Einleitung

Die Wirkungen des elektrischen Stromes in Form magnetischer Kräfte sind heutzutage alltäglich beobachtbare Erscheinungen in elektrischen Motoren, Generatoren, Magnetventilen und ähnlichen Geräten. Bereits 1907 beobachtete Northrup [1] die Formänderung flüssiger Metalle bei Anwesenheit eines elektrischen Stromflusses und sagte vorher, „dass weitere Überlegungen im Ingenieurbereich diesbezüglich Entwicklungen einmaliger und nützlicher Art hervorzubringen in der Lage seien“. Im Laufe der Zeit wurden magnetische Feldstärken beherrschbar, die es ermöglichten auch metallische Festkörper nennenswert zu verformen [2].

Die Umformung metallischer Werkstücke erlebt im Bereich der industriellen Fertigung eine stetig steigende Bedeutung hinsichtlich der wachsenden Nachfrage sowie ebenso höheren Qualitätsanforderungen an die herzustellenden Produkte [3]. Neben den klassischen Prozessen, bei denen zum Teil auch Wirkmedien zur Übertragung des Kraftschlusses zwischen Werkzeug und Werkstück eingesetzt werden, bietet sich zunehmend die Bereitstellung der nötigen Umformkraft durch das magnetische Feld an. So werden unter anderem Teile in den Bereichen des Automobilbaus oder der Luft- und Raumfahrttechnik unter Verwendung dieses Verfahrens gefertigt [4, 5].

Die Elektromagnetische Metallumformung (EMU) ist ein Hochgeschwindigkeitsumformverfahren, bei dem, durch einen transienten Impulsstrom hervorgerufen, eine hohe Kraft auf ein elektrisch gut leitfähiges dünnwandiges Material einwirkt und als Folge dessen dieses berührungslos in seine neue Form gebracht wird [6]. Insbesondere im Bereich hochduktiler Werkstoffe wie z.B. Aluminium, welches zunehmend Stahl als Werkstoff im Leichtbaubereich substituiert, bietet sich dieses Hochgeschwindigkeitsverfahren an. Der grundlegende Unterschied zu allen weiteren Umformverfahren [7] liegt darin, dass die elektromagnetische Umformung statt des sonst vorherrschenden Oberflächendruckes die integrale Kraftwirkung als Volumenkraftdichte im Material verteilt. Als Fertigungsverfahren hat die Elektromagnetische Blechumformung (EMB) ihren Entwicklungsursprung in den USA und der früheren Sowjetunion [8, 9].

Seit den sechziger Jahren des 20. Jahrhunderts entstand eine Vielzahl von Veröffentlichungen, die sich mit der Beschreibung dieser sich in ihrer Entstehung befindlichen Technologie befassen [9, 10, 11]. Die ersten Arbeiten beschränken sich dabei überwiegend auf das Herausstellen von Anwendungsbeispielen, liefern aber bis dahin wenig Beiträge zum tiefergehenden Verständnis der elektromagnetischen und plastizitätstheoretischen Wirkmechanismen [12, 13, 14]. Spätere Arbeiten geben mehr Einblick in die umformtechnischen Grundlagen und zeigen bereits Versuche, die stattfindenden Prozesse einer analytischen Beschreibbarkeit zugänglich zu machen [15, 16, 17].

Die zentrale Herausforderung in der Berechnung besteht in der Bestimmung der sich räumlich in den beteiligten Komponenten ausbreitenden Stromdichteverteilungen [18, 19], die in magnetisch gekoppelter Wechselwirkung die erforderliche Kraft hervorrufen, sowie im Auffinden der auf mathematisch-physikalischer Modellierungsebene zu berücksichtigenden umformrelevanten Werkstoff- und Materialparameter [20].

Mit den im Laufe der Jahre generell verfügbar gewordenen und hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit bis zum heutigen Tage stetig weiterentwickelten numerischen Methoden [21, 22] ist die rechnergestützte Auswertung der beteiligten elektromagnetischen und strukturmechanischen Gleichungen zwar in ihrer Grundstruktur ein meist iterativ begangenes approximierendes Verfahren, bringt aber die bis dahin nicht verfügbare Möglichkeit mit sich, den Umformvorgang mit einer sich kontinuierlich erhöhenden Genauigkeit simulatorisch berechnen zu können [23]. Diese Werkzeuge finden insbesondere im Zuge einer Optimierung geplanter Anlagenentwürfe ihre Verwendung, da auf diese Weise im Sinne eines virtuellen Prototypen, der zu erwartende Prozess mit verhältnismäßig geringem Aufwand in sehr guter Genauigkeit simulatorisch überprüft werden kann, ohne den zeitaufwändigen Weg der messtechnisch am realen Prototypen durchzuführenden Verifikation gehen zu müssen.

Die Auslegung von in allgemeiner Form als elektro-mechanische Energiewandler zu beschreibenden Anlagen kann auf unterschiedlichen Bedürfnissen aufgebaut und von verschiedenen Aufgabenstellungen und Erwartungen getrieben sein. Ein geeignetes Verfahren zum Entwurf derartiger Systeme nimmt demnach möglichst präzise die zu spezifizierenden Forderungen auf, um auf inversem Wege die in der Gesamtstruktur eventuell zu identifizierenden Untersysteme entsprechend quantitativ beschreiben zu können [24]. Dafür ist der Übergang von einer eher abstrakten Sys-

tem sieht auf eine möglichst konkrete Modellierungsebene erforderlich, wie sie in der Elektrotechnik oft durch die Form elektrischer Ersatzschaltbilder verwirklicht wird. Deren Vorteil liegt aufgrund einer rein klemmenbasierten Beschreibungsform darin, dass einzelne modular durch ihr Ein-/Ausgangsverhalten beschreibbaren Komponenten systematisch im Hinblick auf die gestellten Anforderungen ausgelegt werden können. Als notwendige Voraussetzung geht diesem Schritt ersichtlicherweise die Festlegung einer mathematisch-physikalisch plausiblen Struktur voran [25], allerdings sei hier darauf hingewiesen, dass je nach Forderung unterschiedliche Strukturen zur Darstellung vorstellbar sein können.

Die im Werkstückmaterial zu erzielende Kraftwirkung ist von vielen unterschiedlichen Parametern abhängig; eine rechnergestützte numerische Auslegung elektromagnetischer Umformanlagen ist demnach nur auf dem Wege einer analytisch geprägten *Bottom-Up*-Methodik durchführbar, bei der der Einfluss einzelner Parametervariationen hinsichtlich ihrer Verbesserung oder Verschlechterung bewertet werden, bis ein den Eingangserwartungen entsprechendes zufriedenstellendes Ergebnis erreicht ist. Dieser Vorgang kann sich, abhängig von dem gewünschten Grad der zu erreichenden Optimierung, ersichtlicherweise als sehr zeitintensiv herausstellen [24]; zudem ist anfangs unbestimmt, ob generell und in welchem Ausmaße mit einer Verbesserung zu rechnen ist, so dass das Aufwand-Nutzen-Verhältnis zunächst nicht absehbar ist.

Eine andere Herangehensweise bietet der *Top-Down-Entwurfsprozess*, bei dem als Eingangsgröße das zu erzielende Ergebnis dient, und sich die Frage nach den dafür ursächlichen Parametern stellt. Sind die Zusammenhänge zwischen diesen unterschiedlichen Ebenen in geschlossener Form bekannt, so sollte es möglich sein, die freien Parameter in exakter Weise festlegen und bestimmen zu können [26]. Das Resultat stellt somit immer das optimal erreichbare Ergebnis dar, das sich mitunter in mehreren mathematisch parallel gleichberechtigten Lösungen widerspiegelt, die jedoch nicht zwingend eine technische Realisierbarkeit mit sich bringen müssen. Im Gegensatz zur *Bottom-Up*-Methodik muss beim *Top-Down*-Entwurf in der Regel zwar mit einer längeren Entwicklungszeit gerechnet werden, verleiht dem Anwender aber die Gewissheit, auf ein globales Optimum hinzuarbeiten.

Beide Methoden finden in unterschiedlichen Problemstellungen ihre Berechtigung; die vorliegende Arbeit beschreitet den zielgerichteten Weg eines Entwurfes und richtet sich vom Grundgedanken an einer synthesesch orientierten *Top-Down*-Vorgehensweise aus.