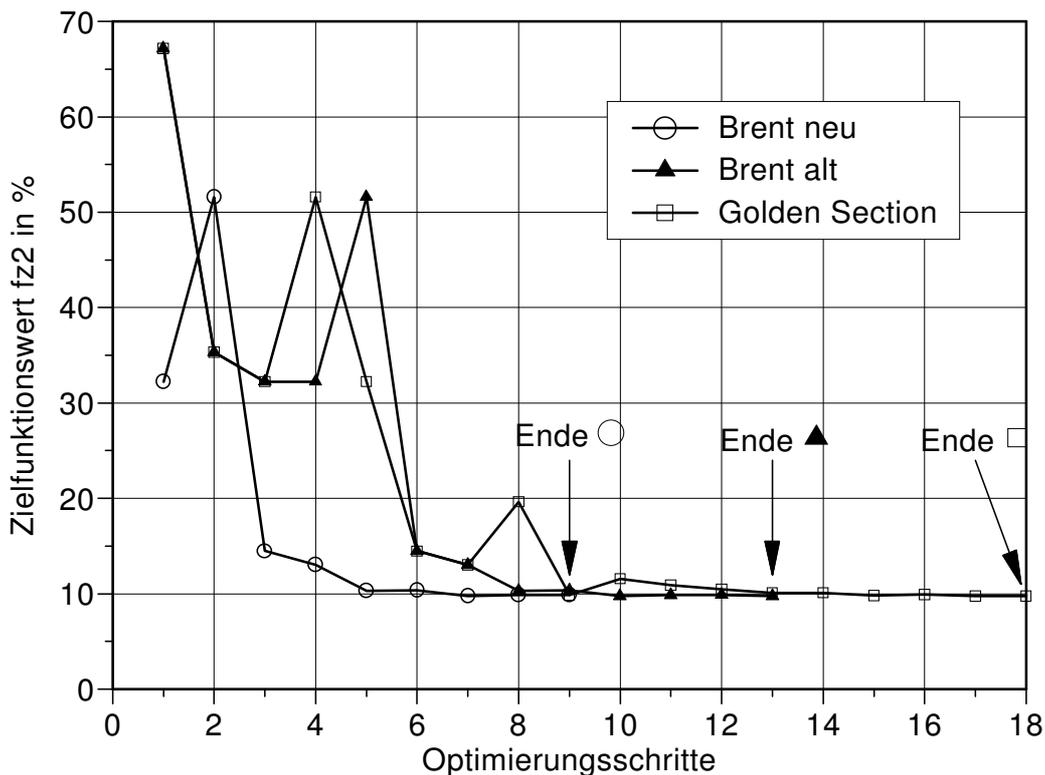


Abbildung 7.3: Verlauf der 1D-Test-Optimierung für unterschiedliche Optimierungsmethoden mit der Induktorlänge b_i als Designvariable

Alle drei Optimierungsläufe führen zum gleichen physikalischen Ergebnis für die Induktorlänge und somit auch für die Temperaturverteilung. Die optimale Induktorlänge b_i liegt bei 541 mm und ergibt einen Temperaturverlauf, der eine Zieltemperaturschwankung von 9,76 % aufweist (Bild 7.3). Unterschiede sind jedoch in der Schnelligkeit der Methoden zu erkennen. Während die Methode des Goldenen Schnitts 18 Schritte zum Erreichen des Optimums benötigt, ist die Methode von *Brent* in der ursprünglichen Form bereits nach 13 Optimierungsschritten am Ziel angelangt. Durch eine spezielle Abwandlung der *Brent*-Methode, bei der die ersten drei Berechnungspunkte eingespart und durch interne Verrechnung neue Startpunkte gewählt werden, kann eine Verbesserung der Methode und damit eine Zeitersparnis erreicht werden. Dieses neue *Brent*-Verfahren benötigt nur neun Schritte zum Ziel. Da die Rechenzeit des Algorithmus selbst nur einem Bruchteil der not-

wendigen Simulationszeit durch HIHTEC 3D entspricht, zeichnet sich diese Anpassung durch eine erhebliche Zeitersparnis für die Optimierung von 30 % gegenüber der alten *Brent*-Methode und von 50 % gegenüber der Methode des Goldenen Schnitts aus. Wird ein Pentium III/500 MHz verwendet, liegt die Rechenzeit bei ca. drei Stunden für einen Optimierungslauf mit neun Schritten. Im folgenden wird daher bei der 1D-Optimierung ausschließlich die neue *Brent*-Methode eingesetzt.

Um den Einfluß der Leiterbreite a_i , der Polbreite t und des Spulenkopffaktors k auf die Temperaturhomogenität im Punkt optimaler Induktorlänge zu untersuchen, werden zahlreiche 1D-Optimierungsläufe durchgeführt. Die genannten Größen a_i , t und k werden dabei jeweils konstant auf verschiedenen Werten gehalten, während die optimale Induktorlänge b_i durch die automatische Optimierung bestimmt wird. Die Frequenz wird abhängig von der Polbreite auf den optimalen Wert angepaßt.

Für einen Spulenkopffaktor von $k = 1$ ergibt sich die in Bild 7.4 dargestellte Kurvenschar. Es sind für unterschiedliche Polbreiten jeweils die Punkte der minimalen Temperaturabweichung über der Leiterbreite aufgetragen, die mit entsprechend unterschiedlichen optimalen Induktorlängen korrelieren. Jeder Punkt der Kurvenschar wurde durch eine 1D-Optimierung gefunden. Für kleine Polbreiten ist eine stärkere Abhängigkeit der minimalen Temperaturschwankungen f_{z2} von der Leiterbreite a_i zu erkennen. Mit steigender Polbreite nimmt dieser Einfluß ab und es kann mit Leiterbreiten von $a_i = 0,5 t$ bis $a_i = 0,8 t$ nahezu die gleiche Temperaturhomogenität erreicht werden. Das Optimum ist bei großen Polbreiten nicht sehr stark ausgeprägt. Ein ähnliches Verhalten tritt hinsichtlich des elektrischen Wirkungsgrades auf (Bild 7.5). Bei kleinen Polbreiten wirkt sich eine kleinere Leiterbreite negativ auf den Wirkungsgrad aus. Er liegt bei einer Polbreite von 80 mm zwischen 83,5 % und 88 %. Die Wirkungsgradabhängigkeit von der Leiterbreite nimmt zu größeren Polbreiten hin ab. Bei einer Polbreite von 220 mm erstreckt sich der Wirkungsgradbereich nur über den kleinen Bereich von 94 % bis 95,5 %.

Insgesamt ist in Bild 7.4 zu erkennen, daß mit dieser Anordnung die Temperaturschwankungen in keinem Punkt eine Grenze von $f_{z2} = 9\%$ unterschreiten. Mit nahezu jeder Polbreite sind Zielfunktionswerte in der Nähe dieser Grenze durch die geeignete Wahl von Induktorlänge und Leiterbreite zu erreichen. Das globale Optimum ist nicht stark ausgeprägt, so daß die Zielgegend ein sehr flaches Gebiet darstellt. Die mit einem Spulenkopffaktor von $k = 1$ erzielte Homogenität reicht nicht für den betrachteten praktischen Anwendungsfall aus. Daher wurde die gleiche Untersuchung mit veränderten Spulenkopffaktoren von $k = 1,5$ und $k = 0,5$ durchgeführt.

Die 1D-Optimierungen für Spulenanordnungen mit einem vergrößerten Spulenkopf von $k = 1,5$ ergeben ähnliche Zusammenhänge wie im schon beschriebenen Fall (Bild 7.6). Die Zielfunktion hängt von der Leiterbreite und der Polbreite ab, jedoch gibt es kein ausgeprägtes Optimum für eine homogene Temperaturverteilung. Lediglich die schwache Tendenz wachsender Zielfunktionswerte zu größeren Polbreiten hin ist zu erkennen. Insgesamt wird aber auch hier eine Grenze nicht un-

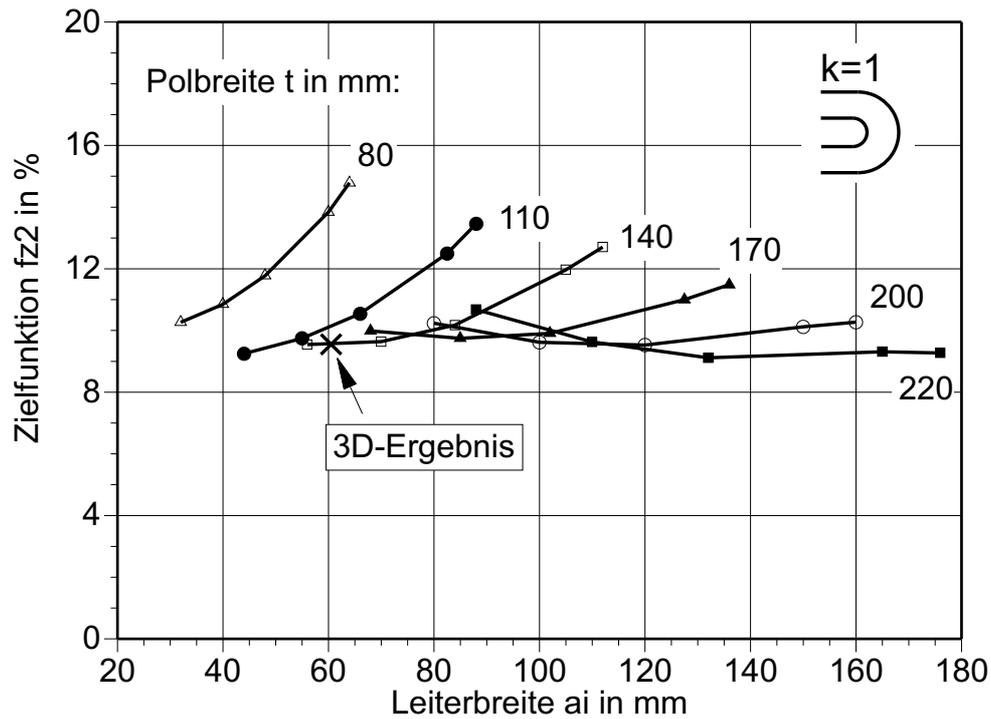


Abbildung 7.4: Zielfunktion f_{z2} in Abhängigkeit der Leiterbreite a_i und der Polbreite t bei optimaler Induktorlänge b_i für $k = 1$

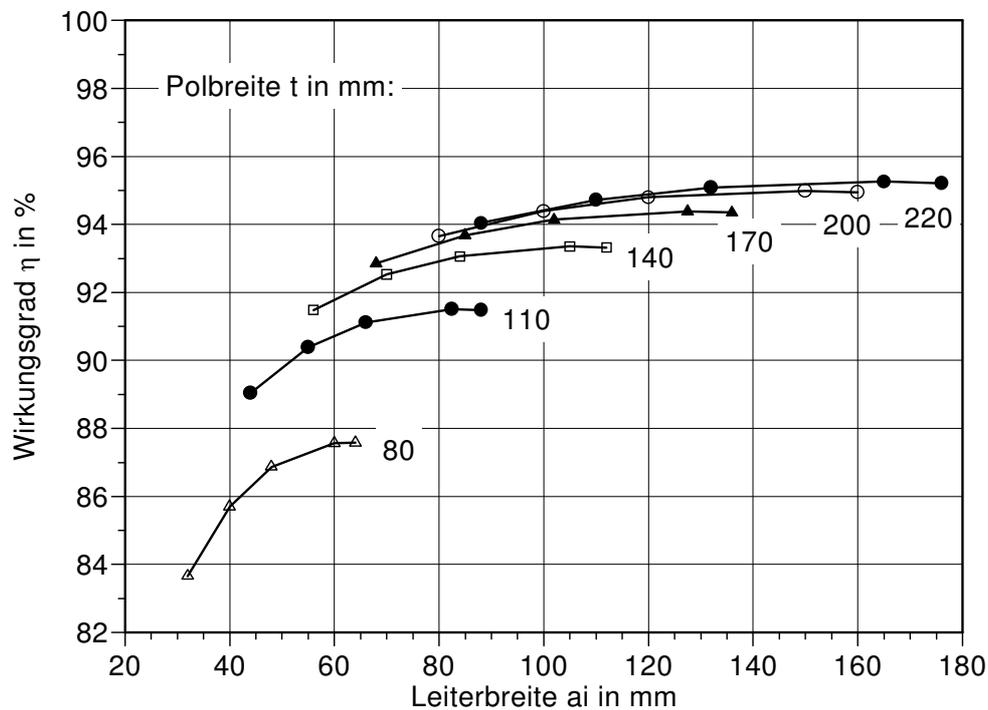


Abbildung 7.5: Elektrischer Wirkungsgrad im Punkt minimaler Temperaturschwankung durch Optimierung von f_{z2} in Abhängigkeit der Leiterbreite a_i und der Polbreite t

terschritten. Die erreichbaren minimalen Temperaturschwankungen liegen alle oberhalb von 12 %. Dieser Wert stellt sich bei der kleinsten Polbreite von 80 mm für die geringste Leiterbreite ein. Der

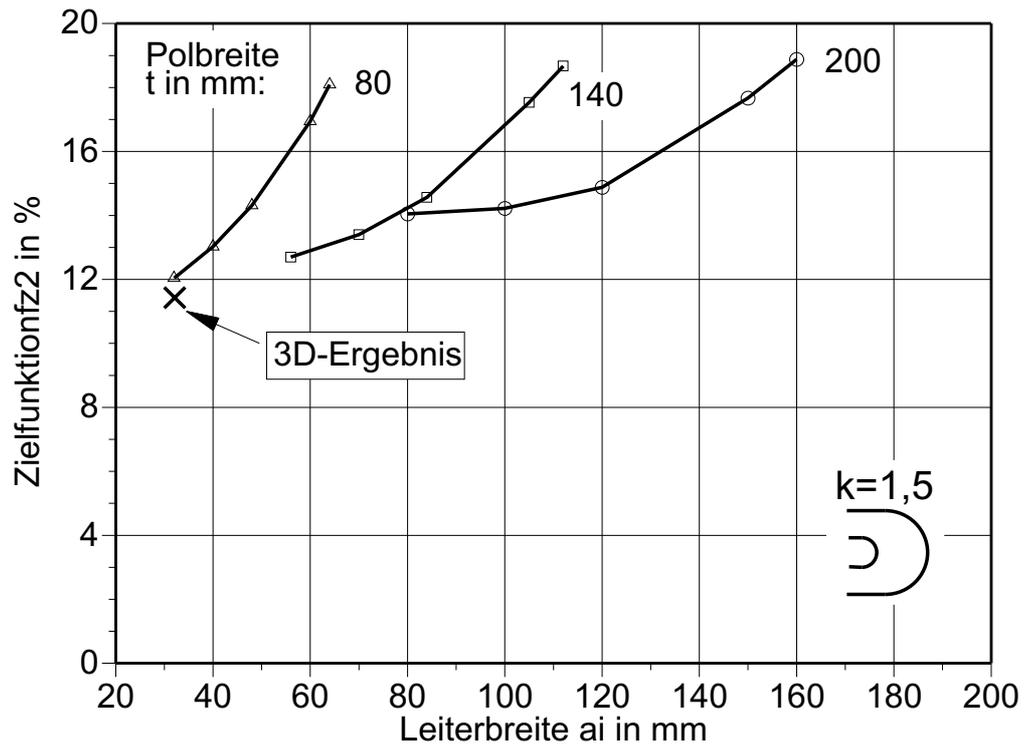


Abbildung 7.6: Zielfunktion f_{z2} in Abhängigkeit der Leiterbreite a_i und der Polbreite t bei optimaler Induktorklänge b_i für $k = 1,5$

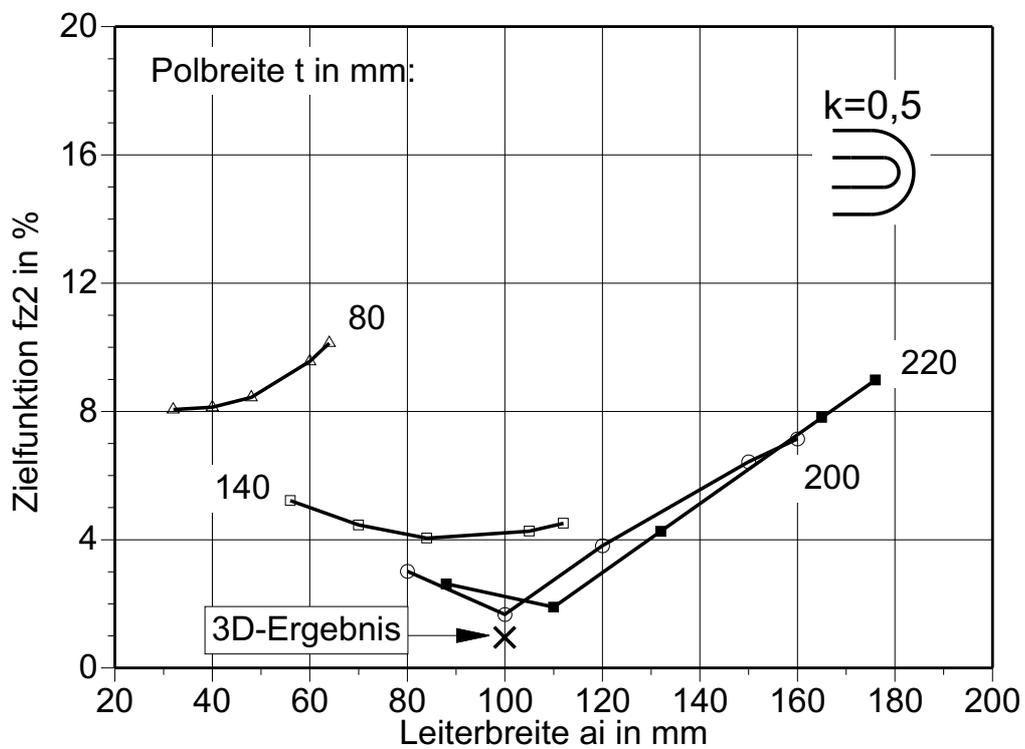


Abbildung 7.7: Zielfunktion f_{z2} in Abhängigkeit der Leiterbreite a_i und der Polbreite t bei optimaler Induktorklänge b_i für $k = 0,5$

Wechsel zu einem breiteren Spulenkopf führt somit nicht zu dem geforderten homogenen Temperaturverlauf.

Wird der Spulenkopffaktor jedoch auf $k = 0,5$ reduziert, sind wesentlich niedrigere Werte für die Zielfunktion f_{z2} und damit eine viel größere Temperaturhomogenität erreichbar (Bild 7.7). Bei einer Polbreite von 200 mm stellt sich eine minimale Temperaturschwankung von 1,2 % ein. Dieser geringe Wert zeigt das große Potential auf, auch in der Praxis eine sehr homogene Verteilung der Temperatur zu erzielen. Die Abhängigkeit der Zielfunktion von Leiterbreite und Polbreite ist bei dem hier betrachteten kleineren Spulenkopffaktor stärker ausgeprägt als bei den beiden großen Werten von $k = 1$ und $k = 1,5$.

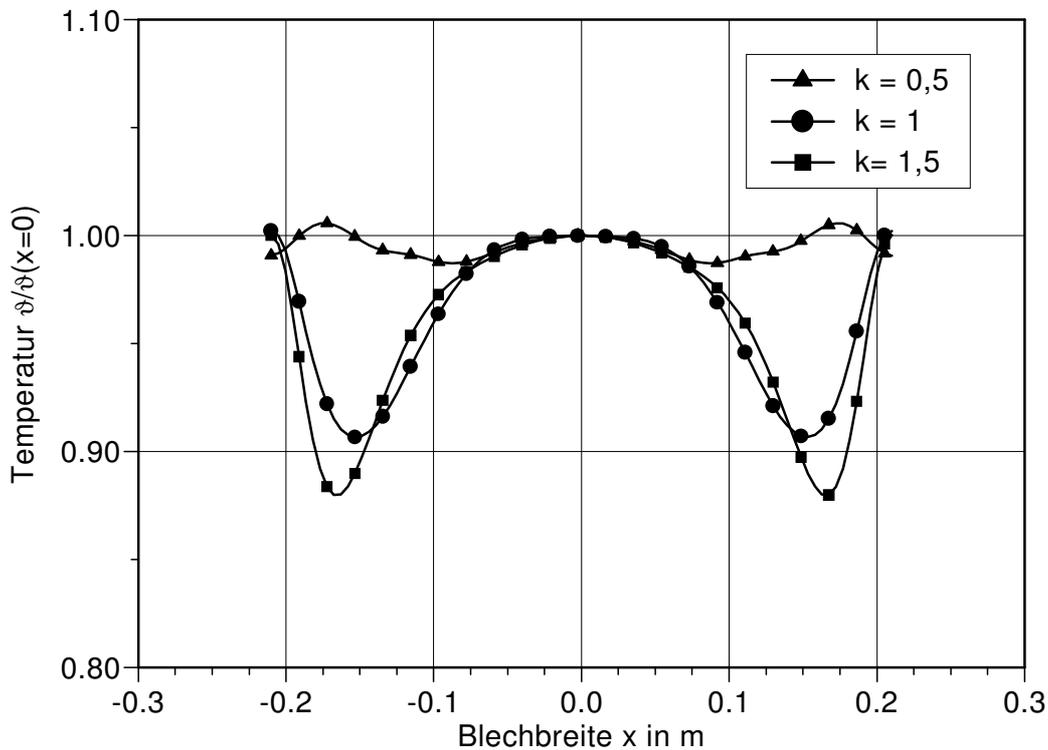


Abbildung 7.8: Optimierte Temperaturverläufe über der Blechbreite für verschiedene Spulenkopffaktoren

Der Vergleich der optimierten Temperaturverläufe für die drei unterschiedlichen Spulenkopfwerte ist in Bild 7.8 dargestellt. Durch die Reduzierung der Leiterbreite im Spulenkopfbereich kann der lokale Temperaturabfall zwischen Kanten- und Mittenbereich des Blechs angehoben werden. Mit steigendem Spulenkopffaktor ergibt sich eine ungleichmäßige Temperaturverteilung aufgrund des wachsenden Temperaturabfalls im beschriebenen Zwischenbereich.

2D-Optimierung

In der 2D-Optimierung wurden exemplarisch die Optima der einzelnen Kurven konstanter Polbreite in Bild 7.4 gesucht. Zum Einsatz kam für diese Aufgabe die von *Box* aus dem Simplex-

Verfahren entwickelte Complex-Methode (vgl. Abschnitt 5.2.2). Variiert wurde in den Optimierungsläufen nicht nur die Induktorlänge b_i sondern zusätzlich die Leiterbreite a_i . Aufgrund der konstant gehaltenen Polbreite war es nicht nötig, implizite Restriktionen zu implementieren. Die Angabe der expliziten Grenzen der Designvariablen reichte aus. Das verwendete deterministische Verfahren findet aufgrund der ausgeprägten Kurvenverläufe relativ schnell die gesuchten Minima und arbeitet damit sehr zuverlässig. Für einen Optimierungslauf werden im Schnitt 70 Berechnungsschritte benötigt. Das entspricht einer Rechenzeit von ca. 24 Stunden unter Verwendung eines Pentium III/500 MHz.

3D-Optimierung

Zu den bereits als Designvariablen verwendeten Größen b_i und a_i wird in diesem Schritt die Polbreite t als zu ändernder Wert in die Optimierung integriert. Mit der Polbreite wird intern die Frequenz auf den optimalen Wert angepaßt. In diesem Fall treten zum ersten Mal implizite Restriktionen auf, die bei der Optimierung sowohl beim Complex-Verfahren als auch beim genetischen Algorithmus berücksichtigt werden müssen. Die Länge des Blechpaketes, die sich bei einem runden Spulenkopf entsprechend der Gleichung (7.2) ergibt, darf nicht negativ werden. Um außerdem die Ausbildung eines runden Spulenkopfes zu gewährleisten, muß die Induktorlänge b_i einen Mindestwert in Abhängigkeit von a_i und t einhalten. Daraus läßt sich die erste Abhängigkeit der Designvariablen voneinander ableiten, die für verschiedene k durch

$$b_i > t - a_i(1 - 2k) \quad \text{für } k \geq 1 \quad (7.5)$$

$$b_i \geq t + a_i \quad \text{für } k < 1 \quad (7.6)$$

zu beschreiben ist. Weiterhin ist bei fester Polbreite eine maximale Größe für die Leiterbreite festgelegt, die die zweite zu berücksichtigende Abhängigkeit

$$a_i < t \quad (7.7)$$

darstellt. Diese Bedingungen werden in die Schnittstellenprogramme für die Complex-Methode, bzw. den genetischen Algorithmus, integriert und ebenso wie die zulässigen Bereiche der Designvariablen während der Optimierung berücksichtigt. Parameterkombinationen, die nicht im erlaubten Bereich liegen, werden nicht berechnet, bzw. bewirken beim genetischen Algorithmus, daß der Zielfunktion automatisch ein hoher Wert von 1000 zugeordnet wird.

Zunächst sind mit der 3D-Optimierung die drei Fälle, $k = 1$, $k = 1,5$ und $k = 0,5$ nachgerechnet worden, die bereits aufwendig in der 1D-Optimierung untersucht wurden. Dabei stellte sich heraus, daß ein Spulenkopffaktor von $k = 1$ der Suche nach dem Optimum mit dem deterministischen Complex-Verfahren Schwierigkeiten bereitet. Aufgrund des sehr weiten und flach ausgeprägten optimalen Bereiches läuft sich der Algorithmus nach einiger Zeit in einem vermeintlichen Mi-

nimum fest, obwohl beispielsweise etwas niedrigere Werte durch benachbarte Parameterkombinationen erreicht werden können (vgl. Bild 7.4). In diesem Fall bietet das stochastische Verfahren bessere Möglichkeiten, das Optimum zu finden. Ein effektives Vorgehen wäre die Kombination aus beiden Optimierungsmethoden. Mit dem stochastischen Verfahren kann in weiten Grenzen der Designvariablen der Zielbereich bestimmt werden. Mit einem verkleinerten zulässigen Bereich findet dann das deterministische Verfahren zuverlässiger den optimalen Punkt. Bei den anderen beiden untersuchten Spulenkopffaktoren $k = 1,5$ und $k = 0,5$ trat dieses Phänomen nicht auf. Die 3D-Optimierung mittels Complex-Verfahren führte jeweils zum gesuchten Minimum (vgl. Bilder 7.6 und 7.7).

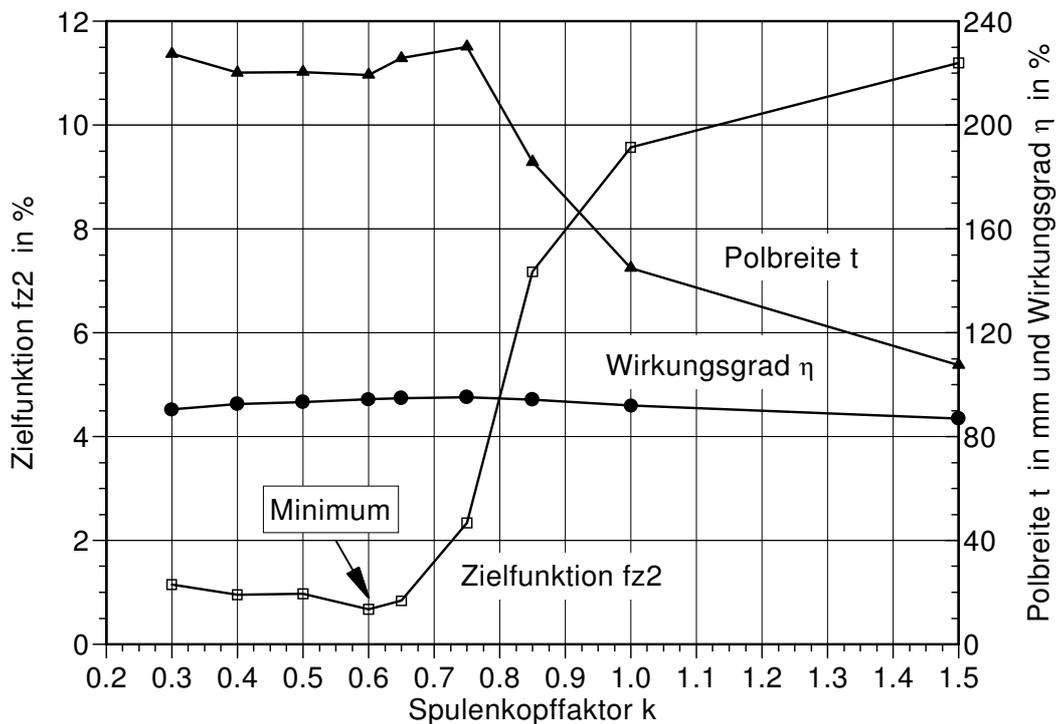


Abbildung 7.9: Zielfunktionswert f_{z2} , Polbreite t und elektrischer Wirkungsgrad η der Ergebnisse der 3D-Optimierungen

Weiterhin wurden 3D-Optimierungen für unterschiedliche Spulenkopffaktoren in den Grenzen von 0,3 bis 1,5 durchgeführt. In den meisten Fällen kam die Complex-Methode zum Einsatz. Aufgrund der oben beschriebenen Problematik war es in einigen Fällen notwendig, mit unterschiedlichen Startwerten und schrittweise eingeschränkten zulässigen Bereichen für die Designvariablen die Optimierung erneut durchzuführen. Wird ein Zielfunktionswert von verschiedenen Startpunkten aus mehrfach erreicht, ist die Wahrscheinlichkeit hoch, daß das globale Optimum gefunden ist. Ein 3D-Optimierungslauf mit dem Complex-Verfahren benötigt im Mittel 200 Berechnungsschritte. Das entspricht einer Rechenzeit von knapp drei Tagen auf einem Pentium III/500 MHz. Unter Verwendung des genetischen Algorithmus sind aufgrund der statistischen Verteilung der Parameterwerte im gleichen zulässigen Bereich wesentlich mehr Berechnungsschritte notwendig. Für die

3D-Optimierung werden 900 bis 1000 Optimierungsläufe benötigt, um mit hoher Wahrscheinlichkeit den optimalen Punkt zu finden, was einer Rechendauer von knapp 13 Tagen auf einem Pentium III/500 MHz entspricht. Allerdings ist hier kein weiterer Optimierungslauf mit veränderten Startwerten notwendig.

Die Ergebnisse der einzelnen 3D-Optimierungen sind in Bild 7.9 über dem Spulenkopffaktor zusammenfassend dargestellt. Abhängig vom Spulenkopffaktor k sind neben dem Zielfunktionswert f_{z2} die Polbreite t und der elektrische Wirkungsgrad η des jeweiligen Optimums eingezeichnet. Es ergibt sich bei einem Spulenkopffaktor von 0,6 mit großer Wahrscheinlichkeit ein globales Optimum. Zu kleineren Werten von k steigen die Zielfunktionswerte leicht an, während bei großen Werten von k die Temperaturverteilung mit über 10 % Temperaturspanne (f_{z2}) sehr inhomogen wird. Die zugehörige Polbreite ist im unteren Bereich des Spulenkopffaktors mit ca. 220 mm konstant und sinkt dann mit steigendem k auf 100 mm stark ab. Ein ähnliches Verhalten ist für die Leiterbreite a_i zu beobachten, die aus Übersichtsgründen nicht in Bild 7.9 aufgenommen wurde. Ihr Verlauf folgt dem der Polbreite, so daß sich Verhältnisse t/h von 0,3 bis 0,7 einstellen, die somit zu hohen elektrischen Wirkungsgraden führen. Der elektrische Wirkungsgrad weist ein schwaches Maximum in der Nähe von $k = 0,6$ auf und bestätigt somit die günstige Kombination der Parameter nicht nur hinsichtlich der Temperaturverteilung sondern auch bezüglich der energetisch effizienten Betriebsweise.

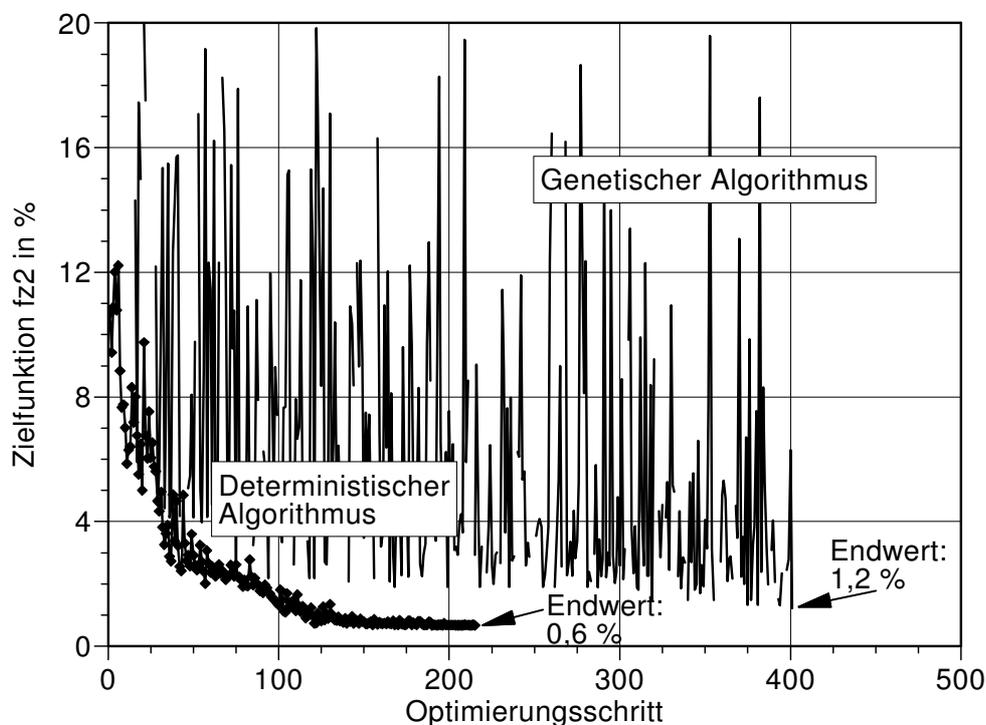


Abbildung 7.10: Verlauf der 3D-Optimierung für das deterministische Complex-Verfahren und den stochastischen genetischen Algorithmus

Die 3D-Optimierung bei einem Spulenkopffaktor von $k = 0,6$ als bestes Ergebnis ist sowohl mit

dem deterministischen Complex-Verfahren als auch unter Verwendung des genetischen Algorithmus durchgeführt worden. Die Verläufe der beiden Optimierungen sind in Bild 7.10 über den Optimierungsschritten dargestellt. Während das deterministische Verfahren nach 215 Berechnungsschritten das Optimum bei $f_{z2} = 0,6\%$ findet, erreicht der genetische Algorithmus nach 401 Schritten den doppelten Wert von $1,2\%$. Die von ihm bestimmten Werte für die Designvariablen liegen in der unmittelbaren Umgebung der mit dem deterministischen Verfahren gefundenen. Weitere 500 Berechnungsschritte des genetischen Algorithmus führen jedoch zu keiner Verbesserung des Zielfunktionswertes. Die Ursache hierfür liegt darin, daß aufgrund der internen Berechnung der Parameterkombinationen aus den zulässigen Bereichen nur bestimmte diskrete Werte der Designvariablen angenommen werden können. Um trotz der Nachteile des stochastischen Verfahrens dessen Vorteile nutzen zu können, sollten stochastische und deterministische Methoden nacheinander zur Lösung einer Optimierungsaufgabe eingesetzt werden, so daß die Vorteile der Methoden gewinnbringend bezüglich der Genauigkeit des Optimums und der verminderten Rechenzeit genutzt werden können. Mit dem stochastischen Verfahren sollte daher zu Beginn der Optimierung der Zielbereich der Parameter abgesteckt werden. Mit Hilfe der deterministischen Methode ist dann das Auffinden des Minimums innerhalb des abgesteckten Bereichs genauer und schneller möglich.

4D-Optimierung

Das Vorgehen der schrittweisen Erhöhung der Anzahl der Designvariablen ermöglicht in dieser frühen Phase der erstmaligen Kopplung von 3D-Berechnungsprogrammen für Querfelderwärmer mit mathematischen Optimierungsalgorithmen, Fehlerquellen von vornherein auszuschließen. Damit wird die Sicherheit erhöht, am Ende unter Einbeziehung sämtlicher Parameter in die Optimierung, ein zuverlässiges Ergebnis zu erhalten. Aus diesem Grund sind in dieser Arbeit die Teilergebnisse der Optimierungen mit sukzessive gesteigerter Anzahl an Designvariablen so ausführlich dargestellt. In zukünftigen Anwendungsfällen kann durchaus auf die vorhandenen Werkzeuge und Schnittstellenprogramme zurückgegriffen und auf die sehr aufwendige und zeitintensive Parameteranalyse verzichtet werden. In diesem Fall reicht eine 4D-Optimierung mit rundem Spulenkopf aus, um ein sehr homogenes Temperaturprofil zu erreichen. Unter Einbeziehung des Spulenkopffaktors wurde eine 4D-Optimierung realisiert, die nach ca. 300 Berechnungsschritten zum annähernd gleichen Ergebnis wie die 3D-Optimierung führt. Zusammen mit den Ergebnissen weiterer 4D-Optimierungen für die beiden zusätzlichen Spulenkopfformen mit abgerundeten Ecken und rechteckigem Spulenkopf sind sie in Bild 7.11 dargestellt.

Der niedrigste Wert für die Zielfunktion f_{z2} wird mit dem runden Spulenkopf erreicht. Er liegt mit $0,85\%$ etwas oberhalb des Minimums von $0,6\%$ der 3D-Optimierung. Der Unterschied ist auf die jeweils verwendeten Abbruchkriterien zurückzuführen. Es wurden für die 4D-Optimierung größere Abweichungen erlaubt, so daß das Ziel schneller jedoch weniger genau erreicht wird. Ein

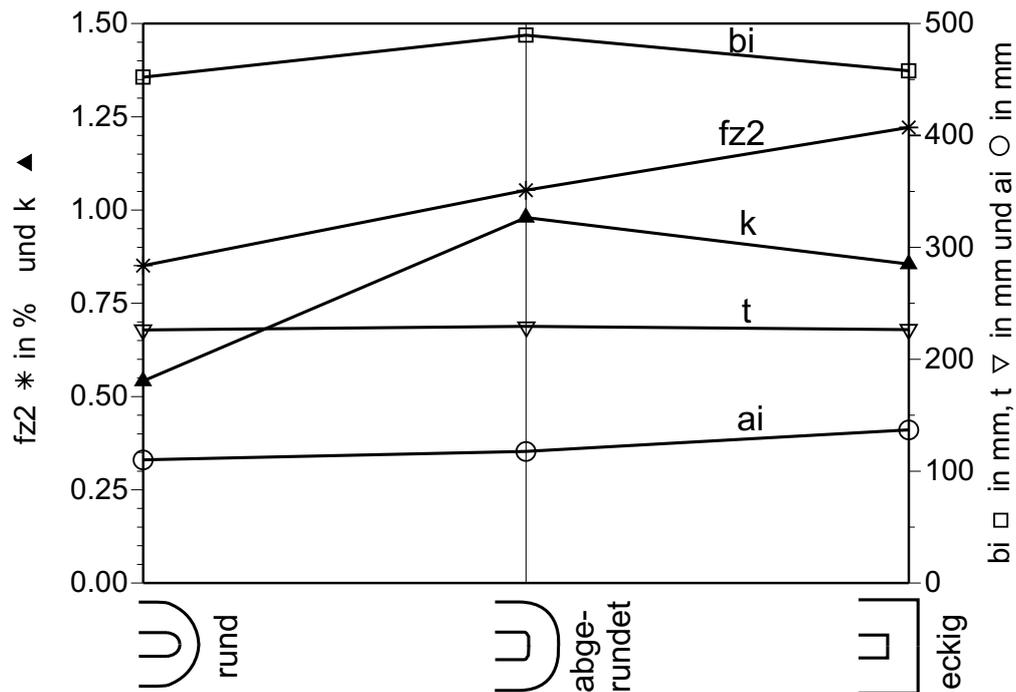


Abbildung 7.11: Vergleich unterschiedlicher Spulenkopfformen in der 4D-Optimierung

rechteckiger Spulenkopf führt in diesem Vergleich zur größten Temperaturschwankung von 1,2 %. Dazwischen ist der Spulenkopf mit abgerundeten Ecken angesiedelt, der zu einer maximalen Temperaturspanne von ca. 1 % führt. Für alle drei Spulenkopfgeometrien ergeben sich im optimalen Punkt ähnliche Werte für die Induktorklänge, die Leiterbreite und die Polbreite. Lediglich der Spulenkopffaktor variiert in den Grenzen von 0,54 bis 1.

7.2.2.3 Ergebnis der Temperaturoptimierung

Die 3D-Optimierung, in der das Abbruchkriterium strenger als in der 4D-Optimierung gewählt wurde, liefert für den vorliegenden industriellen Anwendungsfall die optimierte Geometrie für den Quersfelderwärmer. Die verwendeten Designvariablen mit ihren zulässigen Bereichen und dem Ergebniswert nach der Optimierung sind in Tabelle 7.5 zusammengefasst.

Zur Veranschaulichung der erhaltenen Geometrie ist der optimierte Quersfelderwärmer in Bild 7.12 dargestellt. Die Zuleitungen des Induktors sind in diesem Schritt der Auslegung nicht berücksichtigt worden. Ihr Einfluß ist jedoch Gegenstand der Untersuchungen in der Feinanalyse. Das obere Blechpaket ist in Bild 7.12 im Schnitt dargestellt, um den Blick auf den Spulenkopf freizugeben.

Mit der optimierten Geometrie ist es möglich, eine sehr homogene Temperaturverteilung mit äußerst geringen Zieltemperaturschwankungen über der Blechbreite einzustellen (Bild 7.13). Das Band läuft mit Umgebungstemperatur von 20 °C in die Erwärmungsanlage ein, erfährt eine Temperaturerhöhung von 280 K und verläßt den Induktor mit sehr homogenem Temperaturprofil über

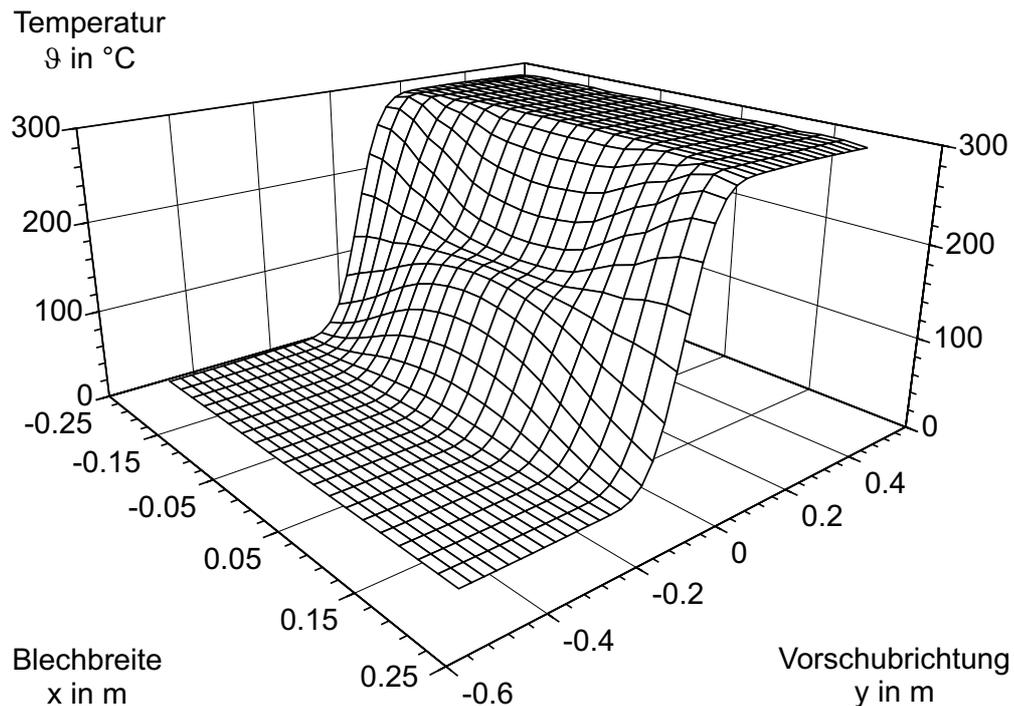


Abbildung 7.13: Temperaturverteilung der optimierten Anlage für 0,8 mm dickes CuZn37-Blech

Temperaturverteilung. In der Optimierung kann die Flächenleistungsdichte durch die Variation der Geometrie derart angepaßt werden, daß im Zusammenwirken mit den anderen oben beschriebenen Effekten das gewünschte Temperaturprofil erzielt wird.

Zum tieferen Verständnis des Optimierungsergebnisses ist in Bild 7.14 die Flächenleistungsdichte über der gesamten Erwärmlänge dargestellt. Die Kontur der Spule spiegelt sich in der Verteilung der Flächenleistungsdichte wider und führt zu einer sehr ungleichmäßigen Verteilung des Leistungseintrages. Diese Verteilung stellt aufgrund des Einsatzes mathematischer Methoden das Optimum nach einer orientierten direkten Suche dar. Die Temperaturverteilung im Blech ergibt sich aus der Flächenleistungsdichte durch die integrierende Wirkung des Bandvorschubes unter Berücksichtigung der thermischen Ausgleichsvorgänge und der Wärmeverluste. Bei sehr hohen Bandgeschwindigkeiten und geringen Wärmeverlusten bestimmt nahezu allein die Leistungseinbringung in Verbindung mit dem Vorschub des Bandes die Temperaturverteilung. Die Temperaturen über der Blechbreite am Erwärmlerausgang sind in diesem Fall proportional zum Integral der Flächenleistungsdichte in Vorschubrichtung, so daß bereits die translatorische Bewegung des Bandes für eine Homogenisierung der Temperatur sorgt.

Das Band läuft in die Erwärmerzone ein und erfährt zunächst nur im mittleren Bereich durch die Leistungsumsetzung unterhalb des in Vorschubrichtung gesehen vorderen Induktorschenkels eine Erwärmung. Beim Durchlauf werden dann die Kanten des Blechs durch die Leistungsüberhöhungen aufgrund des Überstandes der Spulenköpfe überproportional erwärmt. Durch den anschließenden Leistungseintrag aufgrund der Wirkung des hinteren Induktorschenkels kann die Kantenüber-

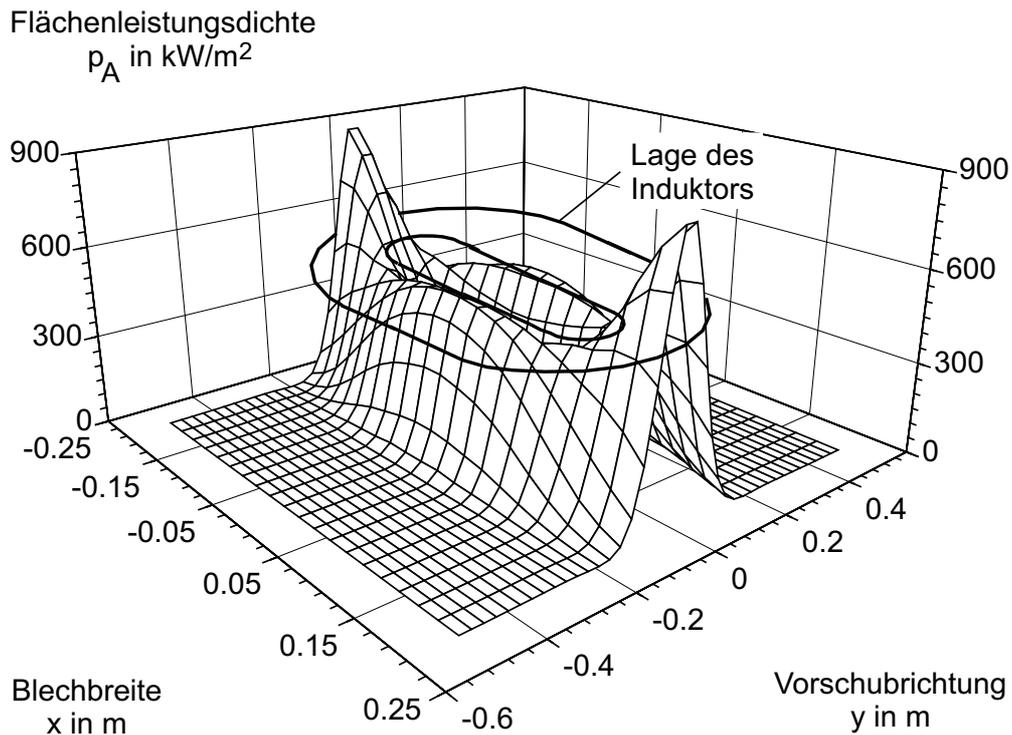


Abbildung 7.14: Verteilung der Flächenleistungsdichte p_A für die optimierte Anlage mit schematisch dargestelltem Induktor

hitzung nahezu ausgeglichen werden. Thermische Ausgleichvorgänge führen zu einer zusätzlichen Vergleichmäßigung der Temperatur quer zur Vorschubrichtung.

Der elektrische Wirkungsgrad der Anlage liegt mit $\eta = 94,4\%$ für das hoch leitfähige Messingmaterial weit oberhalb des Wirkungsgrades, der mit der Längsfelderwärmung erreicht werden kann. Maximal ist dort nur ein Wert von $65,8\%$ realisierbar (vgl. Abschnitt 3.3). Der Leistungsfaktor kann für den Induktor ohne Stromzuführungen mit $\cos \varphi = 0,79$ angegeben werden. Für das betrachtete Blech mittlerer Stärke von $0,8\text{ mm}$ ergibt sich eine notwendige Spannung von $12,6\text{ V}$ für die Reihenschaltung der beiden ober- und unterhalb des Blechs positionierten einwindigen Spulen. Der sich einstellende Strom liegt dann bei ca. 5800 A , so daß sich eine Gesamtleistung von $58,4\text{ kW}$ ergibt.

7.3 Feinanalyse und technische Realisierung

Nach der mathematischen Optimierung ist die Überprüfung möglicher parasitärer Effekte notwendig. Auch wenn während des Designs die speziellen Auslegungskriterien für Querfelderwärmer (vgl. Kapitel 3) berücksichtigt wurden, ist dieser Schritt unerlässlich, um das Risiko zu vermindern, Unzulänglichkeiten erst im Experiment oder sogar an der Industrieanlage aufzudecken.

Der Überführung der mathematischen in eine technische Lösung ist der letzte Abschnitt dieses

Kapitels gewidmet. Es wird die zur Verifikation der Auslegungsmethode installierte Laboranlage erläutert sowie die daran durchgeführten Messungen beschrieben und diskutiert. Weiterführende praktische Hinweise für die industrielle Umsetzung schließen die Arbeit ab.

7.3.1 Untersuchung möglicher parasitärer Effekte

Die Verfeinerung des Berechnungsnetzes führte in dem hier betrachteten Fall zu keinen signifikanten Änderungen hinsichtlich des Optimierungsergebnisses. Die Vernetzung während der automatischen Optimierung mit einer festen Anzahl an Boundary-Elementen, die in ihrer Größe verändert wurden, ist fein genug gewählt worden, um ein hinreichend genaues Ergebnis zu erhalten.

Laut der Definition der Anforderungen an die Erwärmungsanlage ist mit Bandführungsschwankungen in horizontaler Richtung von ± 5 mm zu rechnen. Die Untersuchung des Einflusses derartiger Bandverschiebungen, durch die die relative Lage des Induktors zu den Blechkanten verändert wird, führt zu den in Bild 7.15 dargestellten Ergebnissen. Die Temperaturen im Kantenbereich weichen bei einem Versatz von 5 mm bereits um 10 % von der Temperatur in der Blechmitte ab. Der Temperaturverlauf ist dabei unsymmetrisch ausgeprägt, da es durch die seitliche Verschiebung des Blechs auf der einen Seite zu einem Induktorüberstand mit Kantenüberhitzung und auf der anderen Seite zu einem Induktorrückstand mit Kantenunterkühlung kommt. Bei einer extremen Verschiebung um 15 mm steigt die Temperaturdifferenz zwischen Kante und Blechmitte auf knapp 30 % an. Kann diese Betriebsweise nicht ausgeschlossen werden, so ist in diesem Fall eine entsprechende Regelungseinheit mit Kantendetektion zur Induktornachführung vorzusehen.

Bei der zu erwartenden horizontalen Verschiebung von 5 mm ist es möglicherweise in dem hier betrachteten Anwendungsfall ausreichend, keine Nachführung des Induktors zu installieren, da es sich um eine Vorerwärmung handelt. Das Band erfährt in dem nachgeschalteten Gasofen auf längerer Strecke einen weiteren Temperaturhub, so daß der Ausgleich über der Blechbreite möglich sein müßte.

Der Einfluß vertikaler Schwankungen des Blechs im 40 mm hohen Koppelspalt wurde untersucht, indem Berechnungen mit zwei unterschiedlichen Werten für den Versatz nach oben durchgeführt wurden. Der auf die Temperatur in der Mitte des Blechs normierte Temperaturverlauf ist in Bild 7.16 dargestellt. Die Auswirkungen auf die Temperaturverteilung durch einen 5 mm bzw. 10 mm Versatz sind sehr gering und liegen unterhalb von 2 %.

Zur Überprüfung des Einflusses thermomechanischen Spannungen wurden numerische Berechnungen der Deformationen mit dem kommerziellen Programm ANSYS durchgeführt. Dabei wird davon ausgegangen, daß das in den Erwärmer einlaufende Band keine mechanischen Eigenspannungen aufweist und die während der Erwärmungsphase auftretenden Verformungen ausschließlich elastischer Art sind. Die Bandvorspannung in Vorschubrichtung beträgt $f_{Sy} = 3 \text{ N/mm}^2$ und

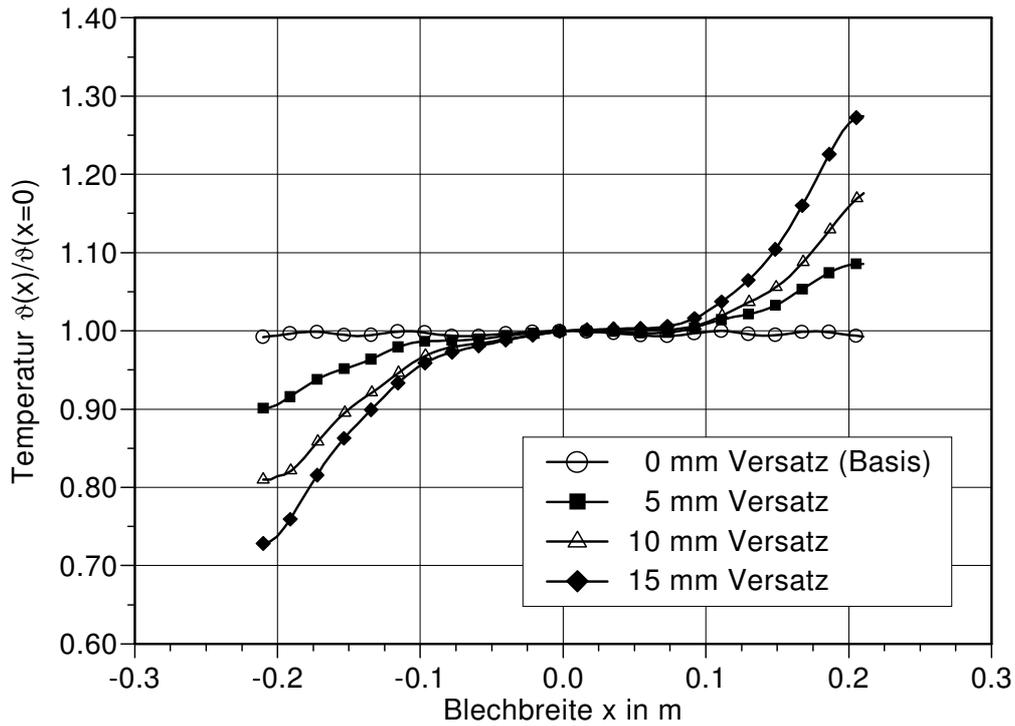


Abbildung 7.15: Normierte Temperaturverteilung über der Blechbreite am Erwärmerausgang für verschiedene horizontale Verschiebungen

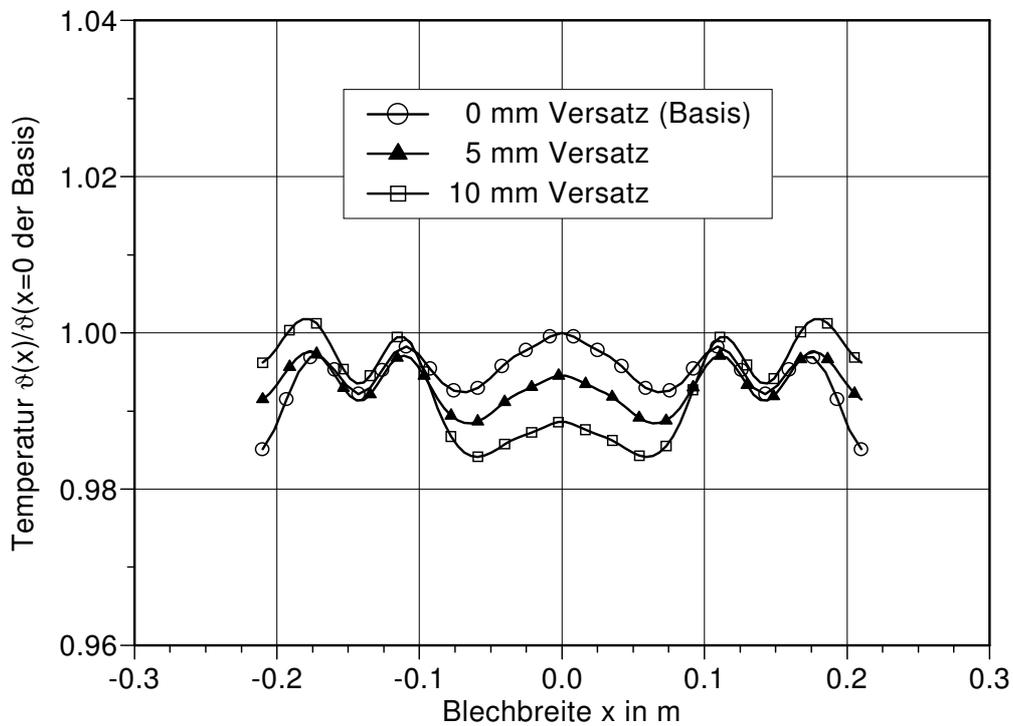


Abbildung 7.16: Normierte Temperaturverteilung über der Blechbreite am Erwärmerausgang für verschiedene vertikale Verschiebungen

entspricht praxisnahen Bedingungen.

Als Eingangsgröße wird zunächst eine idealisierte Temperaturverteilung ohne Temperaturunterschiede über der Blechbreite untersucht. Das Band läuft dabei mit $\vartheta_E = 20^\circ\text{C}$ in den Erwärmer ein, erfährt in der Erwärmerzone von $l_E = 440\text{ mm}$ Länge einen linearen Temperaturanstieg und verläßt den Erwärmer mit der Endtemperatur $\vartheta_A = 300^\circ\text{C}$. Im Band kommt es allein aufgrund der Temperaturerhöhung in der Erwärmungszone zu thermischen Spannungen, die Deformationen verursachen. In den Übergangsbereichen am Ein- und Ausgang der Erwärmerzone treten drei ausgeprägte Beulungsbereiche auf. Die maximale Verschiebung $|u_{z,max}|$ beträgt in diesem Fall 7,2 mm.

Das Ergebnis der Deformationsberechnung, das auf dem numerisch ermittelten Temperaturfeld der optimierten Anlage basiert, ist in Bild 7.17 dargestellt. Hier sind die drei Deformationsbereiche in den Übergangsbereichen am Ein- und am Ausgang des Erwärmers zu erkennen. Die maximale Verschiebung beträgt $|u_{z,max}| = 7,0\text{ mm}$ und liegt damit sogar etwas unterhalb des Wertes der Vergleichsrechnung mit idealisierter Temperaturverteilung. Beide maximalen Verschiebungen bewegen sich innerhalb der Abmessungen des lichten Spaltes. Ein mechanischer Kontakt des Bandes mit dem Induktor oder den Blechpaketen aufgrund thermischer Verformungen ist damit unwahrscheinlich.

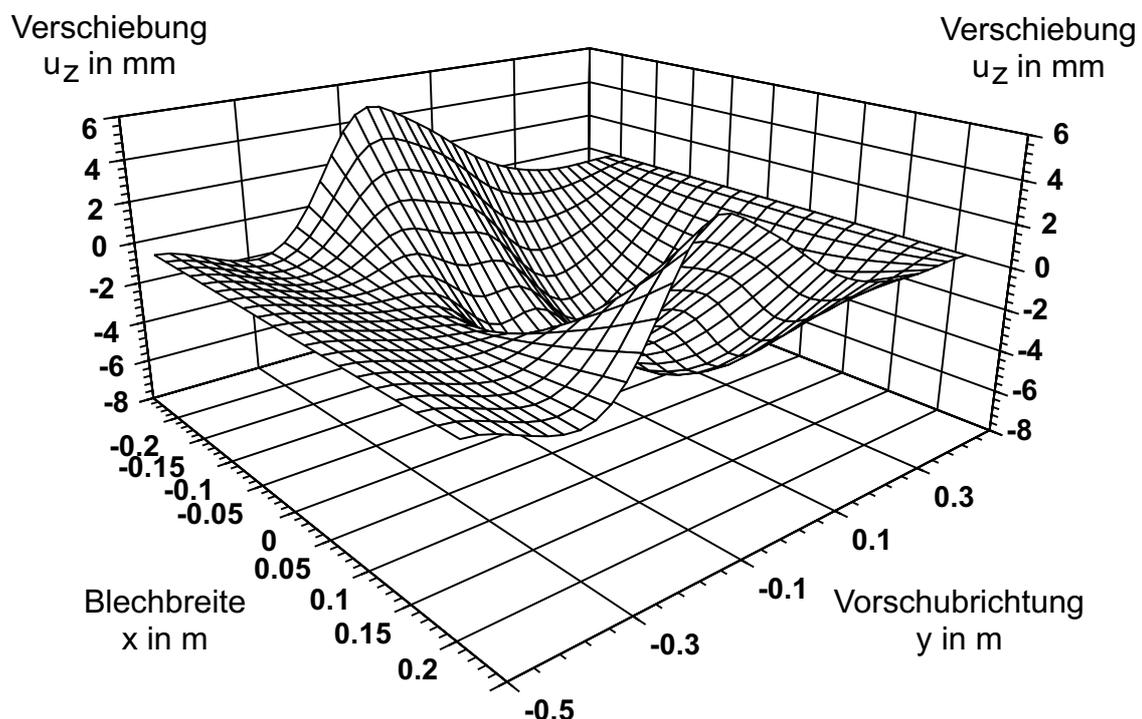


Abbildung 7.17: Deformation aus der Ebene bei der optimierten Erwärmung des Messingbandes.

$$d = 0,8\text{ mm}, f_{Sy} = 3\text{ N/mm}^2, \vartheta_A - \vartheta_E = 300^\circ\text{C}$$

Die analytische Abschätzung der Deformation ergibt nach Gleichung (6.14) eine maximale Verschiebung von $|u_{z,max}| = 7,9\text{ mm}$ und stimmt gut mit den numerisch ermittelten Werten überein. Dabei wurde ebenfalls von einem Temperaturhub von 280 K und der gleichen Erwärmungslänge

von $l_E = 440$ mm ausgegangen.

Mit Verformungen in dieser Größenordnung ist für nahezu alle Blechdicken zu rechnen, da für das Verhältnis $b_s/d > 300$ die Verformungen annähernd unabhängig von der Blechdicke sind [20]. Lediglich für die großen Blechdicken von 1,3 mm bis 1,5 mm kann von einer Verminderung der Deformation ausgegangen werden.

Aufgrund der Verwendung eines Blechpaketes mit Polen, das primär zur Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades vorgesehen wurde, ist nicht mit erhöhten Streufeldwerten im Umgebungsbereich der Anlage zu rechnen. Das Blechpaket dient somit nicht nur der Erhöhung der Feldkonzentration, sondern führt durch die Abschwächung der Streufelder im Außenbereich zu einem unbelasteten Arbeitsbereich, in dem zusätzlicher Personenschutz durch Abschirmmaßnahmen oder zeitlich beschränkte Aufenthaltszeiten nicht notwendig ist. Die Gefahr einer parasitären Erwärmung konstruktiver Elemente in unmittelbarer Umgebung zum Induktor wird dadurch reduziert.

7.3.2 Überführung der mathematischen in eine technische Lösung

Die in der automatischen Optimierung erhaltenen mathematischen Ergebnisse müssen im nächsten Schritt in eine technisch realisierbare Lösung überführt werden. Dazu werden in diesem Abschnitt die Möglichkeiten der Spulen- und Blechpaketgestaltung diskutiert. Anschließend folgt die Übertragung der Ergebnisse des Basisblechs aus CuZn37 von 0,8 mm Dicke auf sämtliche vorkommenden Materialien und Blechdicken, die in den Anforderungen festgelegt sind.

Spulen

Zunächst ist die Geometrie der Spulen hinsichtlich der Windungszahl und der Art der Spulenanschlüsse anzupassen, da diese bisher nicht berücksichtigt wurden. Um eine homogene Stromverteilung in den Induktoren zu erhalten, wie es stets in der numerischen Berechnung vorausgesetzt wurde, sollten die Spulen aus möglichst vielen Windungen bestehen. Dies wirkt sich gleichzeitig vorteilhaft auf die sonst sehr niedrige notwendige Anschlußspannung aus. Die maximale Anzahl an Windungen ist jedoch durch die Geometrie des Spulenquerschnitts begrenzt. Ein realistischer Wert für die Anzahl der Windungen liegt bei vier für die Leiterbreiten von 73 mm bis 122 mm. Die notwendige Anschlußspannung steigt dann auf 50 V bis 63 V an.

Die Auslegung der Spulenanschlüsse geschieht wiederum auf numerischem Wege. In einer elektromagnetischen 3D-Berechnung wird die vollständige Geometrie der Spulen inklusive der vier Windungen und der Zuleitungen modelliert. Eine automatische Variation unterschiedlich ausgeprägter Anschlüsse ist aufgrund der komplizierten Anordnung hier nicht mehr möglich. Daher werden manuell verschiedene konstruktive Lösungen gewählt und numerisch berechnet. Als Basisgeometrie wird die optimierte Spule verwendet, an deren einem Spulenkopf nun die Zuleitungen

angeschlossen werden. Auf der gegenüberliegenden Seite bleibt die Spulenkopfform unverändert, so daß hier die Temperaturverteilung der im vorherigen Abschnitt optimierten entsprechen sollte. Die konkrete Optimierungsaufgabe für die Anschlüsse besteht nun darin, die Anschlußseite so zu gestalten, daß eine symmetrische Verteilung der Temperatur über der Blechbreite entsteht.

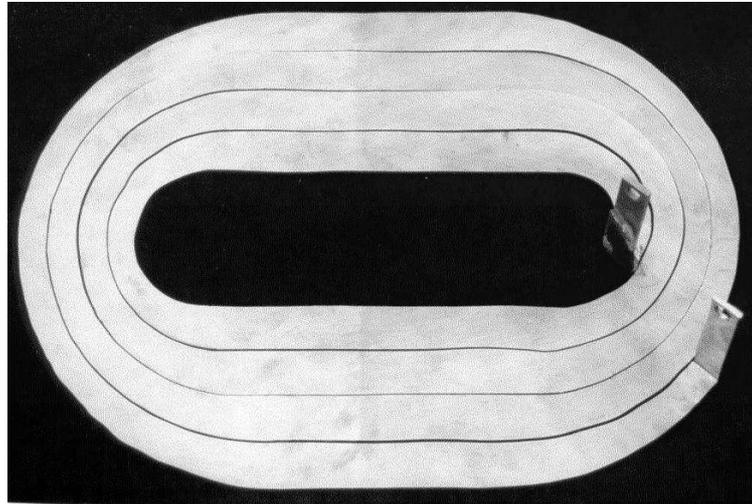


Abbildung 7.18: Kupferspule mit idealem Spulenkopf (links) und Anschlußseite mit manuell optimiertem Spulenkopf (rechts)

Die manuell durchgeführten Berechnungen liefern die mechanischen Ansatzpunkte der Anschlüsse an die Spule sowie die Gestaltung der Leiterbahnen im veränderten Spulenkopf. Vom Ansatzpunkt der Anschlüsse werden die Zuleitungen jeweils senkrecht von der Induktorebene nach außen vom Blech weg geführt (Bild 7.18). Dies und die Verwendung von Blechpaketen soll bewirken, daß die flexiblen Verbindungsleitungen zwischen den in Reihe geschalteten Induktoren sowie die Leitungen zum Umrichter keinen Einfluß auf die Stromverteilung und damit auf die Temperaturverteilung im Blech nehmen.

Der elektrische Wirkungsgrad für CuZn37-Blech der Dicke 0,8 mm liegt mit 94,4 % sehr hoch. In diesem Fall ist eine weitere Verbesserung des Wirkungsgrades nicht unbedingt notwendig, jedoch sinnvoll, wenn der dazu erforderliche technische Aufwand die eingesparten Betriebskosten rechtfertigt. Es ist zu überprüfen, ob sich der Einsatz von Multilayer-Induktoren zur Reduzierung der Induktorverluste rechnet. Hierzu sind numerische Untersuchungen mit dem Programmpaket ANSYS durchgeführt worden. Da die Spulenverluste im regulären Bereich maßgeblich die Gesamtverluste des Induktors bestimmen, reichen 2D-Berechnungen zur Analyse des Einflusses mehrerer Leiterlagen aus. So wurden Simulationen für das CuZn37-Basisblech von 0,8 mm Dicke bei einer Frequenz von 255 Hz durchgeführt, die das Potential zur Wirkungsgradverbesserung durch Multilayer-Induktoren aufzeigen. Zum Einsatz kam hier das interne Optimierungswerkzeug des ANSYS-Paketes, mit dem die jeweilige optimale Dicke der Leiter d_{Ind} gefunden wurde (vgl. Abschnitt 4.3).

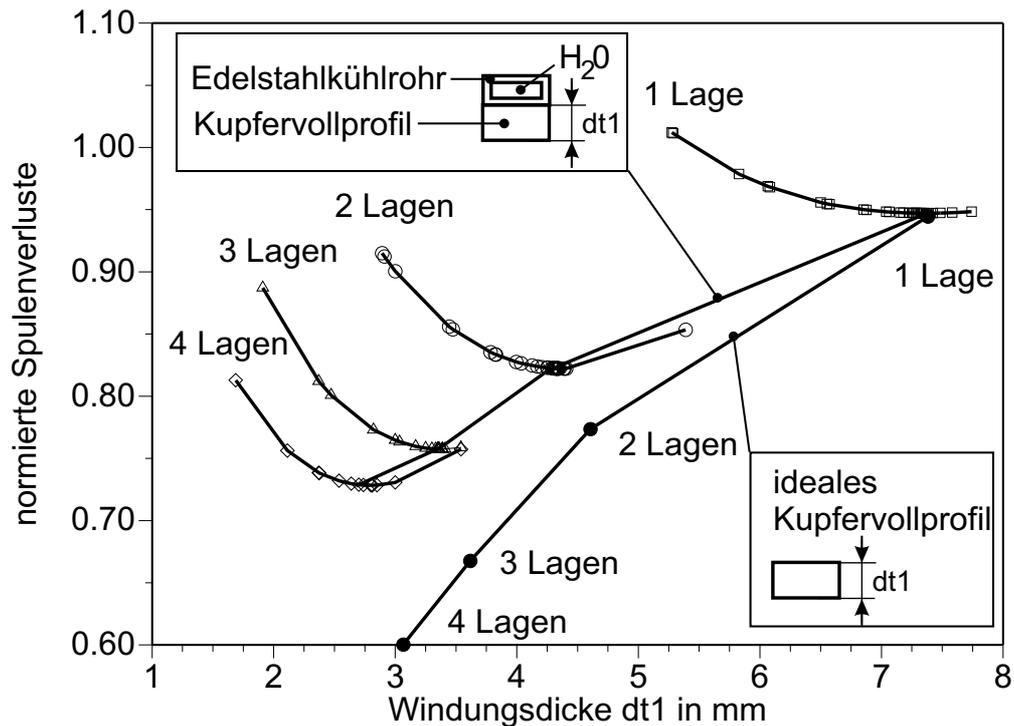


Abbildung 7.19: Spulenverluste von Multilayer-Induktoren aus idealen Kupfervollprofilen und aus Kupferprofilen mit externer Kühlung durch ein Edelstahlrohr normiert auf die Verluste des einlagigen Kupferhohlprofils mit $d_{\text{Ind}} = \frac{\pi}{2}\delta$

Die Untersuchungen des Einflusses von mehreren Lagen aus Kupferhohlprofil ergeben, daß in diesem Frequenzbereich und bei einer Wanddicke des Kupferkühlrohres von 2 mm keine Verbesserung des Wirkungsgrades erreicht werden kann. Es kommt sogar zu einer Verschlechterung, da in den Wänden des Kühlrohres parasitäre Ströme fließen, die zu zusätzlichen Verlusten führen. Beispielsweise steigen beim Einsatz von zwei Lagen aus Kupferhohlprofilen, deren Dicke d_{Ind} optimal angepaßt wurde, die Verluste im Vergleich zur einlagigen Ausführung um 17 % an.

Eine wirksame Lösung stellt das ideale rechteckige Kupfervollprofil dar. Hier würden sich die Spulenverluste bei einer Zweilagenausführung auf 77,5 % der Basisanordnung aus einlagigem Kupferhohlprofil reduzieren (Bild 7.19). Die Steigerung auf vier Lagen würde sogar zu Spulenverlusten von 60 % der Basisanordnung führen. Diese Ausführung ist jedoch für den industriellen Dauereinsatz ungeeignet, da die maximal mögliche Luftkühlung durch erzwungene Konvektion nicht ausreichen würde, um die entstehende Verlustwärme abzuführen. Aus diesem Grund wurde eine weitere Variante untersucht, bei der auf ein rechteckiges Kupfervollprofil ein Edelstahlrohr geringerer elektrischer Leitfähigkeit zur Wasserkühlung aufgebracht wurde. Die Ergebnisse der Berechnungen sind ebenfalls in Bild 7.19 dargestellt. Die entsprechenden Kurven ergeben sich durch die in ANSYS durchgeführte 1D-Optimierung mit der Windungsdicke d_{Ind} als Designvariable. Die Verluste liegen im Vergleich zum idealen Kupfervollprofil etwas höher, bieten aber immer noch ein Einsparpotential an, das sich unter Umständen wirtschaftlich rechnen kann. Allein durch

den Einsatz einer einlagigen Schicht dieser Induktoren werden die Verluste um fünf Prozentpunkte gegenüber den Verlusten der reinen Kupferhohlprofile gesenkt. Durch eine zweilagige Anordnung können die Spulenverluste bereits auf 82 % der Verluste des Vergleichsinduktors reduziert werden.

Feldführende Elemente

Die Gestaltung der Blechpakete richtet sich nach dem Verlauf des elektromagnetischen Feldes. Um Wirbelströme im feldführenden Paket zu verhindern, sollten dünne, dem Frequenzbereich angepaßte Bleche verwendet werden, die in der yz -Ebene liegen und in x -Richtung geschichtet sind (vgl. Bild 7.12).

Die erweiterte Optimierung der Anschlüsse der Spulen hat aufgrund der Neugestaltung des einen Spulenkopfes eine Anpassung der in Abschnitt 7.2.2.3 beschriebenen optimierten Blechpakete zur Folge. Die veränderte Geometrie der Spule bewirkt eine notwendige Vergrößerung der Blechpaketlänge b_m um 6 mm. Dies ist einfach durch Hinzufügen weiterer Bleche zu bewerkstelligen.

Prozeßführung und zusätzliche Anlagenkomponenten

Der für das Basisblech ausgelegte Induktor läßt sich für sämtliche auftretenden Kombinationen aus Blechmaterial und -dicke allein durch die Anpassung der Frequenz und der Leistung verwenden. Wie in den Abschnitten 3.2 und 6.5 beschrieben, sind dazu die Proportionalitäten für die Frequenz $f \sim 1/\kappa d$ und für die Leistung $P_{theo} \sim \Delta \partial dv$ auszunutzen. Unter Berücksichtigung dieser Abhängigkeiten kann ausgehend von den Werten des Basisblechs die Tabelle 7.6 aufgestellt werden. In ihr sind neben den Vergleichsdaten für 0,8 mm die Eckwerte für das dünnste Blech mit 0,3 mm und das dickste Blech mit 1,5 mm Dicke der beiden Materialdaten mit extremen Werten für die physikalischen Eigenschaften eingetragen. Die Leistungswerte ergeben sich auf der Grundlage eines um 30 % gesteigerten Vorschubes. Alle Zwischenwerte für andere Blechdicken oder -materialien können daraus berechnet werden. Eine meßtechnische Überprüfung dieser Betriebsdaten an der späteren Anlage ist jedoch unerläßlich, da unter realen Bedingungen Abweichungen von den gegebenen Werten möglich sind.

Es ergibt sich ein Frequenzbereich von 46 Hz bis 680 Hz, für den der Umrichter ausgelegt sein muß. Die maximal notwendige theoretische Leistung von 66 kW führt bei einem elektrischen Wirkungsgrad der Spulen von 87 % für die Erwärmung von reinem Kupfer zu einer bereitzustellenden Leistung von mindestens 76 kW. Unter der Berücksichtigung der thermischen Verluste, der Zuleitungs-, Transformator- und Umrichterverluste sowie eines Sicherheitsfaktors von 1,2 ergibt sich eine zu installierende Mindestleistung von 100 kW.

Die Bereitstellung der notwendigen Leistungen und Frequenzen könnte im vorliegenden Fall aufgrund des hohen Leistungsfaktors von ca. 0,8 auch durch einen frequenzvariablen Umrichter ohne

Tabelle 7.6: Frequenz- und Leistungsdaten für die industrielle Anlage in Abhängigkeit von der Blechdicke d und des Blechmaterials für $\Delta\vartheta = 280\text{ K}$

Blechdicke d	Vorschub v_{neu} in m/min	Frequenz f in Hz		P_{theo} in kW	
		CuZn37	E-Cu57	CuZn37	E-Cu57
0,3	31,5	680	230	63	66
0,8	11,8	255	86	63	66
1,5	6,2	136	46	63	66
Abhängigkeit	$1,3 \cdot v_{alt}$	$\sim \frac{1}{d}$	$\sim \frac{1}{d\kappa}$	$\sim \Delta\vartheta v$	$\sim \Delta\vartheta v c_p$

Kompensationseinheit und Anpaßtransformator bewerkstelligt werden. Dadurch wäre eine Veränderung der Frequenz in weiten Bereichen sehr flexibel möglich. Eine jeweilige Anpassung des Schwingkreises eines herkömmlichen Umrichters würde dabei entfallen. Aufgrund des Leistungssteuerprinzips treten jedoch bei diesem beschriebenen frequenzvariablen Umrichtertyp nichtsinusförmige Lastströme auf, deren Einfluß auf das Temperaturprofil zunächst überprüft werden müßte. Das mögliche Auftreten der höheren Frequenzen dritter und fünfter Ordnung könnte zu einer Kantenüberhitzung führen, so daß mit einem angepaßten mathematischen Modell, eine erneute Optimierung notwendig wird. Der Einsatz eines frequenzvariablen Umrichters ist jedoch vielversprechend hinsichtlich eines flexiblen Betriebs und verminderter Investitionskosten und sollte weiter verfolgt werden.

7.3.2.1 Realisierung als Laboranlage

Zur Überprüfung der numerisch ermittelten Ergebnisse wurde im Institut für Elektrowärme eine Laboranlage installiert, die die Verhältnisse des späteren industriellen Querfelderwärmers im Originalmaßstab 1:1 abbildet. Um vergleichbare Temperaturmessungen durchführen zu können, wurde ein einfaches mechanisches System zur Realisierung des Bandvorschubes konstruiert. Die Gestaltung der gesamten Anlage wurde dabei sehr flexibel gehalten, um in den Tests die Untersuchung unterschiedlichster Einflüsse planen zu können. So ist es beispielsweise auch möglich, spezielle Störfälle nachzustellen und ihre Wirkung auf den Betrieb der Anlage zu überprüfen.

Laboranlage und verwendetes Meßsystem

Die Anforderungen an die Laboranlage sind so zu definieren, daß die Laboranlage die Bedingungen in der Praxis ohne Einschränkungen abbildet. Komplizierte und aufwendige Elemente sollten dabei jedoch vermieden werden, um den konstruktiven Aufwand in Grenzen zu halten. Aus diesen

Gründen wurde der elektrisch aktive Teil der Laboranlage in realen geometrischen Abmessungen gestaltet, jedoch die gesamte Peripherie so einfach wie möglich gehalten. Der Induktor und das Blechpaket wurden so ausgeführt, daß das Originalblech aus dem industriellen Beispiel verwendet werden konnte. Zur Überprüfung des Betriebsverhaltens der Anlage und im speziellen zur Messung der Temperaturverteilung am Ausgang des Erwärmers ist das Erreichen des stationären Zustandes und der Betrieb in diesem für eine bestimmte Meßzeit notwendig. Dazu ist es ausreichend, ein genügend langes Stück Blech durch die Anlage zu führen, ohne aufwendige Haspeln zum Auf- und Aufwickeln von sogenannten Coils installieren zu müssen. Ebenso sind hinsichtlich des Erwärmungsvorganges selbst Vereinfachungen möglich. Aufgrund der geringen Wärmeverluste des Blechs durch Strahlung und Konvektion ist es möglich, auch auf niedrigerem Temperaturniveau aussagekräftige und übertragbare Messungen durchzuführen. Da die Anlage nicht für den Dauerbetrieb ausgelegt sein muß, sondern kurzzeitige Messungen genügen, kann auf eine Kühlung der Systemkomponenten, vor allem der Spule, verzichtet werden.

Die Spulen wurden entsprechend der Geometrie des optimierten Designs gestaltet. Dazu wurden aus Messing- bzw. Kupferplatten die genauen Konturen der Leiterbahnen gesägt. Dieses Verfahren bietet den Vorteil, die Geometrie der Spule, speziell mit den schmalen Spulenköpfen, exakt nachbilden zu können. Die Anschlüsse wurden entsprechend der manuellen Verbesserung an den optimierten Anschlußpunkten nach außen abgeführt (siehe Bild 7.18). Auf eine Wasserkühlung der Spulen wurde verzichtet. Die Induktoren mit ihren spiralförmig verlaufenden vier Windungen stellen ein mechanisch sehr instabiles Gebilde dar. Um einen Kurzschluß zwischen den Windungen zu vermeiden und den Einbau in die Blechpakete zu erleichtern, wurden die Induktoren auf Pertinaxplatten geklebt. Der Kleber fungiert auf diese Weise gleichfalls als Isolation zwischen den Leiterbahnen. Der kompakte und stabile Aufbau des aktiven Teils wird erreicht, indem Spule und Blechpaket in eine Holzhalterung integriert werden. Sämtliche konstruktive Elemente bestehen aus nicht ferromagnetischen Materialien, um das elektromagnetische System so wenig wie möglich zu beeinflussen. Die analytische Abschätzung der Erwärmung des Induktors durch Stromwärmeverluste in der Zeit eines Versuches ergab eine Erhöhung der Temperatur um ca. 11 K bei Messing und 3 K bei Kupfer. Für die Herstellung der Blechpakete wurden im vorliegenden Fall Transformatorbleche der Dicke 0,35 mm für Frequenzen bis 1000 Hz verwendet. Die Bleche wurden vor der beidseitigen Isolationsbeschichtung im Herstellerwerk bereits in die notwendige geometrische Form gebracht. Zur Fixierung der Blechpakete wurden diese zwischen zwei durch Messingschrauben verbundene Holzplatten geklemmt und so in die Holzhalterung integriert.

Unter Beachtung der Einschwingzeit des Umrichters sowie der thermischen Ausgleichvorgänge ist es ausreichend, ein Blech mit einer Länge von zwei Metern kontinuierlich durch die Anlage zu transportieren. Das Blech wird im gespannten Zustand mit Hilfe eines Rahmens durch den Erwärmer bewegt. Für den Vorschub erwies sich eine Gewindestange, die von einem Gleichstrommotor angetrieben wird, als geeignet (Bild 7.20). Mit dieser Konstruktion sind realistische Vorschubge-

schwindigkeiten von 10 m/min erreichbar.

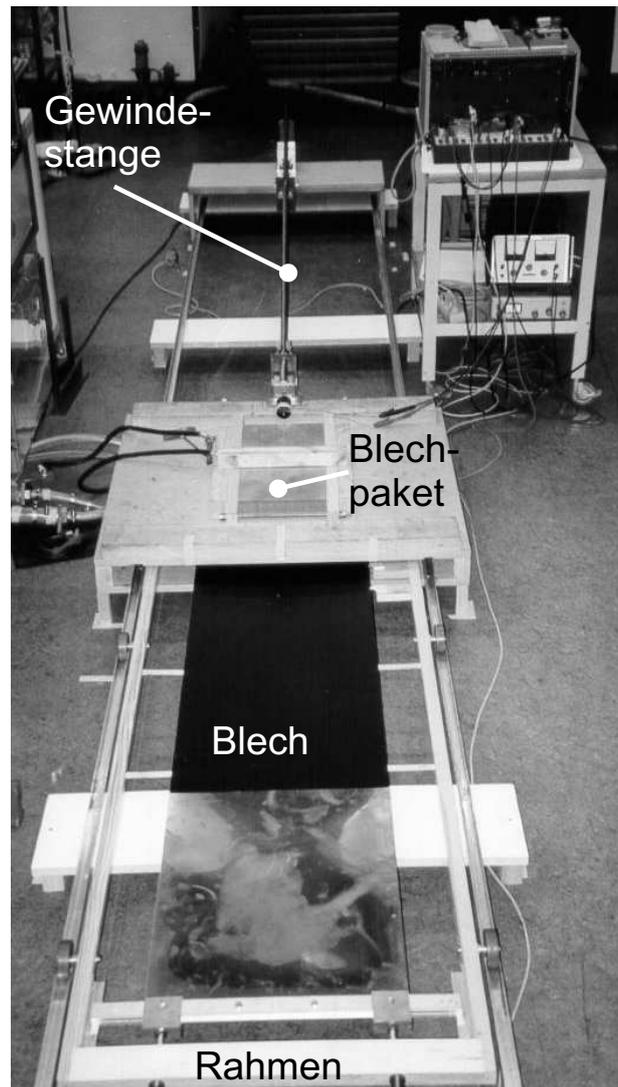


Abbildung 7.20: Laboranlage im Überblick: Gewindestange für den Vorschub, Erwärmer, geschwärztes Blech im Rahmen, Gesamtlänge: 6 m

In Bild 7.20 ist das obere Blechpaket, das aus der oberen Holzplatte herausragt, zu erkennen. Sichtbar sind auch die Anschlüsse der oberen Spule, die seitlich der Blechpakete oberhalb des linken Spulenkopfes zu einem Stufentransformator geführt werden. Dieser dient zur Anpassung der geringen Induktorspannung an das Spannungsniveau des Umrichters. Parallel zur induktiven Last sind Kondensatoren zur Kompensation der Blindleistung geschaltet. Der lastgeführte Mittelfrequenz-Umrichter ist in der Lage, Frequenzen von ca. 270 Hz bis 4000 Hz einzustellen. Für die Versuche mit unterschiedlichen Blechdicken wurden die Frequenzen entsprechend der benötigten optimalen Frequenz aus Tabelle 7.6 angepaßt. Hierfür waren Frequenzen bis 1000 Hz ausreichend.

Wichtigste zu messende Größe stellt bei den experimentellen Untersuchungen die Temperaturverteilung über der Blechbreite am Ende der Erwärmerstrecke dar. Hierfür wurde ein Infrarot-

Thermographie-System zur berührungslosen Temperaturmessung eingesetzt. Die vom Blech emittierte Wärmestrahlung soll von der verwendeten Infrarotkamera, die einen Temperaturmeßbereich von -20°C bis 2000°C aufweist, erfaßt werden. Die Umsetzung in ein Falsch-Farbenbild oder entsprechende Kurvenverläufe entlang einer Linie sind durch die Auswertungssoftware der Kamera möglich. Nachteilig wirkt sich in diesem Fall die glänzende Oberfläche des Blechs aus, die aufgrund ihres geringen Emissionsgrades nur geringfügig Wärme abstrahlt. Aus diesem Grund ist es notwendig, die Oberfläche mit einer Spezialfarbe zu schwärzen, um damit einen definiert hohen Emissionsgrad zu erhalten. Das Temperaturniveau am Ende der Erwärmerstrecke wurde für die Messungen auf ca. 150°C eingestellt. Dadurch sind präzise Messungen durch Ausnutzung des entsprechend gewählten Temperaturbereiches der Infrarotkamera möglich. Gleichzeitig verfälschen die durch den erhöhten Emissionsfaktor gestiegenen Strahlungsverluste auf diesem Temperaturniveau noch nicht die Temperaturverteilung im Blech.

Zusätzlich zum Temperaturprofil werden neben der Vorschubgeschwindigkeit auch sämtliche elektrische Meßgrößen, wie Strom, Spannung und Frequenz erfaßt. Dadurch wird es möglich, die exakten Betriebszustände im Anschluß an die Messungen mathematisch nachzubilden und damit einen direkten Vergleich zwischen Messung und Rechnung durchführen zu können. Zur Kontrolle der Temperatur während der Versuche wurde ein Thermoelement an einer kritischen Stelle des Induktors positioniert, um eine unerwartet hohe Erwärmung rechtzeitig zu erkennen und eine Zerstörung zu verhindern.

Durchgeführte Experimente

Das Hauptziel der Experimente, die Verifikation der Wirkungsweise des mit der neu entwickelten Optimierungsstrategie ausgelegten Induktors, konnte vollständig erreicht werden. Die Messungen an drei Messingblechen der Dicken 0,3 mm, 0,5 mm und 0,8 mm bestätigen die in der Auslegungsphase durchgeführten numerischen Berechnungen. Ohne Anpassungsmaßnahmen war es möglich, selbst im ersten Versuch eine sehr homogen verteilte Temperatur über der Blechbreite zu erzielen (Bild 7.21).

Lediglich an der linken Kante kommt es zu einer etwas niedrigeren Temperatur, die auf die Wirkung der Anschlüsse zurückzuführen ist. Geringe, bei der manuellen Optimierung der Anschlüsse aufgetretene Abweichungen haben sich im Experiment unerwartet verstärkt. Die maximale Temperaturschwankung liegt hier jedoch unter 5 %. Eine Verlängerung der Spule im linken Bereich kann den Temperaturabfall an der Kante kompensieren. Im regulären Bereich und an der rechten Kante werden näherungsweise die Verhältnisse der idealisierten Spule aus der Berechnung erreicht. Die Unterschiede zwischen Messung und Rechnung auf dieser Seite sind auf die Tatsache zurückzuführen, daß in der Berechnung von einer homogenen Stromverteilung im Induktor ausgegangen wird. Im praktischen Anwendungsfall mit vier Windungen des Induktors kann auf-

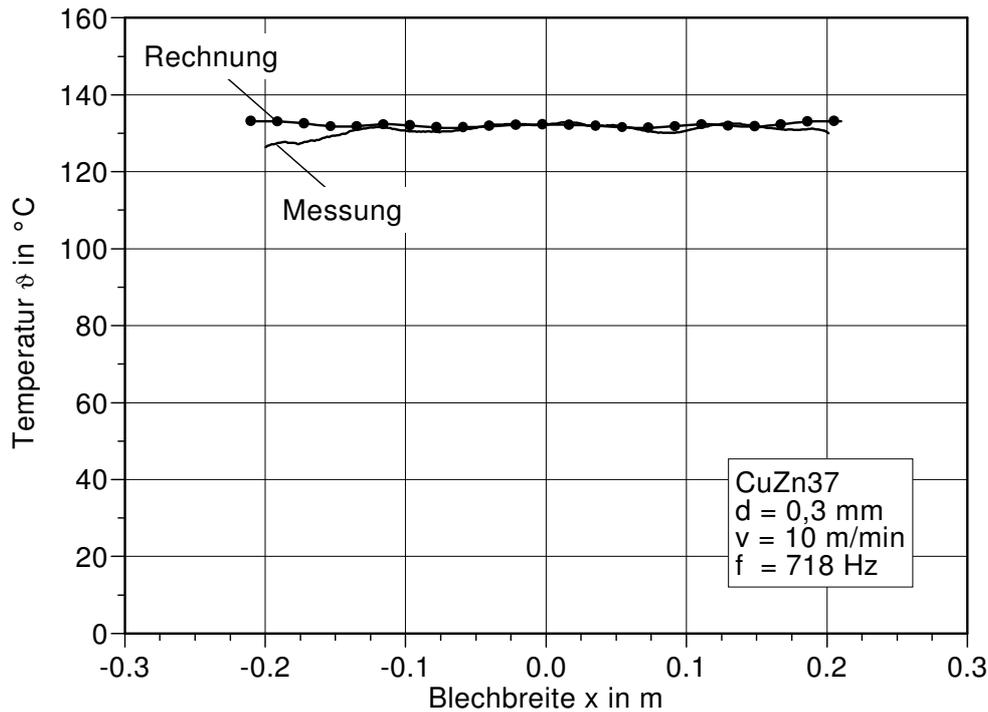


Abbildung 7.21: Vergleich von gemessener und berechneter Temperaturverteilung an der Laboranlage

grund der auftretenden Stromverdrängung im Induktor nicht von einer gleichmäßigen Verteilung ausgegangen werden. Der Strom drängt sich in Richtung der Spulenmitte und verkürzt somit die effektive Spulenlänge. Während in der Berechnung bei der verwendeten Frequenz bereits eine leichte Kantenüberhitzung zu erkennen ist, führt der oben beschriebene Effekt zu einer geringen Kantenunterkühlung im Experiment. Diese Abweichungen sind jedoch sehr gering und die Kantentemperatur kann über die Anpassung der Frequenz nahezu beliebig eingestellt werden. Ohne die Berücksichtigung der Kantenunterkühlung durch den Einfluß der Anschlüsse im linken Bereich ergeben sich maximale Temperaturschwankungen von unter 2,5 %. Die geforderten 8 % werden somit gut erreicht und es besteht weiterhin Spielraum für die Umsetzung in eine industrielle Anlage.

Zudem konnten in den Experimenten die elektrischen Beeinflussungsmöglichkeiten zur abschließenden Angleichung an das gewünschte Temperaturprofil und zur Bestätigung der Steuerungs- und Regelungsmöglichkeiten des Prozesses bestätigt werden. Durch die Variation der Frequenz ist es möglich, die Kantentemperatur signifikant zu beeinflussen. Die in Bild 7.22 dargestellten Temperaturverläufe sind wiederum für das 0,3 mm dicke Blech aufgenommen worden und zeigen neben der guten Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messung den Einfluß der Frequenz. Durch eine um 40 % auf 1005 Hz gesteigerte Frequenz erfährt das Band eine Anhebung der Kantentemperatur um den Faktor $\ddot{u}=1,1$, bezogen auf die Mittentemperatur. Eine ähnlich große Frequenzabsenkung um 36 % auf 456 Hz bewirkt einen Temperaturabfall im Kantenbereich in der gleichen Größen-

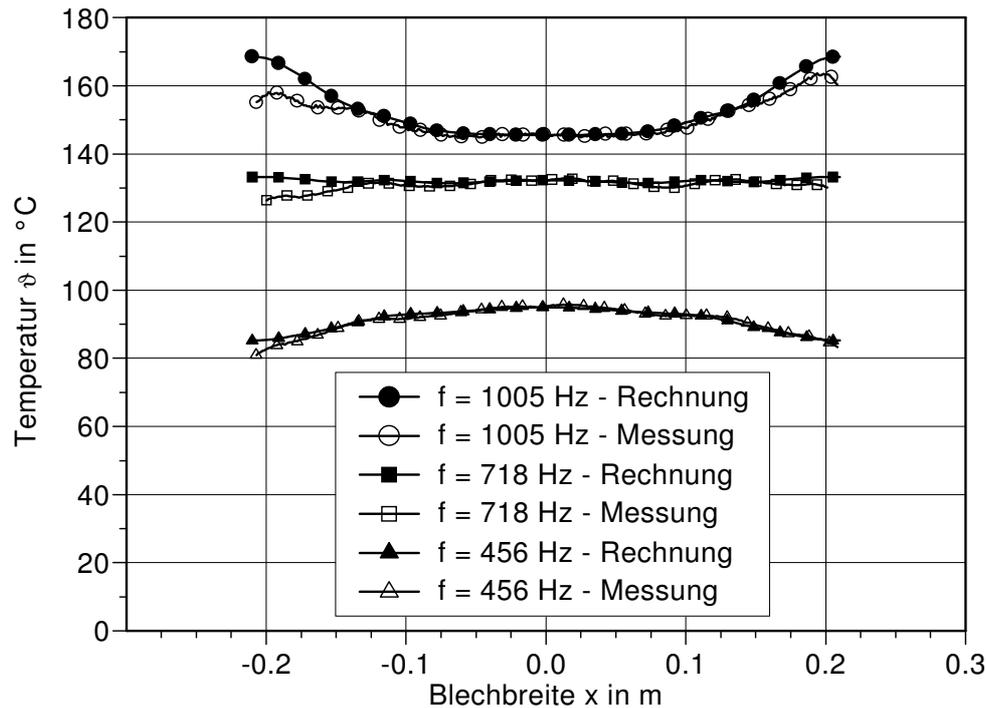


Abbildung 7.22: Gemessener und berechneter Temperaturverlauf über der Blechbreite bei unterschiedlichen Frequenzen

ordnung um den Faktor $\ddot{u}=0,89$. Auf kleine Frequenzschwankungen reagiert das System nicht sensibel. Das läßt einen sicheren Betrieb im industriellen Einsatz erwarten. Die Abweichungen der Kantentemperaturen zwischen Messung und Berechnung steigen mit der Frequenz an. Dieser Effekt ist auf die verstärkte Stromverdrängung bei höheren Frequenzen zurückzuführen.

Auch vertikale Positionsänderungen des Bandes haben keine signifikanten Veränderungen im Temperaturprofil zur Folge. Das Querfeldsystem erlaubt auch bei einem extremen Versatz von 10 mm in vertikaler Richtung, das entspricht bei dem realisierten Koppelpalt von 40 mm einer Verschiebung um 50 %, eine stabile Erwärmung. Die Meßergebnisse sind in Bild 7.23 im Vergleich zur Mittenposition des Blechs dargestellt. Im Bereich der Spulenköpfe, steigt die Temperatur um 2,5 % durch den Versatz an. Horizontale Verschiebungen ergeben den gleichen starken Einfluß auf die Temperatur wie sie in der Feinanalyse abgeschätzt wurden (vgl. Abschnitt 7.3). Zum Erreichen einer homogenen, symmetrisch verteilten Temperatur ist es notwendig, das Band mittig zu führen und seitliche Schwankungen möglichst zu vermeiden, bzw. andernfalls eine Nachführung des Induktors vorzusehen, die eine Anpassung an die Kanten erlaubt.

Im industriellen Einsatz können außergewöhnliche Betriebszustände wie Ausfransungen und Risse im Kantenbereich auftreten, deren Wirkung auf den Erwärmungsvorgang an der Laboranlage ebenfalls untersucht werden konnte. Dazu wurden Bleche erwärmt, die unterschiedliche Defekte im Randbereich aufwiesen und im Versuch durch senkrecht zur Bandkante verlaufende Einschnitte

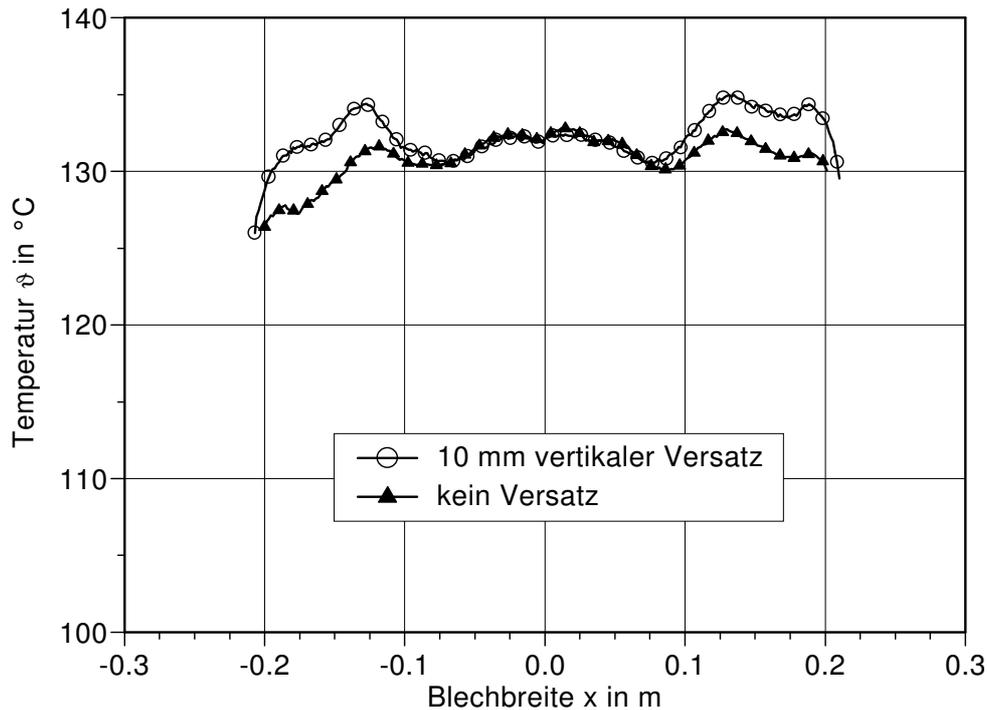


Abbildung 7.23: Gemessener Temperaturverlauf über der Blechbreite für vertikal um 10 mm verschobenes Blech im Vergleich zu mittig geführtem

von 1 mm Breite unterschiedlicher Tiefe dargestellt wurden. Gerade im Kantenbereich ist aufgrund der sich dort schließenden Ströme mit einem Einfluß der Einschnitte zu rechnen. Die Messungen ergaben, daß kleine Einschnitte von 25 mm Tiefe die Temperaturverteilung kaum beeinflussen. Bei einem Schnitt von 50 mm traten bereits stark erhöhte Temperaturen am Ende des Einschnittes auf. Bei einer Tiefe von 100 mm sind die Stromdichten im Endpunkt des Schnittes bereits so hoch, daß das Material schmilzt und es zu größeren Beschädigungen kommen kann. Mit derart extremen Banddefekten ist jedoch im industriellen Einsatz nicht zu rechnen.

Die experimentellen Untersuchungen zeigen somit, daß homogene Temperaturverteilungen für unterschiedliche Bleche erreicht werden können, die die Anforderungen des Anwenders erfüllen. Die dafür notwendige Frequenz liegt etwas oberhalb der numerisch bestimmten und sollte durch Experimente an der industriellen Anlage für die jeweiligen Betriebszustände ermittelt werden. Beeinflussungen der Temperaturverteilung sind über die Frequenz möglich. Das entwickelte System ist gegenüber Störungen bzw. vertikalen Schwankungen des Bandes unempfindlich. Seitliche Verschiebungen sollten vermieden werden. Die Experimente zeigen das große Potential der numerisch unterstützten Optimierung. Unter Anwendung des in dieser Arbeit entwickelten Optimierungskonzeptes konnte mit einer einfachen Querfelderwärmer-Konfiguration der Gruppe 2 eine robuste Anlage entwickelt werden, die sämtliche industrielle Anforderungen dieses Anwendungsfalles erfüllt.

7.3.2.2 Praktische Hinweise für die industrielle Realisierung

Für den industriellen Einsatz eignet sich die im Versuch verwendete ungekühlte Spule nicht. Jedoch sind die Blechpakete bereits mit Nuten von 30 mm Höhe optimiert, so daß genügend Platz vorhanden ist, um eine Spule mit größeren Abmessungen aufgrund der notwendigen Kühlwasserkanäle aufzunehmen.

Zur Herstellung des optimalen Designs der Spulen mit verringerten Abmessungen der Spulenköpfe sind prinzipiell zwei Ansätze denkbar. Zum einen könnte auf die aus einer plattenförmigen Kupferspule der optimalen Dicke $\delta\pi/2$ ein Kühlrohr aus Edelstahl hartgelötet werden. Dadurch bleibt die Geometrie der elektrisch wirksamen Spule bestehen und sogar die Spulenköpfe sind exakt umzusetzen. Der Einsatz eines solchen Induktors in der Industrie sollte zu ähnlich guten Ergebnissen wie im Laborversuch führen. Die unmagnetischen und elektrisch schwach leitfähigen Edelstahlrohre führen zu keiner starken Erhöhung der Stromwärmeverluste, der Wirkungsgrad wird nicht beeinträchtigt. In diesem Fall wäre zusätzlich die Ausführung von Multilayer-Induktoren denkbar. Der Mehraufwand hierfür muß ins Verhältnis zu den verringerten Betriebskosten durch die Verminderung der Spulenverluste gesetzt werden. Eine wirtschaftliche Überprüfung ergibt dann, ob sich der Aufwand rechnet. Nachteilig ist, daß umfangreiche Erfahrungen fehlen, Spulen dieser Art zu fertigen und im Dauerbetrieb einzusetzen.

Eine praktische Möglichkeit stellt die Verwendung von Standard-Kupferhohlprofilen dar. Diese klassische Fertigungsmethode ist erprobt, preisgünstig und wird in den meisten Induktionsanlagen eingesetzt. Die einfachste Form der Gestaltung wäre die Wicklung der gesamten Spule aus dem schmaleren Hohlprofil, das die Spulenköpfe richtig nachbildet. Im regulären Bereich würde eine Spreizung der einzelnen Leiter zu einer Annäherung an das optimale Design führen. Aufgrund des verringerten Leiterquerschnitts im regulären Bereich würde diese Ausführungsform zu einem reduzierten Wirkungsgrad führen. Abhilfe könnte hier der Einsatz zweier unterschiedlicher Profile, die im Übergang von Spulenkopf zu regulärer Zone leitend verbunden werden, schaffen. Dieser zusätzliche Arbeitsschritt verhindert das Absinken des Wirkungsgrades, ist jedoch aufgrund des komplizierten Herstellungsverfahrens weniger praktikabel.

8 Ausblick

Die in dieser Arbeit beschriebene Vorgehensweise zur Auslegung von Quersfelderwärmern und speziell der Einsatz des automatischen Optimierungssystems, können gewinnbringend für grundlegende Untersuchungen zum Verständnis der Wirksamkeit und Eignung unterschiedlicher Quersfelderwärmer-Konzepte eingesetzt werden. Mit Hilfe des Optimierungssystems, das auf der Kopplung von numerischen Berechnungen mit mathematischen Algorithmen basiert, sind aussagekräftigere Parameterstudien als bisher möglich, da sie sich auf die Analyse optimaler Betriebspunkte konzentrieren können. Dadurch wird das Erkennen sinnvoller Arbeitsbereiche der jeweils betrachteten Erwärmerkonfiguration erleichtert. Aus systematisch durchgeführten Untersuchungen von Quersfelderwärmer-Konzepten und aus der Optimierung bisher entwickelter Quersfeldanordnungen kann zudem eine solide Basis geschaffen werden, um für zukünftige Auslegungsaufgaben die Möglichkeiten und Eigenschaften der unterschiedlichen Quersfeldsysteme zu kennen. Die bisher verwendete Expertenlösung erlaubte dies aufgrund der manuellen Suche nicht im vollen Umfang und mit der Zuverlässigkeit wie es die automatische Optimierung verspricht.

Durch den Einsatz des entwickelten Optimierungssystems wird der zukünftige Entwurf von Quersfeldanlagen hinsichtlich unterschiedlicher Anforderungen erleichtert und zukünftige Problemstellungen sollten in ähnlicher Weise, wie in dieser Arbeit für das vorgestellte Beispiel erfolgreich vorgestellt, gelöst werden können. Das funktionstüchtige Auslegungskonzept und die wirkungsvollen Werkzeuge versprechen somit eine weitere Durchdringung der Quersfeldkonzepte und eine erfolgreiche Umsetzung der Erwärmung von dünnen Blechen und Bändern in der industriellen Praxis.

Die Weiterentwicklung der numerischen Werkzeuge und Modelle für induktive Quersfelderwärmer stellt ebenfalls einen interessanten Arbeitsschwerpunkt dar. Für zukünftige Optimierungen sollten erweiterte Geometrieprogramme des Programmpaketes HIHTEC zur Datenaufbereitung auch für kompliziertere Anordnungen geschaffen werden. Um die Vorteile des Quersfeldprinzips auch für die Erwärmung von ferromagnetischem Material nutzbar zu machen, sind umfangreiche numerische Berechnungen notwendig. Hierfür sind aufgrund der Feldstärke- und Temperaturabhängigkeit der Permeabilität Untersuchungen des nichtlinearen elektromagnetisch-thermisch gekoppelten Problems notwendig. Da die geringe EM-Eindringtiefe im hochpermeablen Material nur in einem eingeschränkten Frequenzbereich eine homogene Stromdichteverteilung über der Blechdicke zur Folge hat, sind zur Simulation dieser Vorgänge kommerzielle Programme auf der Basis der FEM erforderlich. Beispielsweise die elektromagnetische und thermische Berechnung von dickeren Blechen oder dünnen Materialien, die sich durch nicht planparallele Oberflächen auszeichnen, erfordert ebenfalls die Anpassung der numerischen Modelle. Zur Überprüfung des Einflusses der zu erwartenden Oberwellen beim Einsatz eines frequenzvariablen Umrichters als Energieversorgung

ohne Schwingkreis sollte das Programmpaket HIHTEC erweitert werden. Die Berücksichtigung nichtharmonischer Ströme und Spannungen würde damit möglich werden.

Eine Erweiterung der Optimierungsdatenbank durch die Anpassung und Aufnahme weiterer Algorithmen würde das universelle Optimierungssystem für beliebige Optimierungsaufgaben nutzbar machen. Zudem kann durch die Kombination unterschiedlicher Optimierungsmethoden, wie z. B. stochastischen und deterministischen Algorithmen, das Optimierungsverfahren für Quersfelderwärmer verbessert werden. Die Entwicklung und Prüfung zusätzlicher Zielfunktionen für andere denkbare Anwendungsfälle würde die Erweiterung des Optimierungssystems vervollständigen.

Nach der experimentellen Verifikation der Ergebnisse des Auslegungskonzeptes, an der für den hier betrachteten Anwendungsfall projektierten Laboranlage, sollte nun in einem weiteren Schritt die industrielle Realisierung durchgeführt werden. Die erfolgreiche Umsetzung und Bestätigung der Arbeitsweise und der im Labor erzielten homogenen Temperaturverteilungen im industriellen Einsatz würde die beispielhafte Auslegung abschließen und für weitere Anwendungsfälle als industrielle Referenz zur Verfügung stehen.

Die Laboranlage kann zusätzlich auch der Verifikation der weiterentwickelten numerischen Simulationsprogramme für die oben genannten Berechnungen von ferromagnetischem Material, speziellen Blechquerschnitten und nichtharmonischen elektrischen Größen dienen. Zudem sind weiterführende meßtechnische Untersuchungen bezüglich Deformationen, Schwingungs- und Geräuschentwicklung sowie des Anlagenverhaltens in Spezialfällen, die in der Simulation nicht erfaßbar sind, wie z. B. Heftstellen zwischen zwei Bändern oder Löcher im Material, notwendig.

Die Ausweitung des Einsatzes des automatischen Optimierungssystems auf andere elektrothermische Anwendungsbereiche ist dann sinnvoll, wenn der Prozeß hinsichtlich eines bestimmten quantifizierbaren Kriteriums, wie z. B. der hohen Qualität des Endproduktes oder die kostengünstige Betriebsweise, verbessert werden soll und die charakteristischen Eigenschaften des Systems durch zahlreiche Parameter geprägt sind. Voraussetzung für die Anwendung des Optimierungssystems ist, daß ein numerisches Modell zur Beschreibung der physikalischen Vorgänge der betrachteten Anlage existiert, dessen Rechenzeiten zur Lösung des direkten Problems in akzeptabler Größenordnung liegen. Das automatische Optimierungssystem kann direkt durch den einfachen Austausch der Berechnungsmodelle und die Schaffung der notwendigen Schnittstellenprogramme für andere Aufgaben genutzt werden.

9 Zusammenfassung

Der Trend, bei reduziertem Energie-, Zeit- und Kostenaufwand endabmessungsnahes Material herzustellen, läßt die Erwärmung von dünnen Blechen und Bändern verstärkt in den Blickpunkt des Interesses rücken. Die induktive Quersfelderwärmung bietet die Möglichkeit, die geforderten Erwärmungsziele, wie eine energetisch effiziente Betriebsweise und ein speziell gestaltetes Temperaturprofil im Blech, zu erreichen. Aufgrund der komplizierten dreidimensionalen Auslegungsvhältnisse ist für das Design dieser Anlagen die Verwendung einer automatischen Optimierungsschleife sinnvoll. Aus diesem Grund stützt sich das in dieser Arbeit vorgestellte Konzept zur Auslegung von Quersfelderwärmern auf die Kopplung von Berechnungen eines räumlich dreidimensionalen numerischen Modells mit mathematischen Optimierungsalgorithmen. Auf diese Weise ist es möglich, Quersfeldanlagen sicher zu entwerfen und dadurch deren zahlreiche Vorteile gegenüber der konventionellen indirekten Beheizung und der induktiven Längsfelderwärmung zu nutzen.

Basierend auf der Beschreibung und Analyse der mathematischen Optimierung erfolgte in dieser Arbeit eine Klassifizierung der unterschiedlichen mathematischen Optimierungsalgorithmen zur Vereinfachung der Auswahl geeigneter Methoden. Die Diskussion und Bewertung ihrer Vor- und Nachteile wurde in Hinblick auf den Einsatz für die Optimierung von Quersfeldanlagen durchgeführt. Geeignete direkte Suchverfahren wurden ausgewählt und so modifiziert, daß sie mit einheitlich definierten Schnittstellen in eine Datenbank integriert werden konnten und so auch für andere Anwendungsfälle effizient eingesetzt werden können. Bei den umfassenden Untersuchungen der Optimierungsmethoden zeigte sich, daß für eine wirkungsvolle Optimierung, die durch einen schnellen Suchverlauf und das Auffinden des globalen Minimums gekennzeichnet ist, eine Kombination von deterministischen mit stochastischen Algorithmen angewendet werden sollte.

Für die Kopplung mit den mathematischen Optimierungsalgorithmen eignet sich im Fall der Quersfelderwärmung das am Institut für Elektrowärme entwickelte problemangepaßte Programmpaket HIHTEC. Das auf einem vereinfachten 3D-Modell basierende Programm zeichnet sich gegenüber kommerziellen Programmpaketen insbesondere durch die kurzen Rechenzeiten und den minimalen Aufwand zur Datenvorbereitung aus. Für die Automatisierung der Berechnungsvorbereitung war eine Weiterentwicklung des Programmpaketes notwendig, da erst die automatische Vernetzung und Geometrierstellung die Einbindung in die Optimierungsschleife möglich macht. Der modulare Aufbau des Optimierungssystems liefert große Transparenz, geringe Fehlerwahrscheinlichkeit und die Möglichkeit, das Optimierungspaket flexibel auch für andere Auslegungsaufgaben einsetzen zu können. Die Kommunikation zwischen Optimierungsalgorithmus und Berechnungsprogramm ist über gekapselte Schnittstellenprogramme realisiert, die den Datenaustausch über Ein- und Ausgabedateien abwickeln. Für die beispielhaft durchgeführten Optimierungen von Quersfelderwärmern wurden Schnittstellenprogramme geschaffen, die für zukünftige Optimierungen zur

Verfügung stehen.

Das entwickelte Werkzeug zur automatischen Optimierung stellt das Herzstück in dem entworfenen Konzept zur Auslegung von elektrothermischen Anlagen dar, das aufgrund der Berücksichtigung von vorhandenem Expertenwissen eine effektive Entwurfsmethode darstellt. Es wurde eine allgemeine Vorgehensweise entwickelt, die es erlaubt, ausgehend von der Problemspezifikation über die schrittweise Optimierung integraler und verteilter Größen bis zur Feinanalyse und technischen Realisierung, die Anforderungen bestmöglich zu erfüllen. Das Konzept wurde anhand der Quersfelderwärmung mit Hilfe beispielhafter Optimierungen erläutert. Dazu erfolgte eine Klassifikation von Quersfeldkonfigurationen, die die Auswahl geeigneter Quersfeldanlagen mit ihren zugehörigen Designvariablen erleichtert. Geeignete Zielfunktionen für die Optimierung von Quersfelderwärmern wurden implementiert und ihre Wirkungsweise in den Beispielloptimierungen entsprechend der definierten Quersfelderwärmergruppen analysiert und bewertet. Dabei wurden die Möglichkeiten und Grenzen der untersuchten Anordnungen hinsichtlich der Temperaturgestaltung im Blech aufgezeigt.

Auf der Basis des entwickelten und vorgestellten Konzeptes wurde die Auslegung eines industriellen Erwärmers erfolgreich durchgeführt. Nach der Analyse der Anforderungen führte die schrittweise Optimierung unter Ausnutzung bereits bekannter Zusammenhänge der Quersfelderwärmung und Verwendung der in dieser Arbeit vorgestellten automatischen Optimierung zu einer äußerst homogenen Temperaturverteilung im Blech und somit zur optimalen Lösung der Designaufgabe. Beispielhaft wurde damit das inverse Problem der Auslegung eines Quersfelderwärmers hinsichtlich einer homogenen Temperaturverteilung vollständig gelöst. Im Vergleich zur bisher durchgeführten Expertenlösung auf der Basis der manuellen Suche durch Lösung direkter Probleme konnte ein deutlich verbessertes Ergebnis erzielt werden.

Die Überprüfung des Optimierungsergebnisses erfolgte durch experimentelle Untersuchungen an einer entsprechend projektierten Laboranlage. Neben der sehr homogenen Temperaturverteilung konnte anhand der Experimente auch die Stabilität des Erwärmungsprozesses bestätigt werden. Parasitäre mechanische Effekte blieben dabei ohne signifikanten Einfluß auf die Temperaturverteilung. Die wirkungsvolle Beeinflussungsmöglichkeit der Temperaturverteilung durch die Frequenz konnte im Experiment ebenfalls gezeigt werden, so daß die Realisierung der Beispielanlage in der Industrie durchgeführt werden kann.

Die Ergebnisse der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Optimierungen erweitern zusätzlich den Kenntnisstand zur Quersfeld-Bänderwärmung. Es konnte die Effektivität von an unterschiedliche Bandbreiten adaptierbaren Systemen hinsichtlich einer homogenen Temperaturverteilung untersucht werden. Der beschriebene Ansatz zur systematischen Untersuchung und die bereits erzielten Ergebnisse können als Basis für weitergehende Analysen von Quersfelderwärmer-Konzepten genutzt werden. Der Einflusses der Geometrie des Spulenkopfes, insbesondere des Spulenkopf-

faktors, wurde zudem eingehend analysiert und Potentiale zur Temperaturgestaltung aufgezeigt. Es ist möglich, durch die Gestaltung eines Spulenkopfes mit einer gegenüber dem regulären Bereich verminderten Leiterbreite sehr homogene Temperaturprofile zu erreichen.

Mit Hilfe des in dieser Arbeit vorgestellten Konzeptes zur Auslegung von Querfelderwärmern unter Einsatz der geschaffenen Werkzeuge zur automatischen Optimierung ist es möglich, zukünftige Designaufgaben für induktive Querfeldanlagen sicher zu lösen. Im Gegensatz zur bisher angewendeten Expertenlösung können optimale Betriebspunkte und Konfigurationen zuverlässiger gefunden werden. In der Auslegung können die speziellen Anforderung der späteren Anwender bestmöglich berücksichtigt und eine verlässliche und robuste Querfelderwärmungsanlage entworfen werden. Damit liefert diese Arbeit einen wichtigen Beitrag zum industriellen Einsatz der Querfeldtechnologie.

Literaturverzeichnis

- [1] GIBSON, R.: *The Design and Performance of Multi-Megawatt Variable Width TFX Induction Heaters for the Ultra Rapid Heat Treatment of Metal Strip*. Proc. of the 13th Int. Congr. on Electricity Applications, 1 (1996) p. MIII69–MIII76
- [2] ANDREE, W. ; MAUVE, H.-W.: *Induktive Erwärmung dünner Bleche*. elektrowärme int., 50 (1992) B2, S. B 160–B 164
- [3] NACKE, B. ; ANDREE, W. ; MOHRING, J.-U. ; LESSMANN, H.-J.: *Induktive Querfelderwärmung - eine flexible und effiziente Erwärmungsmethode für metallische Flachprodukte im Walzwerk*. elektrowärme int., 51 (1993) B4, S. B 156–B 166
- [4] GOODWILL, J. E. ; DONOHUE, T. J.: *Induction heating for the steel industry*. Iron and Steel Engineer, 76 (1999) 8, p. 51–55
- [5] WAGGOTT, R. ; WALKER, D. J. ; GIBSON, R. C. ; JOHNSON, R. H.: *Transverse flux induction heating of aluminium-alloy strip*. Metals Technology, 9 (1982), p. 493–498
- [6] STEFFEN, R. ; TACKE, K.-H.: *Stand des Bandgießens von Stahl*. Stahl und Eisen, 119 (1999) 6/7, S. 129–132
- [7] SCHÖNBECK, J. ; PERLWITZ, H.-J.: *Induktives Erwärmen in ISP-Anlagen*. elektrowärme int., 56 (1998) B2, S. B 48–B 55
- [8] PLESCHIUTSCHNIGG, F.-P. ; KRÜGER, B. ; HOVESTÄDT, E. ; MEYER, P. ; GOSIO, G.: *Die I.S.P.-Technologie (Inline Strip Production), Technologie des Dünnbrammengießens*. VDI Berichte 1057: Elektrische Prozesswärme für Aluminium, Gußeisen, Stahl, VDI-Verlag, Düsseldorf 1993, S. 137–166
- [9] CONRATHS, H.-J.: *Elektromagnetische Feld- und Temperaturverteilung bei induktiver Bänderwärmung*. Dissertation, RWTH Aachen 1992
- [10] SCHULZE, D. ; WANG, Z. ; NACKE, B.: *Developing an universal TFIH Equipment using 3D Eddy Current Field Computation*. IEEE Trans. Magn., 32 (1996) 3, p. 1609–1612
- [11] DAVIES, P. G.: *State of the Art of Transverse Flux Induction Heating*. Proc. of the Int. Induction Heating Seminar, Padua 1998, p. 105–107
- [12] NEITTAANMÄKI, P. ; RUDNICKI, M. ; SAVINI, A.: *Inverse Problems and Optimal Design in Electricity and Magnetism*. Clarendon Press, Oxford 1996
- [13] BAKER, R. M.: *Transverse Flux Induction Heating*. AIEE Trans., 69 (1950) p. 711–719

- [14] LAMOURDEDIEU, M.: *Continuous Heat-Treatment of Aluminium Alloys of the Duralumin Type*. Journal of the Institute of Metals, 80 (1951-1952) p. 335–339
- [15] CONRATHS, H.-J.: *Rechnergestützte Simulation der induktiven Querfelderwärmung*. elektrowärme int., 51 (1993) B1, S. B 4–B 12
- [16] WANG, Z. ; HUANG, W. ; JIA, W. ; ZHAO, Q. ; WANG, Y. ; YAN, W. ; SCHULZE, D. ; MARTIN, G. ; LUEDTKE, U.: *3D Multifields FEM Computation of Transverse Flux Induction Heating for Moving-Strips*. IEEE Trans. Magn., 35 (1999) 3, p. 1642–1645
- [17] HENNEBERGER, G. ; MAI, W.: *Field and Temperature Calculations in Transverse Flux Inductive Heating Devices heating non-paramagnetic Materials using Surface Impedance Formulations for non-linear Eddy-current Problems*. IEEE Trans. Magn., 35 (1999) 3, p. 1590–1593
- [18] DUGHIERO, F. ; FORZAN, M. ; LUPI, S.: *3D Solution of Electromagnetic and Thermal Coupled Field Problems in the Continuous Transverse Flux Heating of Metal Strips*. IEEE Trans. Magn., 33 (1997) 3, p. 2147–2150
- [19] RUHNKE, A. ; NAUVERTAT, G. ; MÜHLBAUER, A.: *Anwendung der induktiven Querfelderwärmung von Flachgut*. Stahl und Eisen, 119 (1999) 8, S.73–77
- [20] RUHNKE, A.: *Systematische Untersuchung der induktiven Querfeld-Bänderwärmung*. Dissertation, Universität Hannover 1999, VDI-Verlag, Düsseldorf 1999
- [21] ROSS, N. V. ; HOWELL, C. N. ; KALTENHAUSER, R. ; WALZER, G. A.: *Transverse Flux Induction Heating of Steel Strip*. Proc. of the 12th Congr. of Int. Union for Electroheat, Montréal 1992, p. 110–119
- [22] SCHLUCKEBIER, D.: *Induktive Querfelderwärmung von Flachgut*. elektrowärme int., 50 (1992) B2, S. B 165–B 170
- [23] NAUVERTAT, G. ; NIKANOROV, A. ; MÜHLBAUER, A.: *Optimiertes Design induktiver Querfeld-Erwärmungsanlagen*. elektrowärme int., 58 (2000) 1, S. 22–29
- [24] BIANCHI, N. ; DUGHIERO, F.: *Optimal Design Techniques Applied to Transverse-Flux Induction Heating Systems*. IEEE Trans. Magn., 31 (1995) 3, p. 1992–1995
- [25] HEDIA, H. ; HENROTTE, F. ; DULAR, P. ; J.-F., Remacle ; W., Legros: *Optimization of the Width of a Thin Plate in a Transverse Flux Induction Furnace*. IEEE Trans. Magn., 34 (1998) 5, p. 3118–3121

- [26] RUHNKE, A. ; MÜHLBAUER, A. ; NIKANOROV, A. ; DEMIDOVITCH, V.: *Numerical and Experimental Investigation of Transverse-Flux Induction Heating*. Proc. of the Int. Induction Heating Seminar, Padua 1998, p. 109–115
- [27] DEMIDOVITCH, V. ; SKVORTSOV, V. ; KOMRAKOVA, G. ; TCHMILENKO, F. ; NIKANOROV, A. ; RASTVOROVA, I. ; ZLOBINA, M.: *Optimization of induction heating devices: experience of the last 20 years*. Proc. of the Int. Induction Heating Seminar, Padua 1998, p. 403–405
- [28] SCHERG, P.: *Zur Auslegung von Querfluß-Induktionserwärmungsaggregaten*. elektrowärme int., 39 (1981) B2, S. B 84–B 90
- [29] SCHERG, P.: *Über die Anwendbarkeit von elektromagnetischen Querfeldanordnungen zur induktiven Durchlauferwärmung von Blechen und Bändern*. elektrowärme int., 41 (1983) B1, S. B 55–B 62
- [30] HAUBITZER, W.: *Die Optimierung von Querfeldinduktoren zur kontinuierlichen Blecherwärmung*. elektrowärme int., 42 (1984) B1, S. B 39–B 48
- [31] NIKANOROV, A.: *Modellierung, Untersuchung und Entwicklung von Induktionssystemen zur Erwärmung von Band im Querfeld*. Dissertation, Leningrad Elektrotechnisches Institut 1989, (russ.)
- [32] MÜHLBAUER, A. ; MUIZNIEKS, A. ; LESSMANN, H.-J.: *Berechnung der 3D elektromagnetischen Felder bei der Hochfrequenz-Induktionserwärmung mit der BEM*. 37. Int. Wiss. Koll. Ilmenau, 1 (1992), S. 87–93
- [33] WALKER, R. A. ; HAYWARD, A.: *The Application of High Power Transverse Flux Induction Heating in the Metal Strip Industries*. Proc. of the 13th Int. Congr. on Electricity Applications, 1 (1996) p. MIII1–MIII8
- [34] PEISAHOVITCH, V.: *Ein Beitrag zur homogenen Erwärmung von bewegtem Band im Querfeld*. Industrielle Anwendung von hochfrequenten Strömen in der Elektrothermie, Band 53, Mashgiz, Moskau, Leningrad 1961, (russ.)
- [35] SLUCHOTSKI, A.E. ; RISKIN, C.E.: *Induktoren für die induktive Erwärmung*. Energia, Leningrad 1974, (russ.)
- [36] MÜHLBAUER, A. ; MUIZNIEKS, A. ; LESSMANN, H.-J.: *Berechnung von dreidimensionalen elektromagnetischen Feldern bei der induktiven Erwärmung*. Archiv für Elektrotechnik, 77 (1994) S. 157–168
- [37] MÜHLBAUER, A. ; RUHNKE, A. ; DEMIDOVITCH, V. ; NIKANOROV, A. ; LUPI, S. ; DUGHIERO, F.: *Methods and Tools for All-Round Optimization of Transverse-Flux Induction*

- Heaters*. Proc. of the 17th ASM Heat Treating Society Conf. and the 1st Int. Induction Heat Treating Symposium, Indianapolis 1997, p. 865–870
- [38] MÜHLBAUER, A. ; LESSMANN, H.-J. ; MOHRING, J.-U. ; NIKANOROV, A. ; DEMIDOVITCH, V.: *Modeling of 3D Electromagnetic Processes in Transverse Flux Induction Heaters*. Proc. of the 10th Conf. on the Comp. of Electromagn. Fields (COMPUMAG), Berlin 1995, p. 444–445
- [39] MÜHLBAUER, A. ; LESSMANN, H.-J.: *Gestaltung der Temperaturverteilung bei induktiver Querfeld-Banderwärmung*. ETG-Fachbericht, ETG-Tage '95, VDE-Verlag, Berlin, Offenbach 1995, S. 69–74
- [40] SIMONYI, K.: *Theoretische Elektrotechnik*. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1989
- [41] WOLFF, I.: *Grundlagen und Anwendungen der Maxwellschen Theorie II*. B. I. Wissenschaftsverlag, Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich 1992
- [42] MÜHLBAUER, A. ; MUIZNIEKS, A. ; LESSMANN, H.-J.: *Mathematische 3D-Modellierung des elektromagnetischen und des thermischen Feldes bei der Querfelderwärmung dünner Bleche*. 37. Int. Wiss. Koll. Ilmenau, 1 (1992), S. 100–106
- [43] MOHRING, J.-U. ; LESSMANN, H.-J. ; MÜHLBAUER, A. ; NACKE, B.: *Numerical and Experimental Investigations into Transverse Flux Induction Heating*. European Trans. on Electrical Power (ETEP), 7 (1997) 3, p. 157–164
- [44] *ANSYS 5.4 Online-Manual*
- [45] FOX, R. L.: *Optimization Methods for Engineering Design*. Addison-Wesley Publishing Company, Reading 1971
- [46] KÜNZI, H. P. ; KRELLE, W. ; VON RANDOW, R.: *Nichtlineare Programmierung*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1979
- [47] VARGA, J.: *Praktische Optimierung*. R. Oldenbourg Verlag, München, Wien 1974
- [48] BLUM, E. ; OETTLI, W.: *Mathematische Optimierung*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1975
- [49] HORST, R.: *Nichtlineare Optimierung*. Carl Hanser Verlag, München, Wien 1979
- [50] ENTENMANN, W.: *Optimierungsverfahren*. Hüthig Verlag, Heidelberg 1976
- [51] BUNDAY, B. D. ; GARSIDE, G. R.: *Optimisation Methods in Pascal*. Edward Arnold, London 1987

- [52] BAGINSKI, K. ; PIEHLER, J.: *Allgemeine Optimierungsmethoden*. VEB Leuna-Werke, Berlin 1967
- [53] SHOUP, T. E.: *A practical Guide to Computer Methods for Engineers*. Prentice-Hall, London 1979
- [54] RUDNICKI, M.: *On global Optimisation Algorithms for Engineering Design Problems*. Proc. of the Int. Induction Heating Seminar, Padua 1998, p. 427–436
- [55] HOFFMANN, U. ; HOFMANN, H.: *Einführung in die Optimierung*. Verlag Chemie GmbH, Weinheim/Bergstr. 1971
- [56] DAMERT, K. ; BALZER, D. ; REINIG, G.: *Nichtlineare Optimierung für Modellierung und Prozeßsteuerung (Algorithmen, Programme, Anwendungen)*. Akademie-Verlag, Berlin 1976
- [57] GILL, P. E. ; MURRAY, W. ; WRIGHT, M. H.: *Practical Optimization*. Academic Press, London 1981
- [58] SCHWEFEL, H.-P.: *Numerische Optimierung von Computer-Modellen mittels Evolutionsstrategie*. Birkhäuser Verlag, Basel, Stuttgart 1977
- [59] HARDHIENATA, S.: *Numerische Optimierungsstrategie für Simulationsmodelle mit Anwendungen in Informatik und Verfahrenstechnik*. Dissertation, Universität Erlangen, 1993
- [60] PRESS, W. H. ; FLANNERY, B. P. ; TEUKOLSKY, S. A. ; VETTERLING, W. T.: *Numerical Recipes, The Art of Scientific Computing*. Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge 1986
- [61] NEUMANN, K.: *Operations Research Verfahren Band I*. Carl Hanser Verlag, München, Wien 1975
- [62] HIMMELBLAU, D. M.: *Applied Nonlinear Programming*. McGraw-Hill Book Company, New York 1972
- [63] GOLDBERG, D. E.: *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley Publishing Company, Reading 1989
- [64] SYKULSKI, J. K. ; AL-KHOURY, A. H.: *A System for Interactive Design and Optimisation of Brushless PM Motors*. 9th Int. Symposium on Electromagnetic Fields in Electrical Engineering, Pavia 1999, p. 409 – 412
- [65] PETERSEN, H.: *Grundlagen der statistischen Versuchsplanung*. ecomed, Landsberg/Lech 1991

- [66] DOBROWOLSKI, R. ; LEITHNER, R. ; AXMANN, J.K. ; BERELSMANN, R. ; HESTERMANN, R.: *Numerische Optimierung von Kraftwerkskreisläufen*. VDI-GET-Fachtagung: Fortschrittliche Energiewandlung und -anwendung, München 1999
- [67] BATTISTETTI, M. ; DUGHIERO, F. ; LUPI, S.: *Optimization Techniques Applied to the Design of Continuous Induction Hardening and Tempering Lines*. Proc. of the 17th ASM Heat Treating Society Conf. and the 1st Int. Induction Heat Treating Symposium, Indianapolis 1997, p. 719–723
- [68] MÜHLBAUER, A.: *Wärmeübertragung*. Skriptum zur Vorlesung Technische Wärmelehre für Studierende der Elektrotechnik, Teil 1, Institut für Elektrowärme, Universität Hannover 1993
- [69] DKI, Deutsches Kupfer-Institut: *CUZn37, Werkstoff-Nr.: 2.0321*. Werkstoffdatenblätter für Bänder, Bleche, Rohre, Stangen Drähte, Strangpreßprofile sowie Schmiedestücke, Auskunfts- und Beratungsstelle für die Verwendung von Kupfer und Kupferlegierungen
- [70] JOHNEN, W.: *Modern Induction System for Heating of Billets and Metallic Strips*. Proc. of the Int. Congr. Electromagnetic Processing of Materials, Paris, 1 (1997), p. 327–338
- [71] NEMKOV, V. ; DEMIDOVITCH, V.: *Theorie und Berechnung von induktiven Erwärmungsanlagen*. Energoatomizdat, Leningrad 1988, (russ.)
- [72] HEUMANN, K.: *Grundlagen der Leistungselektronik*. B. G. Teubner, Stuttgart 1991
- [73] SYSTEMS, AGEMA I.: *Table of normal spectral emissivities*. Firmeninformation

Lebenslauf

Persönliche Daten:

Name: Grit Nauvertat
Geburtsdatum: 17. Dezember 1970
Geburtsort: Stuttgart

Schulausbildung:

1977 - 1981 Grundschule Glarum, Gemeinde Schortens
1981 - 1983 Orientierungsstufe Schortens, Kreis Friesland
1983 - 1986 Mariengymnasium Jever
1986 - 1990 Cäcilienchule Oldenburg

Studium:

10/1990 - 11/1995 Studium der Elektrotechnik an der Universität Hannover
Fachrichtung: Energietechnik
Schwerpunkt: Elektrowärme

Studienbegleitende Tätigkeiten:

06/1990 - 09/1990 Grundpraktikum im Fernmeldeamt Oldenburg
02/1991 - 03/1991 Fachpraktikum im Ingenieurbüro W. Högner, Oldenburg
02/1993 - 03/1993 Fachpraktikum im Schauspielhaus Hannover
09/1993 - 10/1993 Fachpraktikum bei der Riedel-de Haën AG, Seelze
08/1994 - 09/1994 Fachpraktikum bei der Siemens Solar GmbH, München
10/1994 - 06/1995 Wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Elektrowärme der Universität Hannover

Beruf:

seit 01/1996 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Elektrowärme der Universität Hannover