

## 0. Einleitung

Die Herstellung von Draht und Drahterzeugnissen auf hohem Qualitätsniveau ist nur möglich, wenn die Technologien des Drahtwalzens, des Gleit- bzw. Durchziehens und der Wärmebehandlungen sorgfältig aufeinander abgestimmt werden. Die Abfolge zwischen Verfestigung durch Ziehen und Entfestigung durch thermische Aktivierung bestimmt letztendlich die mechanischen Eigenschaften der gefertigten Drähte. Während das Erwärmen der Drähte im Hauben-, Topf- oder Durchziehofen oder auch beim elektrischen Widerstands-Durchlaufglühen ganz gezielt zur Rückführung des Formänderungsvermögens auf einen entsprechend duktilen Zustand durchgeführt wird, findet andererseits eine kaum beeinflussbare Eigenerwärmung des Drahtes in Abhängigkeit von Umformgrad und Umformfestigkeit während des Ziehens in der Umformzone statt. Diese naturbedingte Eigenerwärmung, bei der werkstoffabhängig ca. 85-95% der Umformarbeit in Wärme umgesetzt werden, während der Rest latent im Werkstoff verbleibt, beträgt im Einzelzug nur etwa ein- bis zweihundertfünfzig Kelvin. Jedoch finden an den Oberflächen von Draht und Ziehdüse - je nach Ziehbedingungen - durchaus wesentlich größere Temperaturerhöhungen statt. Allerdings kann auch die mittlere Drahttemperatur deutlich ansteigen, wenn bei Mehrfachzug die Drahtkühlung zwischen den einzelnen Zügen unzureichend ist, so daß sich die Enthalpien von Zug zu Zug akkumulieren. Hierdurch wiederum sind negative Auswirkungen auf die Drahteigenschaften möglich, wie sie z.B. infolge Alterungsversprödung höhergekohlter Stähle beobachtet werden.

Die thermischen Bedingungen in der Wirkfuge zwischen Draht und Ziehdüse hängen einerseits wesentlich von den Schmierungs- und Reibungsverhältnissen ab, andererseits wirken die Kontaktflächentemperaturen unmittelbar auf Schmierung und Reibung zurück. Die Kontaktflächentemperaturen, wie sie aus der tribomechanischen Wechselwirkung von Draht und Ziehdüse resultieren, haben letztlich auch Konsequenzen für den Werkzeugverschleiß und können den Eigenspannungszustand der Drähte beeinflussen. Darüberhinaus werden die Temperaturfelder von Draht und Ziehwerkzeug Wärmedehnungen und Wärmespannungen hervorrufen. Die thermisch bedingten Formänderungen der Ziehholgeometrie sind i.allg. vernachlässigbar gering. Allerdings müssen sie dennoch Berücksichtigung finden, wenn Effekten in ähnlicher Größenordnung nachgegangen werden soll, wie das z.B. bei einem experimentell-rechnerischen Verfahren der dynamischen Schmierfilmdickenbestimmung der Fall ist.

Neben den Temperaturverhältnissen, wie sie sich beim Drahtziehen in komplexem Wechselspiel von Erwärmen in der Ziehdüse und Abkühlen zwischen den Zügen bzw. auf der Ziehscheibe/Ziehtrommel ergeben, beanspruchen Zwischen- oder Schlußwärmebehandlung gleichfalls höchste Beachtung für Eigenschaften und Qualität der Drahterzeugnisse. Durch Variation der Wärmebehandlungsbedingungen, insbesondere durch gezielte Änderung der Temperatur-Zeit-Verhältnisse, lassen sich innerhalb werkstoffbedingter und anlagenabhängiger Grenzen vielfältige Werkstoffzustände und Drahteigenschaften einstellen. Die Ermittlung günstiger oder sogar optimaler Wärmebehandlungsparameter ist aufwendig und wird deshalb nach Möglichkeit im Labormaßstab realisiert. Der Erfolg hängt dann nicht zuletzt ganz wesentlich davon ab, ob die Übertragung der Laborergebnisse auf die industrielle Wärmebehandlungsanlage hinreichend genau möglich ist. Hierfür bedient man sich wärmetechnischer Ähnlichkeits- und Modellbetrachtungen. In dieser Hinsicht besonders kompliziert liegen die Verhältnisse immer dann, wenn sich der Realvorgang hochgradig instationär darstellt. Ein solches Problem liegt z.B. beim elektrischen Widerstands-Durchlaufglühen, dem sog. Ziehgühen vor. Hierbei ist die konduktive Wärmebehandlungsanlage der Ziehmaschine unmittelbar nachgeschaltet, so daß sie der Draht mit Ziehgeschwindigkeit durchfährt. Dabei wird er, je nach Ziehgeschwindigkeit, in wenigen Hundert Millisekunden mit bis zu Zehntausend Kelvin je Sekunde konduktiv aufgeheizt, um nach Erreichen der Maximaltemperatur im Wasserbad äußerst rasch wieder abgekühlt zu werden. Dieses Wärmebehandlungsverfahren konnte sich seit Mitte der fünfziger Jahre - zunächst für Kupfer, dann für einige weitere Kupferlegierungen - auf Grund seiner Vorteile hinsichtlich Energie- und Platzbedarf in den Ziehereien zunehmend etablieren. Im Gegensatz zu Wärme-

behandlungen, die vorwiegend thermisch stationär oder quasistationär geführt werden, bereiten hier allerdings Vergleich und Bewertung thermisch aktivierter Werkstoffreaktionen ungleich größere Probleme. Offensichtlich ist erst recht unter diesen stark instationären Bedingungen die sichere Auswahl einer geeigneten thermischen Prozeßführung nur möglich, sofern eine werkstoffgerechte, reaktionskinetische Beurteilung gelingt.

Insgesamt wird ersichtlich, daß Temperaturverhältnisse und Reaktionskinetik beim Ziehen und Wärmebehandeln eine wesentliche Bedeutung für Eigenschaften und Qualität des Erzeugnisses „Draht“ besitzen. Hieraus erklärt sich, daß auf diesem Gebiet bereits seit längerem sowohl theoretisch als auch experimentell geprägte Untersuchungen durchgeführt worden sind, die ihren Niederschlag im Fachschrifttum gefunden haben.

## 1. Technisch-wissenschaftlicher Erkenntnisstand

Obwohl *FOURIER* [FOU 22] bereits im ersten Viertel des neunzehnten Jahrhunderts einen prinzipiellen Weg zur Berechnung von Temperaturfeldern aufzeigen konnte, haben offenbar zuerst *SIEBEL* und *KOBITZSCH* [SIE 43] den Versuch unternommen, die Erwärmung des Drahtes beim Ziehen zu ermitteln. Insbesondere schätzen sie die experimentell unzugängliche Oberflächentemperatur des Drahtes beim Durchgang durch das Ziehhol ab, indem sie vereinfachenderweise die Oberflächenkrümmung vernachlässigen, das Temperaturprofil ins Drahtinnere durch einen parabolischen Ansatz annähern und schließlich die thermische Wechselwirkung mit dem Ziehwerkzeug durch einen empirischen Faktor berücksichtigen. Da sie bei ihrer Herleitung die *FOURIER*sche Wärmeleitungsgleichung völlig ignorieren, überprüft *KORST* [KOR 48] dieses Ergebnis - unter sonst gleichen Voraussetzungen -, indem er die Differentialgleichung der Wärmeleitung entsprechend integriert und feststellt, daß *SIEBEL* und *KOBITZSCH* bis zu etwa 8,5% zu hohe Randtemperaturen erhalten. Aber auch *KORST*'s Lösung basiert noch auf dem stark vereinfachenden Modell des halbbunendlichen Körpers und einer Randbedingung, die den Wärmeaustausch mit dem Ziehwerkzeug nur durch einen quantitativ kaum gesicherten Wärmeaufteilungsbeiwert realisiert.

Ausführlicher untersucht dann *KRASILSCIKOV* [KRA 62] die Erwärmung des Drahtes beim Kaltziehen. Er bedient sich dabei einer Lösung für das Vollzylinder-Temperaturfeld, wie es auf der Grundlage der Wärmeleitungsgleichung bei vorgeschriebener Wärmestromdichte am Körperend (Randbedingung 2. Art) herzuleiten ist - z.B. [TAU 71, (5.34)]. Wärmeaufteilung zwischen Draht und Ziehwerkzeug werden ebenso diskutiert wie experimentelle Befunde der Temperaturermittlung. Auch die von [LUE 57, Teil II] mit einem geteilten Draht-Düse-Element gemessene Temperaturabhängigkeit, die etwa der Kubikwurzel aus der Ziehgeschwindigkeit folgt, vergleicht er mit dem auf theoretischem Wege erhaltenen Ergebnis.

In den Arbeiten von *REHDER* [REH 68], *KOPP* [KOP 68] und *VOLLMER* [VOL 71] wird zur Berechnung der Drahttrandtemperatur im Ziehhol die einfache Formel von *SIEBEL* und *KOBITZSCH* herangezogen. Für die Drahtabkühlung nach dem Ziehwerkzeug gibt *REHDER*, ausgehend von einem parabolischen Temperatur-Ausgangsprofil in radialer Richtung, eine Anfangs-Randwertlösung der Wärmeleitungsgleichung an. Darüberhinaus führt er mit einem Thermorollen-Meßgerät Drahttemperaturbestimmungen durch und ermittelt experimentell die Kühlwirkung von Ziehtrommeln. *KOPP* untersucht in seiner Arbeit [KOP 68] die Erwärmungsverhältnisse in der Umformzone von Rundstäben sowohl auf theoretischem als auch auf experimentellem Wege. Unter Heranziehung der Geschwindigkeits- bzw. Bahnlinienfelder berechnet er Temperaturfelder und führt ergänzend Temperaturmessungen in mit Mantelthermoelementen bestückten Stäben bzw. Steckerproben durch. Ähnlichkeitstheoretische Betrachtungen ermöglichen die Übertragbarkeit auf geänderte geometrische, kinematische und bildsame Bedingungen.

Bereits frühzeitig wurden die Temperaturverhältnisse von Draht und Ziehwerkzeug mit den Mitteln der Elektroanalogie simuliert, z.B. *RANGER* [RAN 57], *NEDOVIZIJ* u.a. [NED 61], *TEMNIKOV* [TEM 71]. Mit wachsender Leistungsfähigkeit der Digitalrechenstechnik jedoch haben

sich verstärkt mathematisch-analytische sowie numerische Verfahren durchgesetzt. Die Ermittlung lokaler Draht- und Ziehwerkzeugtemperaturen auf der Grundlage eines numerischen Differenzenverfahrens teilt *ALTAN* [ALT 70] mit, wobei er u.a. die Bedingungen der Berechnungsbeispiele von *SIEBEL/KOBITZSCH* und von *RANGER* aus Vergleichsgründen übernimmt. Allerdings wird der Wärmeaustausch im Wirkflächenbereich von Draht und Ziehdüse idealisierend als perfekt angenommen, so daß die Oberflächentemperaturen im Bereich von Umform- und Führungslänge einander exakt entsprechen; vgl. auch *LAHOTI/ALTAN* [LAH 78]. *SNIDLE* [SNI 77] leitet mit dem Modell des halbunendlich ausgedehnten Körpers, wie bereits *KORST*, analytische Lösungen der Temperaturverhältnisse für den Draht ab, wobei er gegenüber *KORST* die lokale Änderung von Geschwindigkeit und Druck entlang der Umformzone berücksichtigt. *NEIMARLIJA* [NEI 83] berechnet das Temperaturfeld nach Diskretisierung mit der Randelementmethode (REM). Er vergleicht die Ergebnisse mit Temperaturmessungen, wobei trotz zahlreicher Unsicherheitsfaktoren von Messung und Rechnung insgesamt doch befriedigende Übereinstimmung konstatiert wird. Das Problem des endlichen Wärmeübergangswiderstands zwischen Draht und Ziehdüse im Wirkflächenbereich, hervorgerufen durch Oberflächenrauheit und Schmierfilm, wird zwar erkannt, muß jedoch - wie schon bei *ALTAN* - aus numerischen Gründen wiederum vernachlässigt werden.

Parallel zu den Bemühungen, die Temperaturverhältnisse immer genauer zu berechnen, wurden entsprechende Anstrengungen auch auf experimentell-meßtechnischem Gebiet unternommen. So bestimmen bereits *EICHINGER* und *LUEG* [EIC 41] den Anteil der im Draht latent verbleibenden Energie, indem sie der mechanischen Arbeit die Wärmemengen von Draht und Ziehwerkzeug gegenüberstellen. Dabei messen sie - neben der Ziehkraft - die Temperatur des die Ziehdüse verlassenden Drahtes auf thermoelektrische, die vom thermisch isolierten Ziehwerkzeug aufgenommene Wärmemenge dagegen auf kalorimetrische Weise. Auch bei nachfolgenden Untersuchungen zahlreicher weiterer Forscher werden die meßtechnischen Vorteile, die der thermoelektrische Effekt bietet, erfindungsreich zur Temperaturmessung an Draht und Ziehwerkzeug ausgenutzt. So werden z.B. Draht und Düse selbst als Thermopaar geschaltet [REI 50], [LUE 51], [LUE 57], oder die Mantelthermoelemente werden vor dem Ziehen geeignet in einen Draht- bzw. Stabstecker eingebettet [KOP 68], [PAW 69a] oder aber das Ziehwerkzeug selbst wird mit Thermoelementen entsprechend bestückt [KIS 68], [RIT 70], [RIT 71], [VOL 71] bzw. [PAW 73], [UYA 86].

Ungeachtet aller Unterschiede bei der Vervollkommnung experimentell-meßtechnischer sowie mathematisch-rechentechnischer Methoden besteht das gemeinsame Ziel der Forschungsanstrengungen letztlich darin, wesentlich temperaturbedingte Veränderungen von Drahtwerkstoff, Ziehschmiermittel und Werkzeug qualitativ und quantitativ möglichst umfassend und sicher einschätzen bzw. vorausbestimmen zu können. Hierbei gewonnene Erkenntnisse sollen insgesamt beitragen zur Herstellung von Drahterzeugnissen mit weiter verbesserten Qualitätsparametern bei gesteigerter Wirtschaftlichkeit.

Unter diesem Anspruch allerdings sind nicht allein die thermischen Bedingungen während des Ziehens zu beachten, sondern es kommt insbesondere auch allen Wärmebehandlungsprozessen, wie sie zwischen oder nach Ziehoperationen vorgenommen werden, eine herausragende Bedeutung zu. Verfahren und Technologie, mit der eine Wärmebehandlung durchgeführt wird, entscheiden maßgeblich sowohl über Eigenschaften und Qualität des hergestellten Drahtes als auch über ökonomische Aspekte seiner Produktion. Entsprechend vielfältig sind werkstoffkundliche und wärmetechnische Arbeiten hierzu, weshalb Zitate auf eine vergleichsweise verschwindende Auswahl beschränkt bleiben müssen.

Die Frage der Temperaturbestimmung an Drähten stellt sich also auch, sobald Erwärmungs- oder Abkühlungsvorgänge in Öfen oder Bädern z.B. beim Anlassen, Patentieren oder Durchlaufglühen durchzuführen sind. *MALLACH* führt hierzu zahlreiche Rechenbeispiele aus [MAL 65], indem er sich auf Näherungsbeziehungen aus *HEILIGENSTAEDT* [HEI 51] stützt; der Strah-

lungswärmeaustausch ist dabei im Wärmeübergangskoeffizienten zu berücksichtigen. Handelt es sich bei dem Draht/Stab um wärmetechnisch dickwandiges Gut, so ist eine Korrektur mittels Faktor nötig, der graphisch oder unter Lösung einer transzendenten Gleichung zu bestimmen ist [HEI 66]. Auch werden Formeln für den Mittelwert über den Drahtquerschnitt, für die Drahtoberfläche, die Differenz zwischen Rand und Achse des Drahtes sowie für das radiale Temperaturprofil angegeben, wobei allerdings stets eine transzendente Gleichung zusätzlich zu lösen ist.

Unter der Voraussetzung, daß der Draht als dünnwandiges Wärmegut angesehen werden kann, führen *BANGA/MESMAN* [BAN 66] eine Beziehung zur Berechnung der Drahttemperatur beim Wärmebehandeln in Durchlauföfen an. Dabei berücksichtigen sie den Wärmestrahlungsanteil exakt, vernachlässigen allerdings den konvektiven Wärmeaustausch.

Neben diesen speziellen Berechnungsformeln und Ergebnissen stellen nicht zuletzt einschlägige Fachbücher und Kompendien jene mathematischen Mittel bereit, deren sich der Technologe und Wärmetechniker zur Berechnung des Temperaturganges im Zusammenhang mit Wärmebehandlungsprozessen i.allg. bedienen kann, z.B. [CAR 59], [TAU 71], [SCH 83], [ECK 87], [GRÖ 88], [GRI 90], [HÄF 92], [BAE 94]. Erfahrungsgemäß wird die Festlegung geeigneter Randbedingungen, insbesondere die quantitativ zuverlässige Einschätzung der Wärmeübertragung, Unsicherheiten bereiten und Fragen aufwerfen, wobei sich auf zahlreiche experimentelle Untersuchungen und Ähnlichkeitstheoretische Zusammenhänge zurückgreifen läßt, z.B. [STE 87], [VDI 94]. Erhebliche zusätzliche mathematische Schwierigkeiten ergeben sich insbesondere dann, wenn im Zusammenhang mit analytisch geschlossenen Lösungsverfahren Nichtlinearitäten zu berücksichtigen sind, z.B. infolge temperaturabhängiger Stoffwerte oder nichtlinearer Randbedingungen, z.B. [JÄC 56], [JÄC 61], [MIT 75]. Der Aufwand vervielfacht sich gegenüber linearen Problemen beträchtlich, wie bereits einer Wärmeleitungsaufgabe bei nichtlinearen Randbedingungen im geometrisch vergleichsweise sehr einfachen Fall des halbumendlichen Körpers zu entnehmen ist [TAO 81].

Die wärmetechnischen Berechnungen sind als notwendige Voraussetzung auf dem Weg zum eigentlichen Ziel anzusehen, das darin besteht, die Temperaturführung so zu gestalten, daß das Halbzeug bzw. der Draht die gewünschten Eigenschaften ausbilden kann. Bei Kohlenstoffstählen z.B. wird zur Einstellung eines feinlamellaren perlitischen Gefüges eine sogen. Patentierbehandlung (Austenitisieren+Sorbitisieren) durchgeführt, wodurch dem Draht eine große Duktilität - bei relativ hoher Festigkeit - zurückgegeben wird [ECK 87, Kap. 4.1].

Werden die „Fertig“-Drahte vom Abnehmer nicht ziehart, sondern mit niedrigeren Festigkeiten verlangt, so können - wenn nicht „auf Festigkeit“ gezogen oder nachgezogen [LEP 97] wird - entsprechende Schlußglühungen erforderlich werden. Insbesondere beim Ziehen von Kupfer und einigen Kupfer-Legierungsdrähten, Aluminiumdrähten, aber ggf. auch von Stahldrähten hat sich das konduktive Durchlauf-Widerstandsglügen, speziell auch als kombiniertes Ziehen und Glügen (Ziehglügen), durchgesetzt. Hierbei wird der mit Ziehgeschwindigkeit aus der mehrzügigen Ziehmaschine kommende hochverfestigte Draht in einer sich unmittelbar anschließenden (oder vollintegrierten) elektrischen Durchlauf-Widerstandsglühe, in der der Draht zwischen mehreren spannungsführenden Kontaktrollen konduktiv aufgeheizt wird, im Zehntelsekundenbereich vollständig oder teilweise rekristallisierend wärmebehandelt [ROH 69], [SCH 69]. Jedoch bereits während des Ziehens ist der Draht neben den mechanischen Beanspruchungen stets auch unvermeidlichen thermischen Belastungen ausgesetzt, was sich sowohl auf den Ziehprozeß selbst (Schmierungsbedingungen, Ziehdüsenverschleiß) als auch auf die Drahteigenschaften (Eigenspannungen, mechanische Eigenschaften) mehr oder weniger stark auswirkt. So wird z.B. beim Ziehen von höher kohlenstoffhaltigen Drähten im Mehrfachzug eine wirksame Drahtkühlung erforderlich, um Erscheinungen der Alterungsversprödung zu unterbinden [YAM 83], [AER 87], [DAH 93, Kap. D3.2.2.3].

Allerdings stellt die Wärmebehandlung trotz langjähriger Anstrengungen und partieller Fortschritte noch immer ein empirisch ausgerichtetes Arbeitsgebiet dar. Das liegt nicht allein an der Werkstoffvielfalt, diverse mechanisch-thermische Behandlungszustände eingeschlossen, sondern auch am komplizierten thermisch-aktivierten Reaktionsverhalten vieler Werkstoffe und Legierungen. Während Wärmebehandlungsanlagen und thermische Prozeßführung besonders in den letzten fünfzehn Jahren ein hohes Entwicklungsniveau erreicht haben, vgl. z.B. [EBN 87], [LEH 87], [NOL 88], [KRA 88], [PÖT 88], [RUF 88], [KLE 89], [SCH 89], [LIE 92], ist die hinlängliche Charakterisierung eines Werkstoffs nach wie vor mit umfangreichen und i.allg. recht aufwendigen werkstoff- und metallkundlichen Untersuchungen verbunden - z.B. [PUP 90], [MEN 91]. Diese Anstrengungen werden letztlich um des bedeutenden Vorteils willen unternommen, eine flexiblere Gestaltung der Fertigung und die Optimierung von Wärmebehandlungstechnologien bei höchster Produktqualität zu erreichen.

Hierzu ist die mathematische Kopplung von Wärmebehandlung und Werkstoffreaktion erforderlich, d.h., ein thermisch-reaktionskinetisches Simulationsmodell wird benötigt. Während die reaktionskinetischen Verhältnisse unter isothermen Bedingungen seit den Arbeiten von [KOL 37], [AVR 39] und [JOH 39] theoretisch prinzipiell bekannt sind, ist das Interesse, auch nichtisotherme Bedingungen einer quantitativ-analytischen Behandlung zugänglich zu machen, offenbar erst in jüngerer Zeit stärker geworden [STE 78], [LEH 87a], [OTT 88], [REG 89], [MÜL 94], [NEI 95], [BRA 97]. Das ist insofern verwunderlich, als thermische Prozesse eigentlich stets instationär sind oder zumindest instationäre Anteile aufweisen; einen Prozeß dennoch als stationär zu betrachten, kommt einer mit Genauigkeitsverlust einhergehenden Idealisierung gleich. Der realitätsnäheren Beschreibung anisothermer Vorgänge kommen die Fortschritte der Rechentechnik entgegen, die eine breitere Anwendung rechenintensiver numerischer Methoden überhaupt erst möglich gemacht haben. Das betrifft in noch höherem Maße die aufwendige Modellierung und Computersimulation metallkundlicher Phänomene auf mikrostruktureller Ebene bis hin zur stärkeren Einbeziehung stereologischer Aspekte, z.B. [RIC 91], [ABB 92], [RIC 93], [GUN 95], [IND 96], [FAN 97].

Die stetige Weiterentwicklung verschiedener Modellvorstellungen führte zu einer immer umfassenderen qualitativen und quantitativen Charakterisierung der Materialeigenschaften in Abhängigkeit von Werkstoffausgangszustand und Prozeßbedingungen, eine Entwicklung, die auf anwendungstechnisch orientierte Bereiche der verarbeitenden Industrie künftig noch stärker ausstrahlen wird. Einzelne Werkstoffeigenschaften oder auch eine Kombination entsprechender Eigenschaften werden sich Kundenwünschen zunehmend besser anpassen lassen, wobei die Computersimulation mit deskriptiven und adaptiven Modellen an Bedeutung weiter gewinnen wird.

Während der Bearbeitung verschiedener Aufgaben aus Forschung und Industrie, insbesondere zum Ziehen und Wärmebehandeln von Draht, traten wiederholt auch Fragen auf, die mit den im Fachschrifttum angegebenen Methoden und Ergebnissen nicht immer befriedigend beantwortet werden konnten. Für die rechnerische Ermittlung der Temperaturverhältnisse beim Ziehen und Wärmebehandeln sind zwar zahlreiche Einzelergebnisse vorhanden, jedoch beruhen diese auf z.T. sehr unterschiedlichen Voraussetzungen, wie schon ausgeführt wurde. Es ist deshalb mitunter schwer oder sogar unmöglich, übergreifende Zusammenhänge zwischen einzelnen Herangehensweisen und Ergebnissen zu vermuten oder gar zu erkennen. Eine gezielte Auswahl bzw. qualifizierte Entscheidung für eines von mehreren wärmetechnischen Modellen ist damit zumindest sehr erschwert. Insbesondere den Fragen der Wärmeübergangsrandbedingungen (lineare 1., 2. oder 3. Art oder nichtlineare) oder der Körpergeometrie (halbunendlicher Körper, Vollzylinder) wurde im Fachschrifttum offenbar nur begrenzte Aufmerksamkeit zuteil. Vergleichende Betrachtungen auf der Grundlage eines umfassenderen wärmetechnischen Modells fehlen bisher.

Aber auch die Probleme der Ankopplung von Draht und Ziehöse unter besonderer Berücksichtigung des Wärmeübergangswiderstands in der Wirkfuge, die Durchmesseränderung des Drahtes infolge überlagerter mechanisch-thermischer Formänderung des Ziehholts oder auch der

Fragenkomplex zur Wechselwirkung von Drahtwindungen und Ziehtrommel im mechanisch-thermischen Kontakt sind - zumindest mit mathematisch-analytischen Modellen - offenbar noch nicht gelöst worden. Die thermischen Berechnungen von Einzelzügen, insbesondere jedoch auch von Zugfolgen in Mehrfachzügen erfordern sowohl die Berücksichtigung der Drahterwärmung durch Formänderungs- und Reibungsarbeit einschließlich der Draht-Ziehöse-Kopplung als auch der Drahtkühlung zwischen den Zügen einschließlich Draht-Ziehtrommel-Wechselwirkung.

Im Rahmen der Entwicklung, Verbesserung und Optimierung von Wärmebehandlungstechnologien ergibt sich immer wieder die Notwendigkeit, Werkstoff- bzw. Drahteigenschaften, die i.allg. unter verschiedenen nichtisothermen Glühbedingungen gewonnen worden sind, miteinander vergleichen und bewerten zu müssen. Die in der Drahtindustrie hierbei angewandte, überwiegend rein empirische Vorgehensweise ist sehr aufwendig, nur begrenzt genau sowie auf andere Temperatur-Zeit-Bedingungen und Wärmebehandlungsanlagen kaum übertragbar. Eine Ursache für diese unbefriedigende Situation ist wohl darin zu suchen, daß ein hinreichend anwenderfreundliches Modell für diesen Anwendungsfall nicht existiert. Dieser Mangel tritt um so deutlicher in Erscheinung, je kürzer die Wärmebehandlungszeiten und damit je ausgeprägter instationär die thermischen Verhältnisse werden. Die Verfahren des Durchlaufglühens und insbesondere des sogen. „Ziehglühens“, bei dem die Wärmebehandlung i.allg. nicht länger als wenige Zehntelsekunden dauert, sind davon besonders betroffen. Aber auch bei längerwährenden Wärmebehandlungen im Hauben- oder Topföfen können nur näherungsweise berücksichtigte oder sogar vernachlässigte Aufwärm- und Abkühlphasen die Qualität und optimale Gestaltung von Technologie und Fertigung beeinträchtigen bzw. verhindern.

## 2. Thermisches Modell

Der vorliegende Erkenntnisstand zu Temperaturverhältnissen und Reaktionskinetik beim Ziehen und Wärmebehandeln von Draht sowie die auf diesem Gebiet festgestellten Defizite haben Veranlassung gegeben, die folgenden Problemkreise einer intensiveren Analyse und Bearbeitung zu unterziehen.

### 2.1 Zielstellung

1. Entwicklung eines mathematischen Modells auf der Basis von bewegtem Vollzylinder und endlich langem Hohlzylinder zur Berechnung der thermischen Verhältnisse von Draht und Ziehöse/Ziehtrommel beim Ziehen sowie beim Wärmebehandeln von Drähten bzw. Stäben. Dieses mathematische Modell soll so beschaffen sein, daß es einerseits im Sinne weitestgehender Realitätstreue bis etwa an die Grenzen dessen geht, was mit durchgängig analytischen Mitteln bei vertretbarem Aufwand noch möglich ist, andererseits soll es durch Vereinfachung und asymptotische Näherung die Spezialisierung entsprechender Lösungen zulassen, um Schrifttumsergebnisse damit vergleichen und in den neuen, allgemeineren Kontext einordnen zu können.
2. Herleitung analytischer Beziehungen zur Berechnung thermoelastischer Spannungen und Formänderungen von Voll- und Hohlzylinder mit dem Ziel, die Auswirkungen von Armierungszustand (Schrumpfübermaß) und radialen Druck- und Temperaturverhältnissen des Ziehwerkzeugs auf den Durchmesser des gezogenen Drahtes zu ermitteln.
3. Anwendung des thermischen Modells auf Drahterwärmung durch Umformung im Einzel- und Mehrfachzug, auf Kopplung Draht-Ziehöse und Draht-Ziehtrommel und schließlich auf die Temperaturberechnung beim Wärmebehandeln von ruhenden oder axial bewegten Drähten.
4. Herleitung eines halbempirischen Werkstoffmodells auf der Grundlage von Diffusion und Reaktionskinetik, mit dem eine quantitative Beschreibung und Bewertung charakteristischer Werkstoffeigenschaften beim Wärmebehandeln, insbesondere auch in Abhängigkeit starker instationärer Temperatur-Zeit-Verhältnisse, möglich wird.

Diese Aufgabenstellung zur mathematisch-physikalischen Modellierung von Temperaturverhältnissen beim Ziehen und Wärmebehandeln sowie von thermisch aktivierten Werkstoffreaktionen erfordert die Hinzuziehung mathematischer Methoden, wie sie ingenieurtechnischem Personal nach Art und Umfang i.allg. nicht geläufig sind. Diese Methoden sind mathematisch anspruchsvoll und entsprechend aufwendig. Damit dennoch die ingenieur- und anwendungstechnischen Aspekte der Arbeit gegenüber den eher methodisch-handwerklichen gebührend hervortreten, werden die umfangreicheren Herleitungen und Lösungsdarstellungen des thermischen Modells in einem Anhang A wiedergegeben. Ungeachtet dessen erschließen sich die vielfältigen Möglichkeiten und der Variantenreichtum des thermischen Modells in vollem Umfange erst dann, wenn Querbezüge und Zusammenhänge deutlich werden. Hierfür stellen die Lösungsherleitungen das erforderliche „Gerüst“ bzw. das verbindende „Netz“ bereit. Deshalb ist für eine schöpferische Anwendung sowie zur Realisierung des Anspruchs, mehrere im Fachschrifttum verstreut vorhandene analytische Lösungen unter dem weitreichenderen Modell wiederfinden zu wollen, das Nachschlagen in diesem Anhang A unumgänglich. Zur Erleichterung der Zuordnung der Kapitel des Anhangs A zu jenen des Hauptteils tragen sie dieselben Nummern, die sie bei unmittelbarer Eingliederung in den Hauptteil haben würden. Die Anmerkungen des Anhangs B beziehen sich sowohl auf den Hauptteil der Arbeit als auch auf den Anhang A, der Anhang C schließlich enthält ausgewählte Programmbeispiele.

Insgesamt sind die genannten wärmetechnischen Fragestellungen und thermisch aktivierten Werkstoffreaktionen mit mathematisch-analytischen Mitteln - unter gelegentlicher Einbeziehung experimenteller Ergebnisse - zu untersuchen, nicht zuletzt mit dem Ziel, auf der Grundlage geschlossen-analytischer Lösungsdarstellungen sowohl qualitative Aussagen als auch vergleichsweise schnelle Algorithmen für numerische Untersuchungen oder ggf. On-line- bzw. Prozeßsteuerungen zu ermöglichen.

## 2.2 Lösungsweg

Die mathematisch-physikalische Modellierung von Vorgängen des Wärme- und Stofftransports beim Ziehen und Wärmebehandeln von Draht wird durchgängig dahingehend angestrebt, die mathematischen Resultate stets als analytisch geschlossene Lösungsgleichungen bzw. Näherungslösungen zu erhalten. Das hat zunächst den unschätzbaren Vorteil, eine solche Lösung jederzeit näher analysieren zu können, z.B. um die Wirkungsrichtung einzelner Parameter qualitativ abzuschätzen, ohne daß erst in z.T. aufwendigen Rechnungen numerische Resultate erzielt werden müssen. Aber selbst numerische Berechnungen auf der Grundlage analytischer Lösungen sind vorteilhafterweise i.allg. weit weniger aufwendig bezüglich der erforderlichen Ressourcen an Hardware, Software und Rechenzeit, als dies bei vordergründig numerisch ausgerichteten Lösungsmethoden (z.B. FDM, FEM, REM) der Fall ist [DAH 93, Kap. B4.8-B4.10]. Darüberhinaus erlaubt ein entsprechendes mathematisch-analytisches Modell einige bereits seit längerem für ingenieurspezifische Fragestellungen verwendete Berechnungsformeln in den erweiterten Kontext einzuordnen und zu bewerten.

Allerdings sind mit einem Modell, das Ergebnisse in der Form analytischer Lösungen vorsieht, aus zwingenden mathematischen Gründen auch gewisse Vereinfachungen hinzunehmen. Das betrifft vor allem Fragen der Geometrie, z.B. im Bereich der Umformzone für Draht und Ziehwerkzeug, wie auch Nichtlinearitäten, die aus der Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte oder aus dem Strahlungswärmeaustausch mit der Umgebung entstehen. Deshalb wird von der Berücksichtigung einer impliziten Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte abgesehen, wie es im Zusammenhang mit durchgängig analytischen Lösungsmethoden, von Spezialproblemen abgesehen, gezwungenermaßen allgemein üblich ist [BAE 94, Kap. 2.1.4].

Als Verkörperung des Drahtes/Stabes kann natürlicherweise der Vollzylinder dienen. Die konische Abweichung im Bereich der Umformzone infolge des Ziehdüsenhalbwinkels (ca.  $4-10^\circ$ ) wird durch einen geeignet mittleren Durchmesser auszugleichen sein. Entsprechend soll der



Ziehdüsenkern durch einen endlich langen Hohlzylinder approximiert werden. Die jeweiligen Anfangs-Randwertprobleme werden ausnahmslos für modifizierte bzw. erweiterte Randbedingungen 3. Art gelöst - siehe hierzu Kapitel A2.3. Eine solche verallgemeinerte Bedingung ist universeller anwendbar als eine gewöhnliche Randbedingung dritter Art, denn sie schließt nicht nur die Randbedingungen erster Art (Oberflächentemperatur vorgegeben), zweiter Art (Wärme flußdichte an der Oberfläche vorgegeben) und vierter Art (Oberfläche vollständig wärmeisoliert) als Grenzfälle mit ein, sondern gestattet insbesondere die gleichzeitige Berücksichtigung von *NEWTON*schem Wärmeübergang (konventionelle Randbedingung 3. Art) und weiteren Oberflächenquellen, wie sie z.B. durch Reibung (Randbedingung 2. Art) entstehen. Als Methode zur Lösung linearer partieller Differentialgleichungen vom Wärmeleitungstyp wird die zweidimensionale *LAPLACE*-Transformation herangezogen - im Falle des axial bewegten Vollzylinders für zwei sich einseitig ins Unendliche erstreckende Gebiete (in Zeit- und Achsrichtung), im Falle des Hohlzylinders bleibt das Transformationsgebiet in Achsrichtung endlich.

Im Gegensatz dazu wird im Zusammenhang mit der Modellbildung zur Beschreibung thermisch aktivierter Werkstoffreaktionen der Reihemethode nach *FOURIER* der Vorzug eingeräumt, wenn analytische Lösungen für Anfangs-Randwertaufgaben bei der Diffusion von Platte, Vollzylinder und Vollkugel hergeleitet sind.

Die Herleitungen und Lösungen von Voll- und Hohlzylinder sind in den Kapiteln A2.3 und A2.4 des Anhangs A nachzuschlagen. Die thermische Kopplung beider Körper wird in Kapitel A2.5 vorgenommen, während Formeln zur Berechnung der thermoelastischen Formänderungen und Spannungen in Kapitel A2.6 des Anhangs A wiedergegeben werden. Einige konkrete Anwendungen des thermischen Modells zum Ziehen von Drähten auf Einzel- und Mehrfachziehmaschinen, zur Drahtkühlung, zu thermoelastischen Auswirkungen sowie zum Wärmebehandeln ruhender und axial bewegter Drähte in Wärmebehandlungsanlagen, speziell zum elektrischen Durchlauf-Widerstandsglühen, wird in Kapitel 3.2 dargestellt. Für das thermisch aktivierte Werkstoffverhalten durch Wärmebehandlung wird in Kapitel 3.3 ein Werkstoffmodell auf der Grundlage von Diffusion und Reaktionskinetik hergeleitet und seine Anwendung wird vorgestellt.



### 3 Ziehen und Wärmebehandeln von Draht

Das Gleitziehen bzw. Ziehen von Drähten aus metallischen Werkstoffen ist ein Zug-Druck-Umformverfahren, bei dem ein Draht durch eine schwach konische Ziehöse gezogen wird, so daß sich sein Durchmesser verjüngt und seine Länge, dem Gesetz der Volumenkonstanz folgend, entsprechend vergrößert. Die hierbei stattfindende plastische Formänderung geht einher mit einer Verfestigung des Drahtes, die bis zu einem gewissen Grad durchaus erwünscht ist bzw. gefordert wird. Durch geeigneten Werkstoffeinsatz sowie angemessene Ziehbedingungen und Umformgrade sind Zugfestigkeiten von  $1800-2000 \text{ N/mm}^2$  bei Spannbeton- und Seildrähten, etwa  $2500-3000 \text{ N/mm}^2$  bei Federdrähten oder sogar  $2900$  bis zu  $3600 \text{ N/mm}^2$  bei hochfesten Stahlkorddrähten für Stahlgürtelreifen zu erreichen. Andererseits erschöpft sich mit wachsender Formänderung infolge gleichsam wachsender Versetzungsdichte das Umformvermögen eines Werkstoffs zunehmend, so daß es zur Erreichung gewisser Gesamtformänderungen bzw. Durchmesserreduktionen notwendig sein kann, eine oder sogar mehrere entfestigende Wärmebehandlungen, sogen. Zwischenglühungen in den Ziehprozeß einzugliedern. Beim Durchlauf-Widerstandsglühen von Draht z.B. liegen hochinstationäre Temperatur-Zeit-Verhältnisse vor, so daß die Bewertung des Rekristallisationsverlaufs und der einhergehenden Werkstoffreaktion mit dem herkömmlichen *JOHNSON-MEHL-AVRAMI*-Ansatz nicht mehr gegeben ist. Eine Weiterentwicklung reaktionskinetischer Beziehungen zur quantitativen Bewertung statischer Rekristallisations- und Kornwachstumsphänomene, insbesondere für instationäre Bedingungen, wird erforderlich.

#### 3.1 Mechanische und thermische Verhältnisse beim Drahtziehen

Die Spezifizierung der thermischen Randbedingungen und Quellen bedingt zunächst, einige allgemein mechanische und umformtechnische Überlegungen anzustellen. Während beim Ziehen die Erwärmungsvorgänge immer unmittelbar aus der Umwandlung mechanischer Arbeit (Umform- und Reibungsarbeit) resultieren, besitzt die Flächenpressung des Drahtes auf der Ziehtrommel - und damit die Drahtspannung selbst - für die Drahtkühlung herausragende Bedeutung. Insbesondere die mit der mechanisch-thermischen Kopplung „Draht-Ziehöse“ oder „Draht-Ziehtrommel“ verbundenen Fragen der Wärmeübertragung sind für die Problemlösung wichtig. Die Größenordnung des Wärmeübergangs im Festkörperkontakt wird u.a. von der Dicke des Schmierfilms auf dem Draht während des Ziehens abhängen.

##### 3.1.1 Erwärmung durch Umformung

Die Quellen der Erwärmung infolge Umformung ergeben sich zum einen als innere bzw. Volumenquellen  $q_V$ , die aus der fast vollständig in Wärme umgesetzten Umformleistung resultieren, und zum anderen als äußere bzw. Randquellen  $q_R$ , die aus der Reibarbeit zwischen den Wirkflächen hervorgehen [EIC 41]. Die plastische Dissipationswärme entspricht fast vollständig dem Produkt aus Fließspannung  $\sigma_F$  und Vergleichsformänderungsgeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}_V$ , d.h., der spezifischen Umformleistung, so daß sich die volumenbezogene Wärmequellendichte zu

$$q_V = \eta \cdot \sigma_F \cdot \dot{\epsilon}_V \quad (3.1.1-1)$$

ergibt; der materialabhängige Faktor  $\eta$  nimmt Werte im Bereich  $0,86 < \eta < 0,95$  an und berücksichtigt, daß ein geringer Teil der Umformarbeit als latente Energie im Umformgut gespeichert bleibt, ein Anteil, der i.allg. experimentell zu bestimmen ist [DAH 93, Kap. B 3.6.4.1], [HEL 98].

Die Randquellen können unter Verwendung eines Wärmeverteilungskoeffizienten  $m \in (0,1)$  vorgegeben werden als Wärmequellendichte an der Drahtoberfläche (Index  $D$ )

$$q_{RD} = m \cdot q_{Rges} \quad (3.1.1-2)$$

und als Wärmequellendichte an der Ziehholoberfläche (Index  $Z$ )

$$\mathbf{q}_{RZ} = (1 - m) \cdot \mathbf{q}_{R_{ges}} \quad (3.1.1-3)$$

so daß für die Summe

$$\mathbf{q}_{RD} + \mathbf{q}_{RZ} = \mathbf{q}_{R_{ges}} \quad (3.1.1-4)$$

gilt. Die aus der äußeren Reibarbeit insgesamt hervorgehende Wärmequellendichte - vgl. auch [DAH 93, Kap. B 3.6.4.6] - berechnet sich dabei zu

$$\mathbf{q}_{R_{ges}} := \tau_R \cdot v_R \quad (3.1.1-5)$$

wobei die Kontakt-Schubspannung zwischen den mit der Geschwindigkeit  $v_R$  gegeneinander bewegten Wirkflächen bei Vorliegen z.B. COULOMBScher Reibungszustände bekanntlich durch

$$\tau_R = \mu \cdot \sigma_N \quad (3.1.1-6)$$

gegeben ist, wenn  $\mu$  den Reibungsbeiwert und  $\sigma_N$  die Kontakt-Normalspannung bezeichnen.

Die Wahl des Wärmearaufteilungsbeiwertes  $m$  hat sich nach der Art der verwendeten Randbedingung zu richten. Bei Vorliegen von Lösungen für **Randbedingung 2. Art**, z.B. in der asymptotisch entwickelten Form (A2.3.2.8-5.3) bzw. (A2.3.2.8-5.4), die im vorliegenden Zusammenhang aus den entsprechenden Lösungen für erweiterte Randbedingungen 3. Art (A2.3.1-5) durch  $\alpha$  bzw.  $h \rightarrow 0$  hervorgegangen sind, läßt sich grob abschätzen, daß der ziehgeschwindigkeitsabhängige Wärmearaufteilungsbeiwert im Bereich  $0,5 \leq m < 1$  liegen sollte; der kleinere  $m$ -Wert für kleine,  $m$ -Werte nahe Eins für große Geschwindigkeiten. Für einen über die Wirkfugenlänge (in achsialer Richtung) gemittelten Wärmearaufteilungsbeiwert  $\tilde{m}$  schlagen SIEBEL und KOBITZSCH, je nach Ziehgeschwindigkeit, einen Wert etwa im Bereich  $0,8 \leq \tilde{m} < 1$  vor (der kleinere Wert bei kleineren Ziehgeschwindigkeiten von ca. 1 m/s) [SIE 43], eine Aussage, die in Kapitel 3.1.1.4.1 überprüft und präzisiert wird.

Liegt dagegen eine erweiterte **Randbedingung 3. Art** der Form (A2.3-3) vor, so ist für den Wärmearaufteilungsbeiwert stets, d.h., unabhängig von der Ziehgeschwindigkeit,  $m = \frac{1}{2}$  anzusetzen, so daß die Randquellen durch

$$\mathbf{q}_{RD} = \frac{1}{2} \cdot \mathbf{q}_{R_{ges}} \quad \text{und} \quad \mathbf{q}_{RZ} = \frac{1}{2} \cdot \mathbf{q}_{R_{ges}} \quad (3.1.1-7)$$

gegeben sind; der jeweils selbe Zahlenfaktor bringt die Gleichberechtigung der Wirkflächen von Ziehhol und Draht an der Wärmeentstehung durch Reibung gemäß dem Prinzip „*actio=reactio*“ zum Ausdruck. Im Gegensatz zur Randbedingung 2. Art, wofür sich ein Wärmearaufteilungsbeiwert  $m$  i.allg. nur schwer quantifizieren läßt, handelt es sich bei dem Faktor  $\frac{1}{2}$  in (3.1.1-7) in Verbindung mit einer um Randquellen erweiterten Randbedingung 3. Art nicht um eine aus Mangel an Information getroffene Festlegung, sondern um die physikalisch einzig mögliche Annahme. Denn die Randquellen im Wirkfugenbereich von Draht und Ziehhol werden nicht aus einem gemeinsamen Reservoir gespeist, aus dem sie dann mehr oder weniger Energie - je nach thermischen Bedingungen - auf die Wirkflächen abführen und quantitativ unterschiedlich an die Festkörper weitergeben, wie es bei flüchtiger Betrachtung scheinen könnte. Jede Randquelle ist vielmehr substantiell - geometrisch, energetisch und stofflich - an die Reibfläche des jeweiligen Reibpartners untrennbar gebunden. Deshalb und infolge des mechanischen Prinzips „*actio=reactio*“ sind beide Reibpartner völlig gleichberechtigt am Entstehen der mechanischen Dissipationsleistung beteiligt, so daß allein die symmetrische Aufteilung von  $\mathbf{q}_{R_{ges}}$  auf beide Randquellen gerechtfertigt ist (vgl. DAH 93, Kap. B 3.6.4.7). Die thermische Wechselwirkung bzw.