

Diese Diplomarbeit besteht aus zwei Teilen:

Teil I ist die Beschreibung der Vorarbeiten zum interaktiven Tutorium “Maschinenlabor Optische Spannungsanalyse”, in der ...

- ... die mathematischen Zusammenhänge des zugrunde liegenden Problems im Maschinenbau hergeleitet und Algorithmen in *MuPAD* implementiert sowie
- Anforderungen und Erwartungen an das Lernen mit multimedialen Systemen vorgestellt werden.
- Besonderheiten von Multimedia gegenüber papierbasierten Medien und Kriterien zur Gestaltung interaktiver Systeme im Allgemeinen werden aufgezeigt und
- die Umsetzung davon im Speziellen wird diskutiert.
- Der Einsatz von Computeralgebra-Systemen wird mit herkömmlichen Programmiersprachen verglichen und die Implementation in *MuPAD* mit ihren Vor- und Nachteilen beschrieben.

In den Anhängen wird ...

- ... eine CD-ROM bereitgestellt, mit deren Hilfe die in der Arbeit entwickelte Lernumgebung auf einem PC unter Windows NT hergestellt werden kann, und
- der Einsatz von dynamischen Modulen anhand eines Beispiels erläutert.

Das in dieser Arbeit entwickelte interaktive Tutorium “Maschinenlabor Optische Spannungsanalyse” ist unter

<http://mm-info.uni-paderborn.de/tutorium>

erreichbar.

Teil II enthält ...

- ... die Print-Version des interaktiven Tutoriums “Maschinenlabor Optische Spannungsanalyse”, welches Studierende des Fachbereichs Maschinenbau an der Universität-GH Paderborn auf den Laborversuch vorbereitet.

Teil I

Computeralgebra-Systeme in der Lehre der
Ingenieurwissenschaften

Einsatz des CA-Systems *MuPAD* in der
interaktiven Lehrereinheit “Maschinenlabor Optische
Spannungsanalyse” im Maschinenbau

Diplomarbeit von

Hans Dietmar Jäger
Widukindstraße 47
33098 Paderborn

Eingereicht bei

Herrn Prof. Dr. Benno Fuchssteiner

an der

Universität-Gesamthochschule Paderborn
Fachbereich Mathematik / Informatik

13. Oktober 1999

Einleitung

Das Ziel dieser interdisziplinären Arbeit ist die Erstellung eines interaktiven Tutoriums “Maschinenlabor Optische Spannungsanalyse” für das Laboratorium für Technische Mechanik (LTM) an der Universität-GH Paderborn.

Das interaktive Tutorium soll dort ab dem Wintersemester 99/00 im Rahmen der Veranstaltung “Maschinenlabor” in der Lehre eingesetzt werden. Es dient den Studenten zur Vorbereitung auf den Versuch “Optische Spannungsanalyse” im Maschinenlabor und soll Hintergründe, den Stand der Forschung, Theorie und Praxis vermitteln und sie in die Lage versetzen, den Laborversuch selbständig durchführen zu können.

Das interaktive Tutorium wird auf dem Hyperwave Information Server [16], einem speziellen Web-Server, der Arbeitsgruppe “Informatik und Gesellschaft” am Heinz Nixdorf Institut bereitgestellt und ist unter der Adresse

`http://mm-info.uni-paderborn.de/tutorium`

öffentlich zugänglich. Es soll die derzeit existierende Print-Version ersetzen.

Dabei wird die Möglichkeit der Integration eines Computeralgebra-Systems in eine interaktive Lehreinheit anhand des CA-Systems¹ *MuPAD* [37] untersucht.

Der Bereich Software-Ergonomie der Informatik liefert im Rahmen eines Leitprinzips Kriterien für Gestaltung und Interaktion von multimedialen Lernumgebungen und stützt sich dabei auch auf Erkenntnisse aus der Psychologie.

Der Laborversuch “Maschinenlabor Optische Spannungsanalyse” beschäftigt sich mit spannungsoptischen Untersuchungen an ebenen Bauteilen aus spannungsoptisch aktivem Material. Dabei werden im Polaroskop doppelbrechende Eigenschaften des Materials zur Erzeugung eines Grauwertmusters ausgenutzt (siehe Abbildung 1).

Zuerst werden die mathematischen Hintergründe dargestellt, die beim Ausnutzen der optischen Effekte benötigt werden. Dies umfaßt die Herleitung der Spannungsansatzfunktionen auf Grundlage spannungsoptischer Ansätze von Dally und Sandford [25] und die Einbettung der Ansatzfunktionen in die analytischen Zusammenhänge der optischen Spannungsanalyse.

Bei der Untersuchung ergeben sich zwei Wege der Betrachtung: Zuerst wird die Möglichkeit dargestellt, zu vorgegebenen Parametern, den Spannungsintensitätsfaktoren, das zugehörige Isochromatenbild² zu berechnen. Die Überlagerung mit dem experimentell gewonnenen Isochromatenbild kann eine Beurteilung der gewählten mathematischen Spannungsansatzfunktionen zulassen. Im weiteren wird auf die in

¹CA-System ist in dieser Arbeit die Abkürzung für Computeralgebra-System

²Isochromaten stellen Linien gleicher Hauptspannungsdifferenz dar

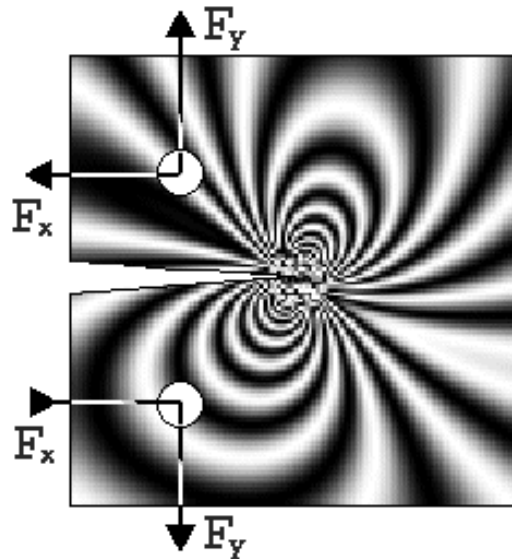


Abbildung 1: Belastete Probe im Polaroskop mit resultierendem Isochromatenbild

der Praxis viel interessantere Möglichkeit eingegangen, zu einem experimentell gewonnenen Isochromatenbild die Spannungsintensitätsfaktoren zu berechnen, die eine Aussage über die Entfernung des Bauteils zum kritischen Punkt des Versagens und damit dessen Stabilität selbst zulassen. Dieses Verfahren kann zum Beispiel bei Materialprüfverfahren im Flugzeugbau oder der industriellen Flaschenproduktion eingesetzt werden.

Da sich heute in der Aus- und Weiterbildung ein grundlegender Wandel vollzieht weg von traditionellen Formen des Lernens – zu einem festen Zeitpunkt an einem bestimmten Ort – hin zu individuellem Lernen am Bildschirm, wird auf die veränderte Lernsituation im zweiten Kapitel kurz eingegangen.

Im Mittelpunkt der Betrachtung steht dabei der Einsatz von Multimedia im Lernprozeß, wobei eine Klassifizierung in *Computer Based Training* und *Web Based Training* vorgenommen wird, und zu welchen Konsequenzen dies bei der Gestaltung des interaktiven Tutoriums “Maschinenlabor Optische Spannungsanalyse” geführt hat.

Danach geht es um die Gestaltung eines interaktiven Systems der Klasse der *Web Based Training* im allgemeinen. Die grundlegenden Unterschiede und Qualitäten verschiedener Medien werden vorgestellt und die Print- und elektronische Form einer Lehreinheit verglichen.

Dazu wird als Gestaltungsansatz das Prinzip der “Reduzierung erzwungener Sequentialität” [34] angewendet, welches von Keil-Slawik in der Arbeitsgruppe “Informatik

und Gesellschaft” am Heinz Nixdorf Institut der Universität-Gesamthochschule Paderborn entwickelt wird. Die darin enthaltenen Kriterien zum Gestalten interaktiver Systeme werden vorgestellt und an Beispielen des interaktiven Tutoriums “Maschinenlabor Optische Spannungsanalyse” verdeutlicht.

Im vierten Kapitel wird die für die Realisierung der interaktiven Lehreinheit “Maschinenlabor Optische Spannungsanalyse” gewählte Lösung vorgestellt und über Vor- und Nachteile diskutiert.

Es wird auf grundlegende technische Aspekte, die die Bereitstellung der Lehreinheit betreffen, wie auch auf inhaltliche, funktionale und technische Besonderheiten der Präsentationsform eingegangen.

Das letzte Kapitel beschäftigt sich mit der Frage, ob und in welchem Maße ein CA-System in der Lage ist, durch die Bereitstellung von interaktiven Dokumenten zusätzliche Einsichten in mathematische Zusammenhänge zu schaffen. Der Einsatz eines CA-Systems wird dabei mit den Möglichkeiten von herkömmlichen Programmiersprachen verglichen.

Weiter wird auf das für diese Lehreinheit ausgewählte CA-System *MuPAD*, welches in Kooperation der *MuPAD* Research Group der Universität-Gesamthochschule Paderborn und der Sciface Software GmbH & Co. KG entwickelt wird, und dessen Fähigkeiten eingegangen. Abbildung A.3 zeigt auf Seite 80 ein *MuPAD*-notebook.

Die im Anhang A enthaltene CD-ROM ermöglicht die Installation der kompletten Umgebung des interaktiven Tutoriums auf einem PC unter Windows NT. Weiterhin werden Bildschirmkopien der Arbeitsumgebung und eines *MuPAD*-notebook gezeigt. Diese Diplomarbeit wie auch das Tutorium in Print-Form inklusive aller Bilder und Grafiken liegen auf der CD-ROM als PostScript-, pdf-, dvi- und tex-Datei vor.

Im Anhang B wird kurz auf das in *MuPAD* enthaltene Konzept der dynamischen Module [5] eingegangen, welches die Integration von externen Software-Paketen in interaktive CA-Systeme ermöglicht.

Die praktische Vorgehensweise wird anhand eines für die Überarbeitung des Tutoriums erstellten Programms zur numerischen Berechnung von Isochromatenbildern auf Grundlage der analytischen mathematischen Beziehungen beispielhaft erläutert.

Glossar

animated-gif Eine Serie von – meist aufeinanderfolgenden – Bildern, die in einer Datei gespeichert ist und filmartig gezeigt wird. Der Dateityp *gif* (*graphic interchange format*) stellt diese Option zur Verfügung.

Artefakt Eigentlich: Künstlich (vom Menschen) geschaffenes Ding. Hier: Vom Menschen geschaffene externe Erweiterung des Gedächtnisses, um geistige Prozesse zu unterstützen, wie zum Beispiel Notizen auf einem Blatt Papier.

Chromatische Abberation Farbfehler verursacht durch unterschiedliche Brechungsindizes verschiedener Wellenlängen des Lichts bei optischen Systemen. Brennpunkte verschiedener Farben liegen nicht in einer Ebene parallel zur Bildebene.

Handlungsausführung Manipulationen im Wahrnehmungsraum müssen für den Benutzer möglichst effizient sein, bestimmte Systemzustände zu erreichen.

HTML HyperText Markup Language ist die Beschreibungssprache für Veröffentlichungen im World Wide Web. Text und Auszeichnungen (Überschrift, kursive, etc.) liegen nebeneinander vor und die Darstellung ist vom Ausgabegerät abhängig.

Hyperwave Information Server Entstanden aus dem Projekt Hyper-G (Universität Graz) stellt der Server vom Prinzip eine objektorientierte Datenbank mit Web-Interface dar. Ein Vorteil dieses Dokument-Management-Systems ist u. a. die getrennte Behandlung von Inhalt, Form und Meta-Informationen.

Isochromaten Linien gleicher Hauptspannungsdifferenzen.

Isochromatenordnung Dimensionslose Angabe der Ordnung einer Isochromate.

LaTeX Ein auf einem zweistufigen Konzept basierendes Textverarbeitungsprogramm: Zuerst werden Text und Formatierungsbefehle in einem Editor eingegeben und anschließend durch ein Formatierungsprogramm bearbeitet, danach erfolgt die Ausgabe auf einem Bildschirm oder Drucker. Weiterentwicklung von T_EX.

Linear-elastisch Bei linear-elastischem Materialverhalten ist die Spannung gleich dem Elastizitätsmodul mal der Verzerrung ($\sigma = E\epsilon$). Weiterhin geht man davon aus, dass der plastische Bereich komplett fehlt oder aber nur ganz klein ist.

METAFONT Programm zum Erzeugen oder Vergrößern und Verkleinern von Zeichensätzen aus den sog. `.tfm` (T_EX-Font-Metrik)-Dateien und Modifizieren der Computer-Modern-Zeichensätze. Kann als allgemeines Grafiksystem bis hin zur Erzeugung beliebiger Bilder genutzt werden.

Multimedia Im engeren Sinne die Verschmelzung von verschiedenen Medien in einem System, welches Interaktion bereitstellt. Im weiteren Sinne ist dabei wichtig, daß die Speicherung und Übertragung durch ein einheitliches Instrument (den Computer) erfolgt.

MuPAD-notebook Ein interaktiv bearbeitbares Arbeitsblatt (*worksheet*) für das Computeralgebra-System *MuPAD*.

Polariskop Optischer Versuchsaufbau zur Verwendung in der Spannungsoptik. Er besteht aus einer (monochromatischen) Lichtquelle, einem linearen Polfilter, dem (transparenten) Werkstück, einem gegenüber dem ersten um 90 Grad gedrehten Polfilter und einer (Video-)Kamera.

Print-Material Gedruckte Informationen auf Papierbasis im Gegensatz zu Dokumenten in elektronischer Form.

Spannungsansatzparameter Bezeichnung der Parameter einer Funktion, welche in einem Ansatz zur Beschreibung des Spannungsverhaltens verwendet wird.

Spannungsoptische Konstante Eine vom Material, der Wellenlänge des verwendeten Lichts, von der Belastungs- und Dehnungsgeschwindigkeit sowie von der Temperatur abhängige Konstante. Die Bestimmung geschieht unter analytisch beschreibbaren Bedingungen (zum Beispiel mit der diametral belastete Kreisscheibe).

Sprödbbruch Materialien mit Sprödbbruch-Verhalten haben keinen plastischen Bereich beim Bruch (zum Beispiel Glas und Gußeisen). Im Gegensatz dazu stehen Materialien mit duktilem Bruchverhalten, das heißt, mit guter Dehn- oder Verformbarkeit beim Bruch.

Wahrnehmungsraum Bereich, der am Bildschirm gleichzeitig dargestellt wird. Dieser muß (software-ergonomischen) Kriterien genügen, damit er vom Benutzer erfaßt und mit der intendierten Bedeutung versehen wird.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Mathematische Zusammenhänge | 11 |
| 1.1 | Linear-elastische Bruchmechanik | 11 |
| 1.2 | Reihenansatz der Spannungskomponenten | 12 |
| 1.3 | Berechnung des Isochromatenbildes | 16 |
| 1.3.1 | Algorithmus als <i>MuPAD</i> -Programm | 18 |
| 1.4 | Berechnung der Spannungsansatzparameter | 20 |
| 1.4.1 | Aufstellen des Gleichungssystems | 21 |
| 1.4.2 | Ausgleichsprobleme | 22 |
| 1.4.3 | Methode der kleinsten Quadrate | 23 |
| 1.4.4 | Algorithmus als <i>MuPAD</i> -Programm | 25 |
| 2 | Lernen mit multimedialen Systemen | 33 |
| 3 | Gestaltung interaktiver Systeme | 39 |
| 3.1 | Unterschiede verschiedener Medienformen | 39 |
| 3.1.1 | Auflösung | 39 |
| 3.1.2 | Zeichensätze/Formeln | 40 |
| 3.1.3 | Verweise | 40 |
| 3.2 | Gestaltungsrichtlinien | 42 |
| 3.2.1 | EU-Bildschirmrichtlinie | 42 |
| 3.2.2 | Der Gestaltungsansatz “Reduzierung erzwungener Sequentialität” | 45 |
| 3.2.3 | Kriterien des Gestaltungsansatzes | 47 |
| 3.2.4 | Fazit | 52 |
| 4 | Das interaktive Tutorium | 55 |
| 4.1 | Überarbeitung | 55 |
| 4.1.1 | Text | 56 |
| 4.1.2 | Bild | 57 |
| 4.1.3 | Interaktion/Animation | 57 |
| 4.2 | Umsetzung | 60 |

| | |
|--|-----------|
| <i>INHALTSVERZEICHNIS</i> | 9 |
| 4.2.1 Realisierung in HTML | 60 |
| 4.2.2 Basis Hyperwave Information Server | 62 |
| 5 Computeralgebra-Systeme in der Lehre | 67 |
| 5.1 <i>MuPAD</i> im Vergleich | 67 |
| 5.1.1 Bibliotheken | 68 |
| 5.1.2 Hilfe | 69 |
| 5.1.3 Struktur | 69 |
| 5.1.4 Dynamische Module | 70 |
| 5.2 <i>MuPAD</i> im interaktiven Tutorium | 70 |
| 5.2.1 <i>MuPAD</i> Installation | 70 |
| 5.2.2 <i>MuPAD</i> -notebook Fenster | 71 |
| 5.2.3 Verbindung von <i>MuPAD</i> und Tutorium | 72 |
| 5.3 Aussicht | 73 |
| 6 Fazit | 75 |
| A Das interaktive Tutorium | 76 |
| A.1 Die CD-ROM | 76 |
| A.2 Bildschirmkopien | 78 |
| B Dynamische Module | 81 |
| B.1 Einsatz beim Berechnen von Isochromatenbildern | 81 |
| B.1.1 Das <i>MuPAD</i> -script | 82 |
| B.1.2 Das <i>MuPAD</i> -module | 84 |

Kapitel 1

Mathematische Zusammenhänge

Bei dem Verfahren der optischen Spannungsanalyse, einer experimentellen Methode, wie sie auch als Versuch im Maschinenlabor an der Universität-Gesamthochschule Paderborn durchgeführt wird, kann zwischen zwei Wegen unterschieden werden: Zum einen sollen aus einem Isochromatenbild (Interferenzlinien-System gleicher Hauptspannungsdifferenzen) die Spannungsansatzparameter bestimmt werden, zum anderen kann zu vorgegebenen Spannungsansatzparametern ein Isochromatenbild berechnet werden. Der erste Fall tritt in der Praxis auf, am zweiten lassen sich aber die grundlegenden Zusammenhänge besser erläutern.

So wird zuerst ein Überblick über die linear-elastische Bruchmechanik gegeben, dann werden grundlegende Beziehungen der Spannungsoptik genannt und wie im Tutorium “Maschinenlabor Optische Spannungsanalyse” auch die mathematischen Beziehungen und Verfahren für den zweiten und ersten Fall beschrieben.

1.1 Linear-elastische Bruchmechanik

Die Betrachtungsweise der Bruchmechanik setzt die Existenz von Rissen in den zu analysierenden Bauteilen grundsätzlich voraus und unterscheidet sich hierdurch im wesentlichen von der klassischen Festigkeitslehre. Insbesondere bei Konstruktionen mit erhöhten Sicherheitsanforderungen, wie sie im Flugzeug-, Schiff- und besonders auch Reaktorbau anzutreffen sind, stellen Rißinitiierungskonzepte der heutigen Bruchmechanik eine allgemein akzeptierte und benutzte Methode innerhalb der Festkörpermechanik dar. Die Grundlagen der Bruchmechanik werden in [14, 26, 13, 12, 10] umfassend beschrieben. An dieser Stelle sollen lediglich die mit der Aufgabenstellung in direktem Zusammenhang stehenden Bereiche erläutert werden.

Eine Rißausbreitung, die keine oder nur geringe plastische Verformungsanteile erkennen läßt, wird im allgemeinen als Spröbruch bezeichnet und kann durch mehrach-

sige Spannungszustände, hohe Beanspruchungsgeschwindigkeiten und extrem tiefe Temperaturen hervorgerufen werden [26].

Die Grundlage für eine bruchmechanische Behandlung derartiger Sprödbrüche bilden verschiedene Gleichgewichtsbetrachtungen unter der Voraussetzung linear elastischen Materialverhaltens. Als erster und wichtigster Ansatz in diese Richtung sei hier das 1921 von A. A. Griffith [3, 2] formulierte Sprödbruchkriterium für ideal spröde Körper genannt. Für die praktische Anwendung der bruchmechanischen Erkenntnisse existieren heute zahlreiche Normprüfungsvorschriften zur Ermittlung von bruchmechanischen Materialkennwerten sowie Regeln für die Auslegung und Bemessung von Konstruktionen aufgrund dieser Kennwerte. Sicherheitsanalysen für rißbehaftete Bauteile erlauben bei bekannter Geometrie der Fehlstelle eine obere Grenze für die von der Konstruktion noch ertragbare Belastung anzugeben.

Dazu dient zum Beispiel die Ermittlung der Spannungsintensitätsfaktoren, der wir uns hier zuwenden wollen. Denn wenn die Spannungsintensitätsfaktoren bekannt sind, kann im allgemeinen eine Aussage über die Haltbarkeit des Bauteils gemacht werden.

1.2 Reihenansatz der Spannungskomponenten

In [31] wird die Spannungsverteilung für den ebenen Fall in der Nähe der Rißspitze mit eingeschlossenem Winkel α für verschiedene Randbedingungen beschrieben. Hier benötigen wir den Fall, daß die radialen Kanten unbelastet sind und der eingeschlossene Winkel α sich 2π annähert (vgl. Abbildung 1.2 auf Seite 13).

Es wurde gezeigt [31, Seite 526], daß die Spannungsfunktion, z. B. die Lösung von $\nabla^4 \chi(r, \theta) = 0$, der Form

$$\begin{aligned} \chi(r, \theta, \lambda) &= r^{\lambda+1} F(\theta; \lambda) \\ &\stackrel{\text{def}}{=} r^{\lambda+1} [c_1 \sin(\lambda + 1)\theta + c_2 \cos(\lambda + 1)\theta + c_3 \sin(\lambda - 1)\theta + c_4 \cos(\lambda - 1)\theta] \end{aligned} \quad (1.1)$$

die Bedingung der spannungsfreien Kanten entlang $\theta = 0$ und $\theta = \alpha$ erfüllt mit geeigneter Wahl von λ . In unserem speziellen Fall von $\alpha = 2\pi$ folgt $\lambda = \frac{n}{2}$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) und die Spannungsfunktion ergibt sich zu

$$\begin{aligned} \chi\left(r, \theta; \frac{n}{2}\right) &= r^{\frac{n}{2}+1} \left[c_1 \sin\left(\frac{n}{2} + 1\right)\theta + c_2 \cos\left(\frac{n}{2} + 1\right)\theta \right. \\ &\quad \left. + c_3 \sin\left(\frac{n}{2} - 1\right)\theta + c_4 \cos\left(\frac{n}{2} - 1\right)\theta \right]. \end{aligned} \quad (1.2)$$

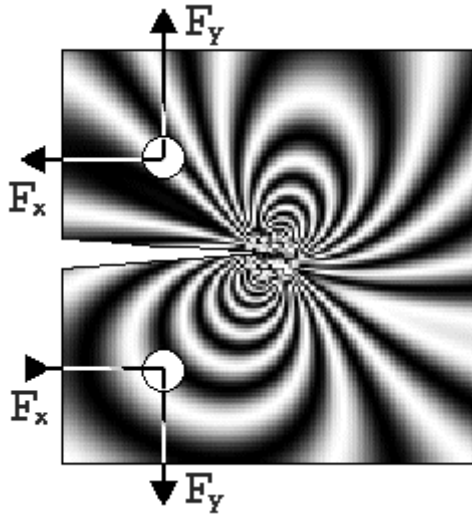


Abbildung 1.1: Belastete Probe im Polaroskop

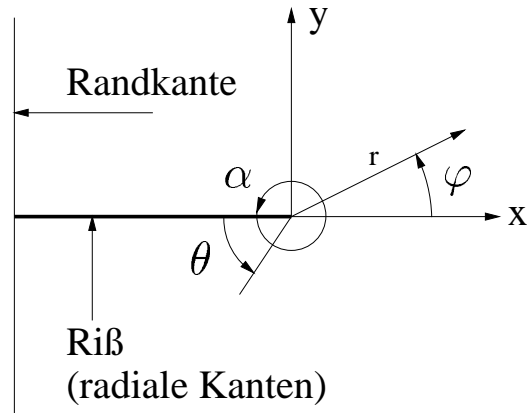


Abbildung 1.2: Geometrie des geraden Risses der zweidimensionalen (ebenen) Probe

Aus der allgemeinen Definition der Spannungsfunktionen

$$\sigma_r(r, \theta, \lambda) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \chi}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \chi}{\partial r} = r^{\lambda-1} [F''(\theta) + (\lambda + 1)F(\theta)], \quad (1.3)$$

$$\sigma_\theta(r, \theta, \lambda) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\partial^2 \chi}{\partial r^2} = r^{\lambda-1} [\lambda(\lambda + 1)F(\theta)] \quad \text{und} \quad (1.4)$$

$$\tau_{r\theta}(r, \theta, \lambda) \stackrel{\text{def}}{=} -\frac{1}{r} \frac{\partial^2 \chi}{\partial r \partial \theta} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial \chi}{\partial \theta} = r^{\lambda-1} [-\lambda F'(\theta)] \quad (1.5)$$

folgt mit den Bedingungen $\sigma_\theta = 0$ und $\tau_{r\theta} = 0$ für $\theta = 0$ und $\theta = \alpha = 2\pi$ aus den Gleichungen (1.2)-(1.5), daß $F(0, \frac{\alpha}{2}) = F'(0, \frac{\alpha}{2}) = F(2\pi, \frac{\alpha}{2}) = F'(2\pi, \frac{\alpha}{2}) = 0$. Diese vier Randbedingungen werden erfüllt durch

$$\chi \left(r, \theta; \frac{n}{2} \right) = r^{\frac{n}{2}+1} \left\{ c_3 \left[\sin \left(\frac{n}{2} - 1 \right) \theta - \frac{n-2}{n+2} \sin \left(\frac{n}{2} + 1 \right) \theta \right] + c_4 \left[\cos \left(\frac{n}{2} - 1 \right) \theta - \cos \left(\frac{n}{2} + 1 \right) \theta \right] \right\}. \quad (1.6)$$

Im weiteren werden wir aber die gebräuchlichere Variante der Form $\varphi = \theta - \pi$, vgl. Abbildung 1.2, verwenden womit sich die Spannungsfunktion aus Gleichung (1.6)

für $n = 1, 2, 3, \dots$ ergibt zu

$$\begin{aligned} \chi(r, \varphi) = \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ & (-1)^{n-1} a_{2n-1} r^{n+\frac{1}{2}} \left[-\cos\left(n - \frac{3}{2}\right)\varphi + \frac{2n-3}{2n+1} \cos\left(n + \frac{1}{2}\right)\varphi \right] \right. \\ & + (-1)^n a_{2n} r^{n+1} \left[-\cos\left(n - \frac{3}{2}\right)\varphi + \cos\left(n + \frac{1}{2}\right)\varphi \right] \\ & + (-1)^{n-1} b_{2n-1} r^{n+\frac{1}{2}} \left[\sin\left(n - \frac{3}{2}\right)\varphi - \sin\left(n + \frac{1}{2}\right)\varphi \right] \\ & \left. + (-1)^n b_{2n} r^{n+1} \left[-\sin\left(n - \frac{3}{2}\right)\varphi + \frac{2n-3}{2n+1} \sin\left(n + \frac{1}{2}\right)\varphi \right] \right\}. \end{aligned} \quad (1.7)$$

Für die Beschreibung des Spannungsfeldes entsprechend der Spannungen aus den Gleichungen (1.3)-(1.5) in der Umgebung der Rißspitze eines geraden Risses einer zweidimensionalen Probe ergibt sich so nach [32, Formel 11 - 13] der Reihenansatz für die Spannungskomponenten in Polarkoordinaten. Diese werden hier nur bis zum siebten Term dargestellt, da die erzielte Genauigkeit für spätere Berechnungen ausreicht.

$$\begin{aligned} \sigma_r(r, \varphi) = & \frac{1}{4\sqrt{r}} a_1 \left(-5 \cos \frac{\varphi}{2} + \cos \frac{3}{2}\varphi \right) + \frac{1}{4\sqrt{r}} b_1 \left(-5 \sin \frac{\varphi}{2} + 3 \sin \frac{3}{2}\varphi \right) \\ & + 4a_2 \cos^2 \varphi \\ & + \frac{1}{4}\sqrt{r} a_3 \left(3 \cos \frac{\varphi}{2} + \cos \frac{5}{2}\varphi \right) - \frac{1}{4}\sqrt{r} b_3 \left(9 \sin \frac{\varphi}{2} + 15 \sin \frac{5}{2}\varphi \right) \\ & + r a_4 (\cos \varphi + 3 \cos 3\varphi) - 2r b_4 (\sin \varphi + \sin 3\varphi) \\ & + \dots \\ \stackrel{\text{def}}{=} & \sigma_{rr} \end{aligned} \quad (1.8)$$

$$\begin{aligned} \sigma_\varphi(r, \varphi) = & \frac{1}{4\sqrt{r}} a_1 \left(-3 \cos \frac{\varphi}{2} - \cos \frac{3}{2}\varphi \right) + \frac{1}{4\sqrt{r}} b_1 \left(-3 \sin \frac{\varphi}{2} - 3 \sin \frac{3}{2}\varphi \right) \\ & + 4a_2 \sin^2 \varphi \\ & + \frac{1}{4}\sqrt{r} a_3 \left(5 \cos \frac{\varphi}{2} - \cos \frac{5}{2}\varphi \right) - \frac{1}{4}\sqrt{r} b_3 \left(15 \sin \frac{\varphi}{2} - 15 \sin \frac{5}{2}\varphi \right) \\ & + 3r a_4 (\cos \varphi - \cos 3\varphi) - 3r b_4 \left(\frac{5}{4} \sin \varphi - \frac{5}{12} \sin 3\varphi \right) \\ & + \dots \\ \stackrel{\text{def}}{=} & \sigma_{\varphi\varphi} \end{aligned} \quad (1.9)$$

$$\begin{aligned}
\tau_{r\varphi}(r, \varphi) &= \frac{1}{4\sqrt{r}}a_1 \left(-\sin \frac{\varphi}{2} - \sin \frac{3}{2}\varphi \right) + \frac{1}{4\sqrt{r}}b_1 \left(\cos \frac{\varphi}{2} + 3 \cos \frac{3}{2}\varphi \right) \\
&\quad - 2a_2 \sin 2\varphi \\
&\quad + \frac{1}{4}\sqrt{r}a_3 \left(\sin \frac{\varphi}{2} - \sin \frac{5}{2}\varphi \right) + \frac{3}{4}\sqrt{r}b_3 \left(\cos \frac{\varphi}{2} - 5 \cos \frac{5}{2}\varphi \right) \\
&\quad + ra_4 (\sin \varphi - 3 \sin 3\varphi) + 2rb_4 (\cos \varphi - \cos 3\varphi) \\
&\quad + \dots \\
&\stackrel{\text{def}}{=} \tau_{r\varphi}
\end{aligned} \tag{1.10}$$

Mit $K_I := -a_1\sqrt{2\pi}$, $K_{II} := b_1\sqrt{2\pi}$ und $\sigma_{0x} := 4a_2$ erhalten wir die von Dally und Sanford in [25] angegebene Schreibweise der Spannungskomponenten:

$$\begin{aligned}
\sigma_{rr} &= \frac{K_I}{4\sqrt{2\pi r}} \left(5 \cos \frac{\varphi}{2} - \cos \frac{3}{2}\varphi \right) + \frac{K_{II}}{4\sqrt{2\pi r}} \left(-5 \sin \frac{\varphi}{2} + 3 \sin \frac{3}{2}\varphi \right) \\
&\quad - \sigma_{0x} \cos^2 \varphi \\
&\quad + \frac{1}{4}\sqrt{r}a_3 \left(3 \cos \frac{\varphi}{2} + \cos \frac{5}{2}\varphi \right) - \frac{1}{4}\sqrt{r}b_3 \left(9 \sin \frac{\varphi}{2} + 15 \sin \frac{5}{2}\varphi \right) \\
&\quad + ra_4 (\cos \varphi + 3 \cos 3\varphi) - 2rb_4 (\sin \varphi + \sin 3\varphi) \\
&\quad + \dots
\end{aligned} \tag{1.11}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_{\varphi\varphi} &= \frac{K_I}{4\sqrt{2\pi r}} \left(3 \cos \frac{\varphi}{2} + \cos \frac{3}{2}\varphi \right) - \frac{K_{II}}{4\sqrt{2\pi r}} \left(3 \sin \frac{\varphi}{2} + 3 \sin \frac{3}{2}\varphi \right) \\
&\quad - \sigma_{0x} \sin^2 \varphi \\
&\quad + \frac{1}{4}\sqrt{r}a_3 \left(5 \cos \frac{\varphi}{2} - \cos \frac{5}{2}\varphi \right) - \frac{1}{4}\sqrt{r}b_3 \left(15 \sin \frac{\varphi}{2} - 15 \sin \frac{5}{2}\varphi \right) \\
&\quad + 3ra_4 (\cos \varphi - \cos 3\varphi) - 3rb_4 \left(\frac{5}{4} \sin \varphi - \frac{5}{12} \sin 3\varphi \right) \\
&\quad + \dots
\end{aligned} \tag{1.12}$$

$$\begin{aligned}
\tau_{r\varphi} &= \frac{K_I}{4\sqrt{2\pi r}} \left(\sin \frac{\varphi}{2} + \sin \frac{3}{2}\varphi \right) + \frac{K_{II}}{4\sqrt{2\pi r}} \left(\cos \frac{\varphi}{2} + 3 \cos \frac{3}{2}\varphi \right) \\
&\quad + \frac{1}{2}\sigma_{0x} \sin 2\varphi \\
&\quad + \frac{1}{4}\sqrt{r}a_3 \left(\sin \frac{\varphi}{2} - \sin \frac{5}{2}\varphi \right) + \frac{3}{4}\sqrt{r}b_3 \left(\cos \frac{\varphi}{2} - 5 \cos \frac{5}{2}\varphi \right) \\
&\quad + ra_4 (\sin \varphi - 3 \sin 3\varphi) + 2rb_4 (\cos \varphi - \cos 3\varphi) \\
&\quad + \dots
\end{aligned} \tag{1.13}$$

Singularitäten liegen genau für $r = 0$ vor, was für Rißprobleme charakteristisch ist. Durch die folgenden Terme höherer Ordnung in \sqrt{r} können beliebige Randbedingungen beschrieben werden.

1.3 Berechnung des Isochromatenbildes

Durch die Beziehungen für den Mohrschen Spannungskreis (siehe [11]) und die sogenannte Hauptgleichung der Spannungsoptik ergibt sich der Zusammenhang zwischen Isochromatenordnung n , der spannungsoptischen Konstante S , der Dicke der Probe B und den Spannungskomponenten (1.11)-(1.13) allgemein zu

$$\left(\frac{nS}{B}\right)^2 = (\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi})^2 + (2\tau_{r\varphi})^2 \quad (1.14)$$

und mit Lichtintensität I

$$I(n) = I_1 + I_2 \sin^2(\pi n) \quad (1.15)$$

mit I_1 ist die Lichtintensität für den unbelasteten Fall (bei einer idealen Dunkelfeldanordnung gilt $I_1 = 0$) und I_2 ist eine amplitudenmodulierte Lichtintensität ergibt sich die analytische Beziehung für die Lichtintensität I zu

$$I(K_I, K_{II}, \sigma_{0x}, a_3, b_3, a_4, \dots) = I_1 + I_2 \sin^2\left(\pi \frac{B}{S} \sqrt{(\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi})^2 + (2\tau_{r\varphi})^2}\right). \quad (1.16)$$

Für die Berechnung eines Isochromatenbildes werden die Reihenentwicklungen der Spannungsansatzfunktionen nach dem siebten Term abgebrochen, so daß zu vorgegebenen Parametern K_I, \dots, b_4 für jeden Punkt $p(x, y)$ die kartesischen Koordinaten in Polarkoordinaten umgewandelt, die Spannungskomponenten berechnet werden und die Helligkeit bestimmt wird.

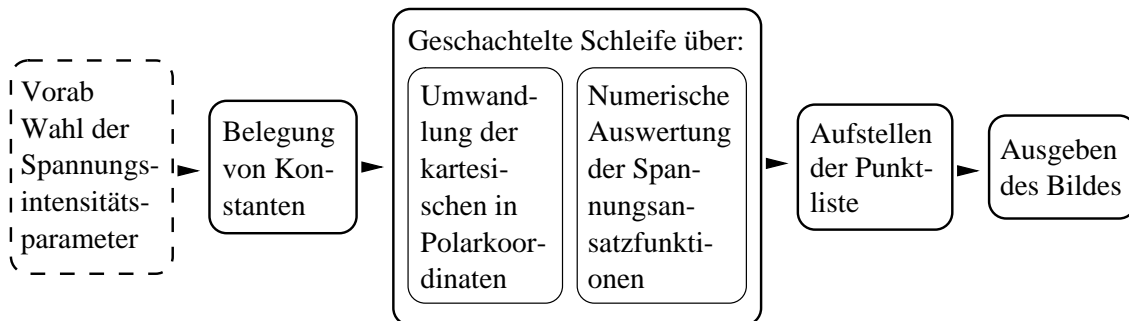


Abbildung 1.3: Schematischer Programmablauf

Die so generierten Isochromatenbilder dienen aber nicht nur der Veranschaulichung, sondern können in einem anderen Zusammenhang verwendet werden:

In der Praxis wird ein experimentell entstandenes Isochromatenbild untersucht und die Spannungsintensitätsfaktoren berechnet. Mit diesen können dann mathematisch berechnete Isochromatenbilder generiert und mit den ursprünglichen überlagert werden. Auf diese Weise läßt sich der mathematische Ansatz beurteilen und sein Gültigkeitsbereich definieren.

Siehe dazu auch Abschnitt 3.3, "Bestimmung der Spannungsansatzparameter", Seite 23f im Tutorium "Maschinenlabor Optische Spannungsanalyse".

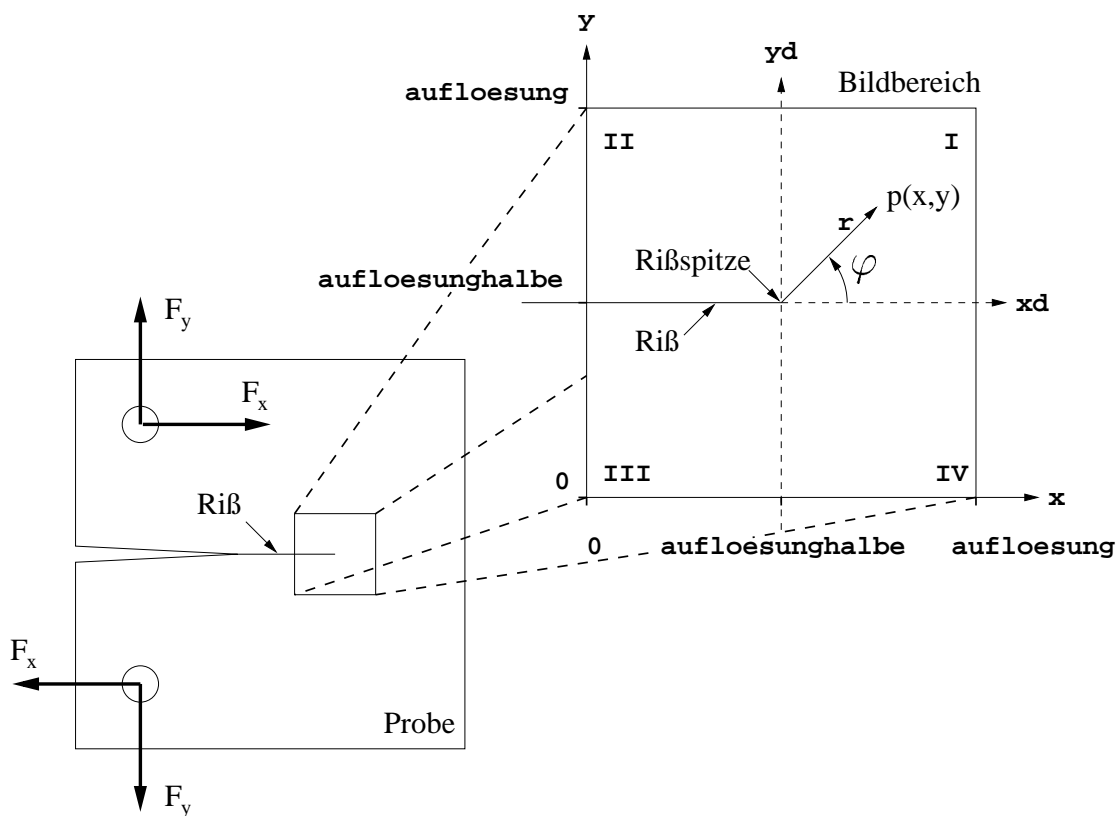


Abbildung 1.4: Koordinaten(-systeme) und Variablen bei den Berechnungen

1.3.1 Algorithmus als *MuPAD*-Programm

```
generiere:=proc()
begin
```

Die Textbreite der Ausgaberegion des *MuPAD*-notebook¹ erhält einen sinnvollen Wert. Der symbolische Wert von π wird für die numerischen Berechnungen einer Gleitpunkt-Variablen zugewiesen.

Längen werden durch den Faktor `skalierung` an die reale Bildgröße, hier 20 mm, angepaßt.

```
TEXTWIDTH:=66:
FPI:=float(PI):
skalierung:=20.0/aufloesung:
aufloesunghalbe:=aufloesung/2:
A:=array(1..aufloesung, 1..aufloesung):
print(Unquoted,"Berechnung gestartet."):
for y from 1 to aufloesung do
  for x from 1 to aufloesung do
```

Die geschachtelte Schleife durchläuft für die Tupel (x,y) alle Bildpunkte $p(x,y)$.

In den nächsten `if`-Abfragen werden die kartesischen Koordinaten in Polarkoordinaten umgerechnet.

Der Radius r errechnet sich leicht.

Allerdings muß eine gesonderte Betrachtung der x -Achse und des Mittelpunkts ($r = 0$) erfolgen, um Singularitäten bei der Berechnung des Winkels φ zu vermeiden. Diese wird hier zuerst durchgeführt.

Weiterhin muß eine Fallunterscheidung durchgeführt werden, da die trigonometrischen Funktionen nicht über den ganzen Bereich $[0, 2\pi]$ bijektiv sind. Es wird unterschieden, ob ...

```
  if x = aufloesunghalbe then
    r:=abs((y-aufloesunghalbe)*skalierung):
    if y > aufloesunghalbe then
      Phi:=FPI/2.0:
    else if y < aufloesunghalbe then
```

¹Der Begriff `notebook` bezeichnet bei *MuPAD* ein interaktives Arbeitsblatt, welches ein druckfertiges Dokument darstellt. Eine weitere Bezeichnung dafür ist auch *worksheet*. *MuPAD*-notebooks werden derzeit unter Windows 95/98/NT unterstützt.

```

        Phi:=3.0*FPI/2.0:
    else
        A[x,y]:=0.0:
        print(Unquoted,
            "Die Haelfte der Bildpunkte wurde berechnet!"):
        next:
    end_if:
end_if:
else
    xd:=x-aufloesunghalbe:
    yd:=y-aufloesunghalbe:
    r:=float(sqrt(xd^2+yd^2)*skalierung):
    if x < aufloesunghalbe then

```

$$\dots p(x, y) \in \{II \vee III\}, \dots$$

```

        Phi:=float(atan(yd/xd)+FPI)
    else if y >= aufloesunghalbe then

```

$$\dots p(x, y) \in \{I\}, \dots$$

```

        Phi:=float(atan(yd/xd))
    else

```

$$\dots \text{ oder } p(x, y) \in \{IV\} \text{ ist.}$$

```

        Phi:=float(atan(yd/xd)+2.0*FPI)
    end_if
end_if:
end_if:

```

Zur Beschleunigung der numerischen Berechnung werden mehrmals gebrauchte Werte nur einmal berechnet und einem Zwischenergebnis z1, ... zugewiesen. Leider wird dadurch die Übersichtlichkeit des Programmtextes eingeschränkt, doch die Rechenzeit erheblich verkürzt.

```

z1:=k1/sqrt(32.0*FPI*r):
z2:=k2/sqrt(32.0*FPI*r):
z4:=Phi/2.0:
z5:=1.5*Phi:
z8:=sin(z4):
z9:=sin(z5):
z10:=cos(z4):
z11:=cos(z5):

```

Die Spannungsansatzkomponenten σ_{rr} , $\sigma_{\varphi\varphi}$ und $\tau_{r\varphi}$ werden gemäß der 3-Parameter-Methode berechnet. Es kommen also nur die Terme K_I , K_{II} und σ_{0x} vor.

Der Helligkeitswert wird in der Matrix A gespeichert. Auch hier wird die Berechnung durch die Annahmen $B = 1$, $S = 1$, $I_1 = 0$ und $I_2 = 1$ stark vereinfacht.

Dennoch ist die Struktur der Formel (1.16) erkennbar.

```
sigmarr:=z1*(5.0*z10-z11)+z2*(-5.0*z8+3.0*z9)-sigma0x*cos(Phi)^2:
sigmaphi:=z1*(3.0*z10+z11)-z2*(3.0*z8+3.0*z9)-sigma0x*sin(Phi)^2:
taurphi:=z1*(z8+z9)+z2*(z10+3.0*z11)+0.5*sin(2.0*Phi):
A[x,y]:=sin(FPI*sqrt((sigmarr-sigmaphi)^2+(2.0*taurphi)^2))^2:
end_for:
end_for:
```

Die Helligkeitswerte sind jetzt für alle Bildpunkte berechnet. Es folgt die Aufstellung der Punkteliste für das hier verwendete Bildausgabeformat (`PlotPunkte:=`) und die Ausgabe des Bildes (`plot2d()`).

```
print(Unquoted,"Das Isochromatenbild wird generiert."):
PlotPunkte:=[(point(i,j,Colors=[A[i,j],A[i,j],A[i,j]]) $i=1..aufloesung)
    $j=1..aufloesung]:
titel:="Isochromatenbild fuer: k1 = ".expr2text(k1).
    ", k2 = ".expr2text(k2).", sigma0x = ".expr2text(sigma0x):
plot2d(Scaling=Constrained,Axes=None,Title=titel, [Mode=List, PlotPunkte]):
end_proc:
```

1.4 Berechnung der Spannungsansatzparameter

Auf der Grundlage der Beziehung (1.16) auf Seite 16 und (1.11)-(1.13) ist es uns auch möglich, aus spannungsoptischen Isochromatenbildern die Spannungsansatzparameter zu berechnen. Dazu beschreiben wir die Isochromatenschleifen durch eine Menge von Punkten $p_k(r_k, \varphi_k)$ mit zugehörigen Isochromatenordnungen n_k . Die daraus resultierenden Gleichungen ergeben ein überbestimmtes, nichtlineares Gleichungssystem für unsere Unbekannten. Dieses Gleichungssystem wird nach einer Umformung iterativ mit einem in *MuPAD* programmierten Algorithmus gelöst.

1.4.1 Aufstellen des Gleichungssystems

Die Isochromatenschleifen eines spannungsoptischen Grauwertbildes beschreiben wir durch eine Menge von Punkten $p_k(r_k, \varphi_k)$ mit zugehörigen Isochromatenordnungen n_k in Polarkoordinaten mit Radius r_k und Winkel φ_k , $k = 1, 2, \dots$. Ganzzahlige Isochromatenordnungen liegen auf der Mittellinie der dunklen Isochromatenschleifen vor. Für jeden Punkt erhalten wir nach (1.14) eine Gleichung

$$\begin{aligned} g_k(K_I, K_{II}, \sigma_{0x}, a_3, \dots, b_N) &:= \left(\frac{\sigma_{rr}(r_k, \varphi_k) - \sigma_{\varphi\varphi}(r_k, \varphi_k)}{2} \right)^2 + \tau_{r\varphi}^2(r_k, \varphi_k) - \left(\frac{nS}{2B} \right)^2 \\ &= D_k^2 + T_k^2 - \left(\frac{nS}{2B} \right)^2 \\ &= 0 \end{aligned} \tag{1.17}$$

mit

$$\begin{aligned} D_k &:= \left(\frac{\sigma_{rr}(r_k, \varphi_k) - \sigma_{\varphi\varphi}(r_k, \varphi_k)}{2} \right) \\ T_k &:= \tau_{r\varphi}(r_k, \varphi_k). \end{aligned} \tag{1.18}$$

Die Selektion von M Punkten ergibt M Gleichungen für $2N - 1$ Unbekannte mit $M \gg 2N - 1$. Unter dieser Voraussetzung werden die Abweichungen minimiert, wenn die Fehler in den Werten p_k zufällige Größen sind, die nach dem Gesetz der Gaußschen Normalverteilung verteilt sind [18, Seite 363f]. Dies führt zum überbestimmten, nichtlinearen Gleichungssystem in den Unbekannten K_I, K_{II}, \dots

Durch Entwickeln der Funktionen g_k in einer Taylorreihe und Abbrechen nach den linearen Termen erhalten wir das Newton-Verfahren für die Unbekannten $\Delta K_I, \Delta K_{II}, \dots$ im i -ten Iterationsschritt

$$\begin{aligned} g_k^{i+1} &= g_k^i + \left(\frac{\partial g_k}{\partial K_I} \right)^i \Delta K_I + \left(\frac{\partial g_k}{\partial K_{II}} \right)^i \Delta K_{II} + \left(\frac{\partial g_k}{\partial \sigma_{0x}} \right)^i \Delta \sigma_{0x} \\ &\quad + \left(\frac{\partial g_k}{\partial a_3} \right)^i \Delta a_3 + \dots + \left(\frac{\partial g_k}{\partial b_N} \right)^i \Delta b_N. \end{aligned} \tag{1.19}$$

Wenn wir die Funktion g_k zum Beispiel nur in Abhängigkeit der Variablen K_I betrachten, ergibt sich mit

$$\frac{\partial g_k(K_I^i)}{\partial K_I} = g_k'(K_I^i) \quad , \quad \Delta K_I = (K_I^{i+1} - K_I^i) \quad \text{und} \quad \lim_{i \rightarrow \infty} g_k(K_I^{i+1}) = 0$$

$$\begin{aligned}
g_k(K_I^{i+1}) &= g_k(K_I^i) + g'_k(K_I^i)(K_I^{i+1} - K_I^i) \\
\Leftrightarrow -g_k(K_I^i) &= g'_k(K_I^i)(K_I^{i+1} - K_I^i) \\
\Leftrightarrow K_I^{i+1} &= K_I^i - \frac{g_k(K_I^i)}{g'_k(K_I^i)},
\end{aligned} \tag{1.20}$$

und damit das Newton-Verfahren $x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$.

Mit der Forderung aus (1.17)

$$\lim_{i \rightarrow \infty} g_k^{i+1} = 0 \tag{1.21}$$

erhalten wir aus (1.19) für jeden Punkt p_k eine Gleichung der Gestalt

$$\begin{aligned}
0 = g_k^i + \left(\frac{\partial g_k}{\partial K_I}\right)^i \Delta K_I + \left(\frac{\partial g_k}{\partial K_{II}}\right)^i \Delta K_{II} + \left(\frac{\partial g_k}{\partial \sigma_{0x}}\right)^i \Delta \sigma_{0x} \\
+ \left(\frac{\partial g_k}{\partial a_3}\right)^i \Delta a_3 + \dots + \left(\frac{\partial g_k}{\partial b_N}\right)^i \Delta b_N
\end{aligned} \tag{1.22}$$

und daraus das überbestimmte, lineare Gleichungssystem in den Unbekannten $\Delta K_I, \Delta K_{II}, \dots$ im i -ten Iterationsschritt

$$\begin{pmatrix} -g_1 \\ \vdots \\ -g_k \\ \vdots \\ -g_M \end{pmatrix}^i = \begin{pmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial K_I} & \frac{\partial g_1}{\partial K_{II}} & \frac{\partial g_1}{\partial \sigma_{0x}} & \frac{\partial g_1}{\partial a_3} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial b_N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial g_k}{\partial K_I} & \frac{\partial g_k}{\partial K_{II}} & \frac{\partial g_k}{\partial \sigma_{0x}} & \frac{\partial g_k}{\partial a_3} & \dots & \frac{\partial g_k}{\partial b_N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial g_M}{\partial K_I} & \frac{\partial g_M}{\partial K_{II}} & \frac{\partial g_M}{\partial \sigma_{0x}} & \frac{\partial g_M}{\partial a_3} & \dots & \frac{\partial g_M}{\partial b_N} \end{pmatrix}^i \begin{pmatrix} \Delta K_I \\ \Delta K_{II} \\ \Delta \sigma_{0x} \\ \Delta a_3 \\ \vdots \\ \Delta b_N \end{pmatrix}^i, \tag{1.23}$$

kurz

$$g^i = C^i \delta^i. \tag{1.24}$$

1.4.2 Ausgleichsprobleme

Es liegt in (1.23) ein Gleichungssystem vor, bei dem die Anzahl M der Gleichungen größer ist als die der Unbekannten $2N - 1$. Dieses überbestimmte, inhomogene, lineare Gleichungssystem läßt sich im allgemeinen nicht lösen, da zwar die ersten $2N - 1$ Gleichungen bei paarweise verschiedenen Punkten p_k erfüllt werden können, die verbleibenden $M - 2N + 1$ Gleichungen im Normalfall dann aber *nicht* erfüllt

sind. Es sollte daher versucht werden, *alle* Gleichungen wenigstens annähernd zu erfüllen.

In diesem Zusammenhang wird an den Begriff des Residuums erinnert. Wenn wir in die rechte Seite von (1.22) beliebige aber feste Werte $\Delta K_I, \Delta K_{II}, \dots$ einsetzen, erhalten wir im allgemeinen nicht 0, sondern ein Residuum s_k . Und durch Einsetzen der Werte in alle M Gleichungen die Residuen s_1, s_2, \dots, s_M .

Klar ist jetzt, daß wir das Problem (1.23) dann am besten gelöst haben, wenn wir für geeignete $\Delta K_I, \Delta K_{II}, \dots$ alle Residuen möglichst gleichmäßig klein gemacht haben. Hierfür gibt es Verfahren, die die Residuen unter verschiedenen Gesichtspunkten klein machen:

- a) Die Summe der Absolutbeträge, also $\sum |s_k|$, wird möglichst klein.
- b) Das absolut größte Residuum, also $\max |s_k|$, wird möglichst klein (Ausgleich nach Tschebyscheff).
- c) Die Quadratsumme $\sum s_k^2$ wird möglichst klein (Methode der kleinsten Quadrate).

Im folgenden Abschnitt wollen wir uns mit letzterem Verfahren beschäftigen und nachweisen, daß wir mit dem iterativen Lösen des bestimmten, linearen Gleichungssystems

$${}^t C^i g^i = {}^t C^i C^i \delta^i$$

auch die beste Lösung für unser Ausgangsproblem, das überbestimmte, lineare Gleichungssystem (1.23), gefunden haben.²

1.4.3 Methode der kleinsten Quadrate

Es seien $M, N \in \mathbb{N}$ und $g_i : \mathbb{R}^{2N-1} \rightarrow \mathbb{R}$ mit $1 \leq i \leq M$ Funktionen und $\frac{\partial g_i}{\partial u_j} : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ mit $1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq 2N-1$ deren partiellen Ableitungen. Für jedes $\Delta u = {}^t(\Delta u_1, \dots, \Delta u_{2N-1}) \in M(2N-1, 1; \mathbb{R})$ definieren wir die Funktion

$$F_{\Delta u}^i : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$$

mit $F_{\Delta u}^i(t) = \sum_{j=1}^{2N-1} \Delta u_j \frac{\partial g_i}{\partial u_j}(t)$ für jedes $t \in \mathbb{R}$ und $1 \leq i \leq M$.

²Dies wird in [15] auf Seite 88f weniger formal unter dem Punkt "Lineare Ausgleichsprobleme und ihre klassische Lösung a) Die *vermittelnde Ausgleichung* ..." behandelt.

(1) Es seien $t_1, \dots, t_M \in \mathbb{R}$ gegeben. Wir setzen

$$C := \left(\frac{\partial g_i}{\partial u_j}(t_j) \right)_{1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq 2N-1} \in M(M, 2N-1; \mathbb{R})$$

und $g := {}^t(g_1(t_1, \dots, t_M), \dots, g_M(t_1, \dots, t_M)) \in M(M, 1; \mathbb{R})$

und fragen zunächst nach allen $\Delta u \in M(2N-1, 1; \mathbb{R})$ mit $F_{\Delta u}^i(t_j) = g_i$ für jedes $i \in \{1, \dots, M\}$, also mit $C\Delta u = g$. Ist $M > 2N-1$, so wird es im allgemeinen keine Lösung dieses Gleichungssystems geben. In diesem Fall fragen wir nach den $\Delta u \in M(2N-1, 1; \mathbb{R})$, für die $F_{\Delta u}^i$ an den gegebenen Stellen t_1, \dots, t_M die Werte $g_1(t_1, \dots, t_M), \dots, g_M(t_1, \dots, t_M)$ wenigstens möglichst gut approximiert.

(2) Für ein $\Delta u \in M(2N-1, 1; \mathbb{R})$ nennen wir die Funktion $F_{\Delta u}^i$ eine beste Approximation nach der Methode der kleinsten Quadrate zu den Daten t_1, \dots, t_M , wenn gilt: Für jedes $\Delta y \in M(2N-1, 1; \mathbb{R})$ ist

$$\|C\Delta u - g\| = \sqrt{\sum_{i=1}^M |F_{\Delta u}^i(t_i) - g_i|^2} \leq \sqrt{\sum_{i=1}^M |F_{\Delta y}^i(t_i) - g_i|^2} = \|C\Delta y - g\|.$$

Nachzuweisen bleibt lediglich, daß eine Lösung Δu des Gleichungssystems ${}^tCC\Delta u = {}^tCg$ auch die oben aufgestellte Bedingung $\|C\Delta u - g\| \leq \|C\Delta y - g\|$ erfüllt für alle $\Delta y \in M(2N-1, 1; \mathbb{R})$, also unser Gleichungssystem $C\Delta u = g$ am besten approximiert. Dazu folgender

Satz: Es seien $C \in M(M, 2N-1; \mathbb{R})$ und $g \in M(M, 1; \mathbb{R})$. Dann gilt

- (1) Das lineare Gleichungssystem ${}^tCCu = {}^tCg$ ist lösbar mit $u \in M(2N-1, 1; \mathbb{R})$.
- (2) Für jede Lösung $u \in M(2N-1, 1; \mathbb{R})$ des linearen Gleichungssystems in (1) ist

$$\|Cu - g\| \leq \|Cy - g\| \quad \text{für jedes } y \in M(2N-1, 1; \mathbb{R}).$$

Beweis: Es ist ${}^tCC \in M(2N-1, 1; \mathbb{R})$ und ${}^tCg \in M(2N-1, 1; \mathbb{R})$.

(1) (Siehe [27, Seite 120].)

(2) Es sei $u \in M(2N-1, 1; \mathbb{R})$ mit ${}^tCCu = {}^tCg$, also Lösung des Gleichungssystems,

und es sei $y \in M(2N - 1, 1; \mathbb{R})$. Wir setzen $z := y - u$. Dann gilt

$$\begin{aligned}
 \|Cy - g\|^2 &= (Cy - g|Cy - g) \\
 &= (C(u + z) - g|C(u + z) - g) \\
 &= \|Cu - g\|^2 + (Cu - g|Cz) + (Cz|Cu - g) + \|Cz\|^2 \\
 &= \|Cu - g\|^2 + {}^t(Cz)(Cu - g) + {}^t(Cu - g)Cz + \|Cz\|^2 \\
 &= \|Cu - g\|^2 + {}^t z {}^t C(Cu - g) + {}^t ({}^t(Cz)(Cu - g)) + \|Cz\|^2 \\
 &= \|Cu - g\|^2 + \underbrace{{}^t z ({}^t C C u - {}^t C g)}_{=0} + \underbrace{{}^t ({}^t z ({}^t C C u - {}^t C g))}_{=0} + \|Cz\|^2 \\
 &= \|Cu - g\|^2 + \|Cz\|^2 \\
 &\geq \|Cu - g\|^2.
 \end{aligned}$$

■

1.4.4 Algorithmus als *MuPAD*-Programm

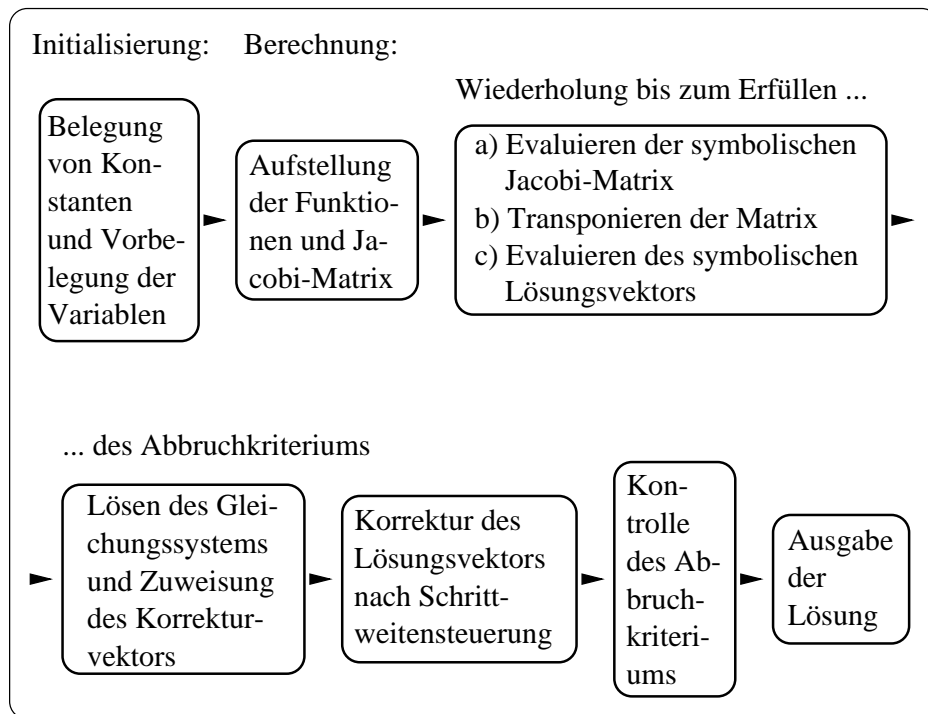


Abbildung 1.5: Schematischer Programmablauf

Initialisierung

```

initialisiere:=proc()
begin
TEXTWIDTH:=66:

```

In einem separaten Initialisierungs-script werden die Startwerte nk_1, \dots, nb_4 für unseren iterativen Prozeß vorgegeben. Die Variablen nk_1, \dots entsprechen dabei unseren gesuchten Werten k_1, \dots , wobei die Kennung n für "numerisch" steht.

Die spannungsoptische Konstante s sowie die Probendicke b können hier angepaßt werden.

```

nk1:=1.0:
nk2:=1.0:
nsigma0x:=0.0:
na3:=0.0:
na4:=0.0:
nb3:=0.0:
nb4:=0.0:
s:=1:
b:=1:

```

Für einen neuen Start wird der Zähler der Iterationsschritte zurückgesetzt.

Die Rechengenauigkeit wird wegen der verwendeten Schrittweitensteuerung erhöht. Ein Wert von 20 hat sich als praktikabel erwiesen.

Die Ausgabe von Informationen während der Berechnung wird eingeschaltet. Das Abbruchkriterium wird festgelegt.

```

iterationsschritt:=0:
hoch:=20:
DIGITS:=hoch:
Info:=TRUE:
abbruch:=0.00000000000000000001:
end_proc:

```

Berechnung

```

berechne:=proc()
begin
print(Unquoted,"Starte Berechnung.");

```

Die Variable `anz` enthält die Anzahl der Gleichungen unseres überbestimmten, nichtlinearen Gleichungssystems. Sie entspricht der Anzahl der von uns selektierten Punkte und ist in der Daten-Matrix `AA` an der Stelle `[0,2,2]` gespeichert.

```
anz:=op(AA,[0,2,2]):
```

Matrizen von passender Größe werden initialisiert. `C` wird die (symbolische) Jacobi-Matrix, `CC` die evaluierte Matrix von `C` enthalten. Dabei heißt evaluiert, daß die symbolischen Platzhalter durch die numerischen Werte ersetzt wurden. Analog dazu wird der Vektor `gv` die Komponenten $-g_k^i$, `ggv` den evaluierten Vektor `gv` und `ggvneu` den evaluierten Vektor mit Komponenten $-g_k^{i+1}$ des nächsten Iterationsschritts enthalten.

```
M:=Dom::Matrix():
delta:=M(7,1):
C:=M(anz,7):
CC:=M(anz,7):
gv:=M(anz,1):
ggv:=M(anz,1):
ggvneu:=M(anz,1):
print(Unquoted,"Die Gleichungen gk werden aufgestellt ...");
FPI:=float(PI):
```

In der nächsten `for`-Schleife werden die Funktionen g_k aufgebaut. Dazu werden Zwischenergebnisse (`zweg1, ... : zwischenergebnisse`) und die Spannungsansatzkomponenten (`sigmarr: σ_{rr} , sigmaphi: $\sigma_{\varphi\varphi}$ und taurphi: $\tau_{r\varphi}$`) berechnet und die Funktionen (`g.i: g_k`) belegt. Für jede Funktion enthält die Datenmatrix die Tripel (`AA[i,1],AA[i,2],AA[i,3]`)= (r,φ,n)

```
for i from 1 to anz do
zweg1:=1.0/sqrt(32.0*FPI*AA[i,1]):
zweg2:=sqrt(AA[i,1])/4.0:
zweg3:=AA[i,2]*5.0/2.0:
zweg4:=AA[i,2]/2.0:
zweg5:=AA[i,2]*3.0/2.0:
zweg6:=sin(zweg4):
zweg7:=sin(zweg5):
```

```

zweg8:=cos(zweg4):
zweg9:=cos(zweg5):
zweg10:=AA[i,2]*3.0:
zweg11:=15.0*sin(zweg3):
zweg12:=cos(AA[i,2]):
zweg13:=sin(AA[i,2]):
sigmarr:=k1*zweg1*(5.0*zweg8-zweg9)+
k2*zweg1*(-5.0*zweg6+3.0*zweg7)-
sigma0x*zweg12^2+
zweg2*a3*(3.0*zweg8+cos(zweg3))+
AA[i,1]*a4*(zweg12+3.0*cos(zweg10))-
zweg2*b3*(9.0*zweg6+15.0*sin(zweg3))-
AA[i,1]*b4*2.0*(zweg13+sin(zweg10))
:
sigmaphi:=k1*zweg1*(3.0*zweg8+zweg9)-
k2*zweg1*3.0*(zweg6+zweg7)-
sigma0x*zweg13^2+
zweg2*a3*(5.0*zweg8-cos(zweg3))+
3.0*AA[i,1]*a4*(zweg12-cos(zweg10))-
zweg2*b3*15.0*(zweg6-sin(zweg3))-
3.0*AA[i,1]*b4*(1.25*zweg13-5.0/12.0*sin(zweg10))
:
taurphi:=k1*zweg1*(zweg6+zweg7)+
k2*zweg1*(zweg8+3.0*zweg9)+
0.5*sigma0x*sin(2.0*AA[i,2])+
zweg2*a3*(zweg6-sin(zweg3))+
AA[i,1]*a4*(zweg13-3.0*sin(zweg10))+
zweg2*b3*3.0*(zweg8-5.0*cos(zweg3))+
AA[i,1]*b4*2.0*(zweg12-cos(zweg10))
:
g.i:=((sigmarr-sigmaphi)/2.0)^2 + taurphi^2 - (s*AA[i,3]/(2.0*b))^2:
end_for:

print(Unquoted,"Wir benoetigen die partiellen Ableitungen aller Funktionen");
print(Unquoted,"- die sich aus den Gleichungen ergeben -");
print(Unquoted,"nach allen 7 Unbekannten (k1, k2, sigma0x, a3, ..., b4).");
print(Unquoted,"Diese Matrix wird auch Jacobi-Matrix genannt.");

```

Die Jacobi-Matrix wird belegt (`C:=linalg::jacobian()`). Zeilenweise werden die Funktionen `g.i` nach den Unbekannten (`k1, ... , b4`) abgeleitet. Anschließend wird der Vektor `gv` mit $-g_k$ belegt. Vom Prinzip entspricht dies dem Newton-Verfahren (vergleiche (1.20) auf Seite 22).

```

C:=linalg::jacobian([eval(g.l) $ l=1..anz],
                    [k1,k2,sigma0x,a3,a4,b3,b4]):
for i from 1 to anz do
  gv[i]:=-(eval(g.i)):
end_for:

if Info=TRUE then
  DIGITS:=2:
  print(Unquoted,"Startwerte: ",nk1,nk2,nsigma0x,na3,na4,nb3,nb4);
  DIGITS:=hoch:
  print(Unquoted,"Iterationsschritt, k1, k2, sigma0x, a3, a4, b3, b4");
end_if:

```

Die folgende `repeat`-Schleife enthält die eigentliche Iteration und endet weiter unten mit dem Befehl `until ... end_repeat::`.
Der Zähler `iterationsschritt` wird hochgezählt.

```

repeat
iterationsschritt:=iterationsschritt+1;

```

Die numerischen Werte `nk1, ...` ersetzen in der symbolischen Matrix die Platzhalter `k1, ...` (`subs()`).
Die Matrix `CC` wird transponiert (`linalg::transpose()`).
Die numerischen Werte `nk1, ...` ersetzen im Vektor `gv` die Platzhalter `k1, ...` (`subs()`).

```

CC:=float(subs(C, k1=nk1, k2=nk2, sigma0x=nsigma0x,
              a3=na3, a4=na4, b3=nb3, b4=nb4)):
tCC:=linalg::transpose(CC):
ggv:=float(subs(gv, k1=nk1, k2=nk2, sigma0x=nsigma0x,
              a3=na3, a4=na4, b3=nb3, b4=nb4)):

```

Das bestimmte, lineare Gleichungssystem ${}^tCC\delta = {}^tCg$ wird gelöst für den `iterationsschritt`-ten Iterationsschritt (`linalg::linearSolve()`).
Die Lösung wird dem Korrektur-Vektor `delta` zugewiesen.

```

delta:=linalg::linearSolve(tCC*CC, tCC*ggv):

```

Der Vektor `gv` wird evaluiert (`subs()`) mit den neuen, korrigierten Werten (`k1=nk1+delta[1], ...`).

```

t:=1.0:
ggvneu:=float(subs(gv,k1=nk1+delta[1],k2=nk2+delta[2],
    sigma0x=nsigma0x+delta[3],a3=na3+delta[4],a4=na4+delta[5],
    b3=nb3+delta[6],b4=nb4+delta[7])):
test:=norm(ggv,Frobenius):
counter:=0:

```

Die folgende if-Abfrage gibt lediglich die Warnung für aktivierte Schrittweitensteuerung aus.

```

if test < norm(ggvneu,Frobenius) and Info=TRUE then
  DIGITS:=3:
  print(Unquoted," Schrittweitensteuerung aktiv! ||g(xi)||="
    .expr2text(test)." < ||g(xi+1)||=" .expr2text(norm(ggvneu,Frobenius)));
  DIGITS:=hoch:
end_if:

```

Der Vergleich der Normen des neuen ($\text{norm}(\text{ggvneu}, \text{Frobenius})$) und des alten Vektors ($\text{test} := \text{norm}(\text{ggv}, \text{Frobenius})$) regelt den Einsatz der Schrittweitensteuerung.

Diese garantiert, daß wir uns mit einem – zu großen – Schritt in die Richtung der Lösung nicht von ihr entfernen können.

Die Frobenius-Norm ist wie folgt definiert: $\|ggv\| = \sqrt{\sum_i |ggv_i|^2}$

```

while test < norm(ggvneu,Frobenius) do

```

Abbruch des Vorgangs durch `counter`, wenn die Schrittweitensteuerung nicht greift.

Der Koeffizient `t` regelt die (mehrfache) Halbierung des Korrekturwerts.

Der Vektor `ggvneu` wird berechnet und die Norm davon dient erneut als Vergleichswert in der `while`-Schleife.

```

counter:=counter+1:
if counter>20 then break end_if:
hilf:=t:
t:=hilf/2.0:

ggvneu:=float(subs(gv,k1=nk1+t*delta[1],k2=nk2+t*delta[2],
    sigma0x=nsigma0x+t*delta[3],a3=na3+t*delta[4],a4=na4+t*delta[5],
    b3=nb3+t*delta[6],b4=nb4+t*delta[7])):

```

```

if Info=TRUE then
  DIGITS:=3:
  print(Unquoted,"t=" .expr2text(t) . " => ||g(xi+1)||="
    .expr2text(norm(ggvneu,Frobenius)));
  DIGITS:=hoch:
end_if:
end_while:

```

Ein passendes t ist gefunden und die gesuchten Lösungen werden korrigiert ($nk1:=nk1+t*delta[1]$,)

```

nk1:=nk1+t*delta[1]:
nk2:=nk2+t*delta[2]:
nsigma0x:=nsigma0x+t*delta[3]:
na3:=na3+t*delta[4]:
na4:=na4+t*delta[5]:
nb3:=nb3+t*delta[6]:
nb4:=nb4+t*delta[7]:
if Info=TRUE then
  DIGITS:=2:
  print(Unquoted,iterationsschritt,nk1,nk2,nsigma0x,na3,na4,nb3,nb4);
  DIGITS:=hoch:
end_if:
until
delta[1]^2+delta[2]^2+delta[3]^2+delta[4]^2+delta[5]^2+delta[6]^2+delta[7]^2
  < abbruch or iterationsschritt > 30 end_repeat:

```

Verlassen der repeat ... until ... end_repeat-Schleife bei Unterschreitung des Abbruchkriteriums oder Überschreiten der maximal erlaubten Iterationsschritte.

```

DIGITS:=2:
if nk1<0.0 and abs(nk1)>sqrt(abbruch) then
  print(Unquoted,"Die negative Loesung wurde gefunden.
    Invertierung der Ergebnisse.");
  nk1:=-nk1:nk2:=-nk2:nsigma0x:=-nsigma0x:na3:=-na3:na4:=-na4:nb3:=-nb3:
  nb4:=-nb4:
end_if:

```

Das Ergebnis wird formatiert und ausgegeben.

```

print(Unquoted,"Die Ergebnisse: k1 = " .expr2text(nk1) . " und k2 = "
  .expr2text(nk2) . " , sigma0x = " .expr2text(nsigma0x) . " sowie"):
print(Unquoted,"a3 = " .expr2text(na3) . " , a4 = " .expr2text(na4) . " , b3 = "
  .expr2text(nb3) . " , b4 = " .expr2text(nb4)):
end_proc:

```


Kapitel 2

Lernen mit multimedialen Systemen

In der Aus- und Weiterbildung erfolgt zur Zeit ein grundlegender Wandel, der alle Aspekte und insbesondere Lernformen und -strukturen erfaßt. Denn “Denken als individueller Prozeß der Informationsverarbeitung und Lernen als kultureller Prozeß der kooperativen Erschließung und Gestaltung der menschlichen Umwelt, sind auf unserem heutigen Niveau ohne Technik nicht denkbar” [35]. So lösen sich durch den Einsatz neuer Medien traditionelle Lernformen teilweise auf. Die dabei benutzten technologischen Entwicklungen fassen wir unter dem Begriff Multimedia zusammen. Dazu gehört die Integration verschiedener Medientypen in einem einheitlichen Zugriffssystem, ein hoher Grad an Interaktivität wie auch die Speicherung, Übertragung und Vermittlung davon.

In diesem Kapitel soll es aber nicht um pädagogische und didaktische Aspekte beim Einsatz von Multimedia gehen, sondern um Möglichkeiten und Probleme, die der Einsatz für Lehr- und Lernzwecke mit sich bringt.

Denn das Mißverständnis, daß von ihrer Natur her nicht-technische Probleme durch technische Mittel gelöst werden können, ist weit verbreitet. Hinzu kommt außerdem, daß es durch Begriffsunschärfen und ein sich schnell wandelndes Feld im Bereich Multimedia und Lernen sehr schwierig ist, klare Abgrenzungen vorzunehmen und im wissenschaftlich verlässlichen Sinne verallgemeinerbare Erfahrungen zu sammeln.

Das Fazit von Hasebrook aus dem Jahr 1995, daß es nicht möglich sei, “*prinzipielle Aussagen* über die Lernwirkung von Multimedia zu machen” [20, Seite 101] hat somit noch heute Bestand. So steht nicht das isoliert einzusetzende System im Vordergrund unserer Betrachtung, sondern der kooperative Mediengebrauch und der Zugang zum gesamten System. Zum Beispiel belegt eine Studie [19] mit 75 Teilnehmern, daß individuell angepaßte Informationen den Lernprozeß innerhalb einer

Computer-unterstützten Lernumgebung verbessern können. Audio-visuelle Medien hatten dabei nur sehr geringe Auswirkungen, während individuell erzeugte Informationen sehr effizient waren unabhängig von beeinflussenden Faktoren wie zum Beispiel Erfahrung im Umgang mit Computern.

Nach einer Einteilung in primäre, sekundäre und tertiäre Medienfunktionen¹ handelt es sich bei dem in dieser Arbeit entwickelten interaktiven Tutorium “Maschinenlabor Optische Spannungsanalyse” um die Umsetzung von primären Medienfunktionen, da kein pädagogisches Modell zugrunde liegt und das System keine didaktische Komponente aufweist.

Multimedia und papierbasierte Medien

Der große Unterschied zwischen Multimedia und papierbasierten Medien ist, daß neben Text und Bild auch Ton, bewegte Bilder und Interaktion eingesetzt werden können. Wir unterscheiden dabei nach Art der Verteilung zwei Formen von Multimedia:

1. Computer Based Training (CBT): CD-ROM
2. Web Based Training (WBT): WWW

Dabei ergeben sich für die beiden Formen untereinander und auch im Vergleich zum papierbasierten Medium Vor- und Nachteile:

¹Die drei Klassen von Medienfunktionen nach [35, Seite 171ff]: Wir unterscheiden

- die **primären** Medienfunktionen, die dazu dienen, Zeichen bzw. Zeichensysteme ins Wahrnehmungsfeld des Menschen zu bringen (Erzeugung, Verknüpfung, Speicherung, ...),
- die **sekundären** Medienfunktionen, die verschiedene Konstellationen des Gebrauchs beinhalten (Gestaltung des Lehrmaterials, Instruktionsdesign, Gestaltung von Kooperationsstrukturen, ...), und
- die **tertiären** Medienfunktionen, die in Systemen auftreten, bei denen das Wissen über den Gebrauch von Zeichen bzw. Zeichensystemen selbst zum Verarbeitungsgegenstand wird (Adaptive Systeme, Intelligente Tutorensysteme, Natürlichsprachliche Systeme, ...).

Vorteile ...

... von elektronischen Multimedia gegenüber papierbasierten Medien:

- Kann über Suchmechanismen verfügen
- Bietet sehr gute Integration von verschiedenen Medien
- Erlaubt einfach realisierbare Querverweise auch in externe Dokumente (Nachschlagwerke)

Nachteile ...

- Umständlichere Handhabung
- Niedrigere Auflösung am Bildschirm
- Hoher Speicherbedarf durch große Datenmengen

Vorteile von WBT gegenüber CBT:

- Ist normalerweise aktiv bearbeit- und ergänzbar und daher eher nicht von statischer Natur
- Schnelle und kostengünstige Möglichkeit der Aktualisierung
- Keine Spezial-Software erforderlich

Nachteile von WBT gegenüber CBT:

- Durch den eher fragmentarischen Charakter nicht so verlässlich wie ein in sich geschlossenes Werk
- Geringere Übertragungsgeschwindigkeit

Für das interaktive Tutorium "Maschinenlabor Optische Spannungsanalyse" wurde deshalb folgende Lösung gewählt: Textuelle Inhalte werden auf einem entfernten Web-Server bereitgestellt, da hier nur geringe Datenmengen anfallen und durch eine zentrale Speicherung eine leichtere Aktualisierung ermöglicht wird. Wegen schwankender Übertragungskapazitäten und einer bisher fehlenden Java-Schnittstelle wurde einer lokalen *MuPAD*-Installation der Vorzug gegeben, um Berechnungen möglichst ohne Verzögerung ausführen zu können.

Insgesamt kann die Lernwirksamkeit einzelner Medien als auch von Multimedia nur im Kontext der betreffenden Lernsituation beurteilt werden. Denn die Aussage "Multimedia spricht mehrere Sinneskanäle an; das verbessert das Behalten." ist zwar die populärste Aussage in der Medienpsychologie, doch sucht man eine wissenschaftliche Quelle vergeblich [8, Seite 68]. Hasebrook teilt diese Auffassung, daß "eine maximale Mediennutzung ... keineswegs eine sinnvolle Lernanwendung [ergibt]: Erst der gezielte pädagogische Medieneinsatz machen [sic!] aus 'bewegten Bildern' echte Lernmedien." [21, Seite 181] nicht erwiesen, daß Abwechslung und Vielfalt (in Form von bunten und bewegten Bildern) zur intensiveren Beschäftigung

mit dem Lerngegenstand anreizen [8, Seite 75]. Es wird eher angenommen, daß eine von außen kommende Belohnung die innere Freude am Lernen stark mindern kann [21, Seite 158]. Der Einsatz vieler Medienelemente kann in der Tat die Akzeptanz der Lernmedien erhöhen, nur korrelieren leider Akzeptanz und Lernwirksamkeit nachweislich nicht miteinander [23].

Vielmehr sollten Lern- und Lehrziele deutlich und transparent dargestellt werden und nicht durch Unübersichtlichkeit verborgen werden, wie es bei größeren Hypertexten häufig angetroffen wird.

Computer Based Training (CBT)

Da sich lange Texteinheiten am Bildschirm schlechter lesen lassen als auf Papier, kommt eine Aufteilung in kleinere Präsentationseinheiten einer Verwendung am Computer entgegen. Dabei werden in Lehrprogrammen meist nur Abhängigkeiten innerhalb des Systems durch Verweise visualisiert. Und obwohl das Hypertext-Konzept auch offene Lernumgebungen zum Beispiel unter Einbeziehung von Anfragen an Datenbanken erlaubt, stellen CBT-Systeme meist eine in sich geschlossene Lernumgebung dar.

Als Vorteil erweist sich, daß Lernerfolgskontrollen eingebaut und diese automatisch oder vom Benutzer selbst ausgewertet werden können. In vielen klassischen CBT-Programmen wird der Zugang zum nächsten Abschnitt vom Bestehen eines Tests abhängig gemacht und damit der Lernweg stark festgeschrieben.

Außerdem kann in geeignetem Maße das Lerntempo selbst bestimmt werden, was allerdings auch andere Medienformen leisten, die nicht in einer Gruppensituation zum Lernen verwandt werden.

Hypermedia-Lernumgebungen

Lernprogramme, sogenannte Hypermedia-Lernumgebungen, unterscheiden sich von Lehrprogrammen dadurch, daß es keine vorgezeichneten Lernschritte gibt und sich jeder Benutzer seinen eigenen Weg erschließen kann. Im Idealfall lassen sich dabei die Struktur des Textes während des Lesens verändern, neue Informationen einfügen und alte Informationen verändern [21, Seite 194].

Es könnte so ein aktiver und konstruktiver Umgang mit primären Medienfunktionen erfolgen. Leider ist dies aber oft nicht in der Praxis realisiert.

In dem in dieser Arbeit entwickelten interaktiven Tutorium "Maschinenlabor Optische Spannungsanalyse" sind die *MuPAD*-notebooks so ausgelegt, daß sich der Text jederzeit verändern und erweitern läßt. Außerdem lassen sich eigene Berechnungen mit veränderbaren Parametern mehrmals ausführen und diese dann samt der auch

graphischen Ergebnisse lokal abspeichern und ausdrucken.

Weiterhin kann das komplette Tutorium lokal in ein Hyperwave-Verzeichnis (*collection*) kopiert werden, so daß auch dies bearbeitet und mit eigenen Anmerkungen und Verweisen versehen werden kann. (Nähere Erläuterungen zum Hyperwave-Konzept siehe Abschnitt 4.2.2 auf Seite 62f.)

Fazit

“Although, multimedia seems to save some time and reduce simple errors, it has not been found to be very effective as a problem solving tool.” [33]

Praktische Erfahrungen und theoretische Überlegungen weisen darauf hin, daß sich das Potential von Hypertexten erst entfalten kann, wenn Lernende aktiv mit dem Material arbeiten können. [7]

Und nur wenn das individuelle Geschick und die individuellen Fähigkeiten des Benutzers der Anforderung der Lernaufgabe und den vorhandenen Funktionalitäten des Multimedia-Systems gerecht werden, steigert der Einsatz von Multimedia die Lernleistung.

Deshalb ist es nötig, den Benutzern Strategien und Konzepte zur effizienten Nutzung von Multimedia-Systeme aufzuzeigen und diese an die eigenen individuellen Fähigkeiten sowie die gesamte Lernsituation und -umgebung anzupassen. [22]

Kapitel 3

Gestaltung interaktiver Systeme

Bei der Gestaltung interaktiver Systeme ergeben sich im Vergleich zu papierbasierten Medien grundlegende Unterschiede. Dabei müssen die technischen Voraussetzungen berücksichtigt werden, die die jeweiligen Medientypen bieten. Außerdem spielt auch die Integration verschiedener Medientypen eine Rolle. Der Aufbau eines interaktiven Systems umfaßt aber nicht nur die Aufbereitung des Lehrangebots, sondern zum Beispiel auch die Orientierung darin. Welche Gesichtspunkte und gesetzliche Normen dabei berücksichtigt werden müssen, wird im folgenden Kapitel behandelt.

Hierzu wird der Gestaltungsansatz der “Reduzierung erzwungener Sequentialität” [34] vorgestellt und die einzelnen Kriterien werden an Beispielen aus dem interaktiven Tutoriums “Maschinenlabor Optische Spannungsanalyse” dokumentiert.

3.1 Unterschiede zwischen papierbasierten Medien und Multimedia

Das Bereitstellen von verschiedenen Medien zum Arbeiten, welches Lesen, Orientieren, Lernen, etc. umfaßt, erfordert ein genaues Wissen über die Vor- und Nachteile. Die besonderen Möglichkeiten des Mediums sollten ausgeschöpft und seine Mängel berücksichtigt werden. Dies betrifft die Darstellungsformate und dessen Auflösung, Zeichensätze und Formeln sowie Verweise.

3.1.1 Auflösung

Bei der Darstellung von Text und Bildern in papier- und computerbasierten Medien ergeben sich grundlegende Unterschiede in der Qualität. Die hohe Auflösung auf dem Papier von 600 dpi (dots per inch) als Standard im Bereich der Arbeitsplatzrechner und -drucker bis zu 1200 dpi lassen eine sehr gute Darstellung zu. Grafiken und Bilder können entsprechend detailreich ausfallen, ohne zu viel Platz zu beanspruchen.

Und für Satzsysteme wie zum Beispiel \LaTeX stehen eine große Anzahl von Zeichensätzen im METAFONT-Quellformat zur Verfügung.

Im Gegensatz dazu bietet die Auflösung am Bildschirm typischerweise gerade 72 dpi. Kleine, kursiv gesetzte Schriften werden auf dem Bildschirm daher schnell unleserlich. Um eine Grafik genauso detailliert darstellen zu können wie auf dem Papier, wird am Bildschirm mehr Platz benötigt. Selbst bei der heute gängigeren Auflösung von 800 x 600 oder 1024 x 800 Pixeln² kann es zu Platzproblemen und Unübersichtlichkeit kommen. Denn wenn im Text eine Grafik erläutert wird, die nicht gleichzeitig mit dem Text im Wahrnehmungsbereich dargestellt werden kann, ist ein ständiges Scrollen und damit ein steter Wechsel des Sichtbarkeitsbereiches erforderlich.

Schwierigkeiten bei der Erstellung einer Lehreinheit können sich dann ergeben, wenn bereits vorhandenes Print-Material für den Einsatz im Computer umgesetzt werden muß. Aufwendige Grafiken können nicht verwendet werden und müssen sinnvoll aufgeteilt und/oder komplett neu erstellt werden.

3.1.2 Zeichensätze/Formeln

In allen naturwissenschaftlichen Bereichen werden heutzutage spezielle Zeichensätze benötigt. Das griechische Alphabet, Symbole der höheren Mathematik, spezielle Buchstaben der jeweiligen Sprache usw. Beim Einsatz der HTML (Hyper Text Markup Language) liegen diese Zeichensätze derzeit nicht vor und so muß auf ihren Einsatz verzichtet werden oder entsprechende Passagen müssen als Grafiken eingefügt werden. Dies ist mit einem großen Aufwand und dem Nachteil verbunden, daß die Grafiken nicht mit der Schriftgröße skalierbar sind.

Eine weitere große Schwierigkeit stellen mathematische Formeln dar. Sie können in jedem gängigen Textverarbeitungsprogramm zum Teil mit Hilfe von Formel-Editoren gesetzt und dargestellt werden. HTML bietet bis auf wenige Möglichkeiten, zum Beispiel das Hoch- und Tiefstellen, derzeit noch keine standardisierten Mittel an, so daß Formeln generell als Grafiken eingefügt werden müssen¹.

3.1.3 Verweise

In einem Print-Werk existieren verschiedene Möglichkeiten des Verweises. Auf der Seite selbst gibt es die Fußnote. Es gibt den Verweis auf eine andere Stelle (Abbildung, Gleichung, etc., vorhergehend oder nachfolgend) oder andere Literatur im eigenen Literaturverzeichnis (am Ende des Werks).

¹Seit zwei Jahren arbeitet die *HTML-Math Working Group* [39] an einer HTML-Erweiterung, der MathML [40]. Außerdem wird am neuen *eXtended HTML*-, dem XML-Standard [43, 42] gearbeitet.

Die interaktive Version bietet diese Möglichkeiten auch, doch kann der Benutzer sehr schnell die Übersicht verlieren, indem ihm durch zu viele Seitenwechsel die Orientierung und Übersicht genommen wird. Denn im Gegensatz zu einer Seite im Buch, in der ein Finger beim Weiterblättern verbleibt, geht die Seite im Web-Browser scheinbar verloren, wenn die URL nicht vorher in die Bookmarks aufgenommen wurde.

“Along with the power to organize information much more complexly comes the problem of having to know (1) where you are in the network and (2) how to get to some other place that you know (or think) exists in the network.” [24, Abschnitt auf Seite 38: Getting “lost in space.”]

Dies wird in der Informatik mit dem “Lost in hyperspace”-Syndrom bezeichnet. [24] Wenn einem Verweis gefolgt wird, gibt es normalerweise mehrere Möglichkeiten zur ursprünglichen Textstelle zurückzukehren. Und nicht immer kehrt man direkt zur ursprünglichen Stelle zurück, zum Beispiel wenn die Stelle am Seitenende nur durch Scrollen erreichbar ist. Aber schon die einfache Verweisform auf eine Fußnote am Seitenende ist verwirrend genug, da der ursprüngliche Text im Falle einer Bildschirmpräsentation häufig aus dem Sichtbarkeitsbereich des Benutzers verschwindet.

Deshalb sollten nach der goldenen Regel “soviele Verweise wie nötig, aber so wenig wie möglich” eingesetzt werden, auch wenn beim interaktiven Medium die verlockende Möglichkeit besteht, auf verschiedene interessante Quellen im weltweiten Netz zu verweisen.

Außerdem sollten Verweise, die das eigentliche Werk verlassen, so überlegt wie möglich eingesetzt werden. Denn wenn der Benutzer erst einmal ein anderes Angebot erreicht hat, bietet dieses Angebot sicher weitere Verweise an, in den seltensten Fällen aber zurück zu unserem ursprünglichen Werk.

Im interaktiven Tutorium “Maschinenlabor Optische Spannungsanalyse” werden deshalb alle Fußnoten in einem separaten Fenster dargestellt, so daß der Bezug zur ursprünglichen Textstelle nicht verloren geht.

Verweise auf vorher genannte Formeln führen nicht zur Textstelle, wo die Formel hergeleitet wurde, sondern zeigen nur die gerade benötigte Formel in einem eigenen Fenster. Hierbei erhält jeder Verweis auf eine Formel ein eigenes Fenster, damit mehrere Formeln gleichzeitig im Sichtbarkeitsbereich des Benutzers angezeigt werden können. Auf diese Weise wird auch dem “Lost in Hyperspace”-Syndrom begegnet.

Verweise außerhalb des interaktiven Tutoriums werden nur dann angeboten, wenn die Informationen eng mit dem Stoff in Beziehung stehen, die zusätzlichen Informationen das Verstehen des Stoffs erleichtern, aber die Aufnahme in das Tutorium selbst zu umfangreich ist.

3.2 Gestaltungsrichtlinien

Zur Gestaltung von interaktiven Systemen gibt es in der Software-Ergonomie eine Fülle von Kriterien und nationaler wie internationaler Normen, die von der Gestaltung der Arbeitsaufgabe bis zur Festlegung der Prinzipien der direkten Manipulation oder der Spezifikation von Zeichengrößen reichen [1]². Bei der Berücksichtigung behindern sich die verschiedenen Kriterien aber oft, so daß man sich für Prioritäten bei Kenntnis des Einsatzumfeldes entscheiden muß. Diese Entscheidungen können aufgabenbezogen gefunden werden und die Gestaltungsanforderungen müssen abwägend beurteilt werden.

Ein Satz von Leitkriterien zum Gestalten von interaktiven Systemen und Auflösungsmechanismen bei dabei auftretenden Konflikten wurde von Keil-Slawik, basierend auf dem Prinzip der "Reduzierung erzwungener Sequentialität" [4], entwickelt. Dieses Prinzip beruht auf einem Satz von Kriterien, die nicht zusammenhanglos nebeneinander stehen, sondern anhand derer verschiedene Gestaltungsvarianten bewertet und Anforderungen abgewogen werden können.

Die von vornherein nicht immer endgültig zu beurteilende Situation, in der das interaktive System zum Einsatz kommen wird, sowie Annahmen über den Wissensstand der Benutzer und andere Aspekte machen es unmöglich, im vorhinein alle relevanten Aspekte zu erheben und diese dann in einem durchgängigen Konstruktionsprozeß zu berücksichtigen. Vielmehr sind verschiedene Lösungen in verschiedenen Situationen angemessener. Die Auflösung der so auftretenden Designkonflikte eines Systems stellen die eigentliche Aufgabe dar.

3.2.1 EU-Bildschirmrichtlinie

Die Europäische Union regelt in den Kernforderungen der EU-Bildschirmrichtlinie die Anforderungen an die Systemgestaltung. So werden zum Beispiel die Arbeitsplatzausstattung, die Arbeitsplatzumgebung, die Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle, etc. behandelt. In der EU-Bildschirmrichtlinie, Anhang: Mindestvorschriften, Teil 3: Mensch-Maschine-Schnittstelle heißt es zum Beispiel:

“Bei Konzipierung, Auswahl, Erwerb und Änderung von Software sowie bei der Gestaltung von Tätigkeiten, bei denen Bildschirmgeräte zum Einsatz kommen, hat der Arbeitgeber folgenden Faktoren Rechnung zu tragen:

- a) Die Software muß der auszuführenden Tätigkeit angepaßt sein.

²Die DIN EN ISO 9241 Teil 10 regelt zum Beispiel die Aufgabenangemessenheit, Selbstbeschreibungsfähigkeit, Steuerbarkeit, Erwartungskonformität, Fehlerrobustheit, Individualisierbarkeit und Lernförderlichkeit

- b) Die Software muß benutzerfreundlich sein und gegebenenfalls dem Kenntnis- und Erfahrungsstand des Benutzers angepaßt werden können; ohne Wissen des Arbeitnehmers darf keinerlei Vorrichtung zur quantitativen oder qualitativen Kontrolle verwendet werden.
- c) Die Systeme müssen den Arbeitnehmern Angaben über die jeweiligen Abläufe bieten.
- d) Die Systeme müssen die Information in einem Format und in einem Tempo anzeigen, daß den Benutzern angepaßt ist.
- e) Die Grundsätze der Ergonomie sind insbesondere auf die Verarbeitung von Informationen durch den Menschen anzuwenden.”

Ein großer Vorteil dieser Richtlinien ist, daß durch das Prinzip der Ordnungsmäßigkeit ein Gesetzesverstoß begangen werden kann, ohne daß ein Mißbrauchstatbestand vorliegt. Denn es wird nicht der Mißbrauch, sondern der ordnungsgemäße Gebrauch geregelt.

Ein Nachteil allerdings ist, daß die Kriterien sehr allgemein formuliert worden sind und meist beziehungslos nebeneinanderstehen. So ist die Richtlinie zwar gut geeignet zur Beurteilung und Evaluation schon bestehender interaktiver Systeme, dagegen aber ungeeignet für den Einsatz in einem Gestaltungsprozeß selbst. Erst durch die Anwendung der Richtlinie in Zusammenhang mit einem speziellen Gestaltungsansatz ist es möglich, die Kriterien und Regeln im Gestaltungsprozeß wirksam werden zu lassen.

Beispiel: Selbstbeschreibungsfähigkeit (EN ISO 9241 Teil 10)

Anhand eines Beispiels wird die mögliche Umsetzung einer Richtlinie und die daraus resultierende Empfehlung exemplarisch vorgestellt.

“Beschreibung: Ein Dialog ist in dem Maße selbstbeschreibungsfähig, wie jeder einzelne Dialogschritt durch Rückmeldung des Dialogsystems unmittelbar verständlich ist oder dem Benutzer erklärt wird, wenn er die entsprechenden Informationen verlangt.”

Daraus resultierende Empfehlungen sind:

- Nach jeder Handlung eine Rückmeldung
- Erläuterungen, wenn schwerwiegende Folgen entstehen können
- An Benutzer angepaßte Terminologie
- Situationsbezogene Rückmeldung

Dazu ein Beispiel eines “belastenden Dialogspiels” in der folgenden Abbildung:

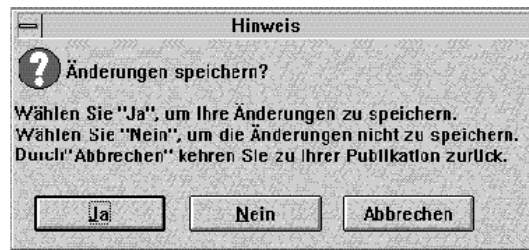


Abbildung 3.1: Dialog “Änderungen speichern?”

Hierbei muß jede Antwort, welche die Betätigung eines Knopfes darstellt, erst mental in den richtigen Zusammenhang gebracht werden.

Denkbar wäre auch dieses Dialog-Fenster:



Abbildung 3.2: Dialog “Sie verlassen das Programm.”

Hierbei werden keine Fragen vom Dialog gestellt, deren Antworten man sich bewußt machen muß, sondern Alternativen zur Auswahl angeboten, wobei die Konsequenzen beim Betätigen eines Knopfes verdeutlicht werden.

Die oben genannten Empfehlungen wurden im interaktiven Tutorium “Maschinenlabor Optische Spannungsanalyse” wie folgt berücksichtigt:

- Jeder Eingabe des Benutzers folgt eine Ausgabe des Systems.
- Schwerwiegende Folgen fängt das System durch eine zusätzliche Rückfrage ab.
- Die Ausdrucksweise beim Umgang mit dem CA-System *MuPAD* wurde dermaßen angepaßt, daß auch ein unbedarfter Benutzer alle Schritte nachvollziehen kann und kein spezifisches Vorwissen erforderlich ist.
- Wenn die Ausgabe des Systems nicht spezifisch genug ist, wird sie durch eine angemessene textuelle Rückmeldung ergänzt oder ersetzt.

Im folgenden wird der Ansatz der “Reduzierung erzwungener Sequentialität” [34] vorgestellt.

3.2.2 Der Gestaltungsansatz “Reduzierung erzwungener Sequentialität”

Eine Erkenntnis aus der Gestaltpsychologie ist, daß wir etwas erkennen, indem wir physisch zusammenhanglose Sinnesreize so miteinander in Beziehung setzen, daß sie einen Sinn ergeben. So sind grundlegende Überlegungen des Gestaltungsansatzes, daß dem Benutzer durch den Umgang mit dem und Manipulation des angebotenen Materials Handlungen und deren Auswirkungen sichtbar werden und er diese verknüpfen kann. Dies wird als der Akt der Strukturierung des Wahrnehmungsfeldes bezeichnet. Erst durch diesen Akt entsteht eine Gestalt, daß heißt eine bedeutungsvolle Form. Um diese Verbindung herstellen zu können, müssen die einzelnen Komponenten möglichst gleichzeitig im Wahrnehmungsfeld vorhanden sein, damit zeitliche und räumliche Trennung nicht dazu führen, daß die einzelnen Aspekte nicht verknüpft werden können. Außerdem sollte die hergestellte Beziehung physisch dargestellt werden, um diese Beziehung später rekonstruieren zu können ohne sie erst neu interpretieren zu müssen.

So wird zum Beispiel eine Berechnung durch Betätigen der Return-Taste nach einer Eingabe gestartet. Dies wird im Allgemeinen durch eine andere Cursor-Form visualisiert (Wechsel der Standardform zur Eieruhr).

Diese drei Kernaspekte der ...

- **Erzeugung** von Auswirkungen durch Handlungen, der
- **Verknüpfung** der Handlung und deren Auswirkung und der
- **Speicherung** der Verknüpfungen

verkörpern die primäre Unterstützungsfunktion technischer Hilfsmittel.
(Siehe Klassifizierung von Medienfunktionen in der Fußnote auf Seite 34.)

Verdeutlichen wollen wir dies am Beispiel der Rechenaufgabe:

Ein durchschnittlich begabter Mensch kann eine zweistellige Multiplikation im Kopf und ohne Hilfsmittel durchführen. Wenn allerdings mehr als zwei Zwischenergebnisse benötigt werden, ist er meist überfordert.

Dann kann er sich einem technischen Hilfsmittel, dem Taschenrechner bedienen. Dieser speichert für ihn die Zwischenergebnisse, die während der Rechnung anfallen, doch dadurch, daß im Wahrnehmungsraum – Tastatur und Display – diese Zwischenergebnisse nicht dauerhaft sichtbar sind, gehen Zusammenhänge verloren, werden nicht nachvollziehbar und eine ähnliche Rechnung erfordert im nachhinein, daß alle Berechnungsschritte nochmals ausgeführt werden müssen.

Ein qualitativ anderes Hilfsmittel sind Bleistift und Papier. Wenn die Aufgabe schriftlich gerechnet wird, bleiben Rechenweg und Zwischenergebnisse sichtbar und

überprüfbar, da die Spur des Rechenprozesses erhalten wurde und manuelle Operationen nicht wieder ausgeführt werden müssen. Aufgabe, Rechenweg und Zwischenergebnisse liegen allesamt immer im Wahrnehmungsbereich, lassen untereinander eine Verbindung herstellen und sind sogar im nachhinein wiederverwendbar.

Als Designziel von interaktiven Systemen geht es also weder um die Gestaltung rein textueller Dialoge noch von wirklichkeitstgetreuen Bildern, sondern in erster Linie um die räumliche Gestaltung von Text und Bild. Wichtig ist, im Bezug auf Wahrnehmen und Manipulieren einen Handlungsraum (Arbeitsumgebung) bereitzustellen, der es gestattet, durch aktives Handeln mit unmittelbarer Rückmeldung Bedeutung zu erschließen und (Zwischen-)Ergebnisse abzulegen, indem Wahrnehmungs- und Handlungsraum sowie Handlungsabschluß und Systemzustände direkt gekoppelt sind [34].

Nach im Kapitel 2 angestellten Überlegungen und vorgestellten Ansätzen wurde mit dem interaktiven Tutorium in Verbindung mit dem Einsatz von *MuPAD-notebooks* eine Arbeitsumgebung geschaffen, die einen veränderbaren und strukturierten Handlungsraum darstellt. Textuelle theoretische Erklärungen lassen sich durch den Einsatz der manipulierbaren *notebooks* nachvollziehen, wobei beide Komponenten gleichzeitig im Wahrnehmungsraum vorhanden sind.

Die zum Verknüpfen von Text (Tutorium) und Interaktion (*MuPAD*) aufgestellten Kriterien des Gestaltungsansatzes "Reduzierung erzwungener Sequentialität" sollen

"mentale Transformationen und motorische Aktivitäten vermeiden, die weder der jeweils zu erledigenden Aufgabe inhärent, noch aus Lernzwecken erforderlich sind.

Die erzwungene Sequentialität, die sich alleine aus den spezifischen Eigenheiten des Artefakts begründet, gilt es zu reduzieren.

Dabei müssen die medialen Qualitäten verschiedener Artefakte berücksichtigt werden." [34]

Es folgen die Kriterien des Gestaltungsansatzes in der Übersicht auf der nächsten Seite. Dabei beziehen sich die Kriterien in der linken Spalte "Handlungsausführung" auf Manipulationen, die Kriterien in der rechten Spalte "Wahrnehmungsraum" auf die aktuelle Arbeitsumgebung. Wenn sich aber Manipulationen auf mehrere Wahrnehmungsräume erstrecken, kommen die Kriterien der mittleren Spalte "Konventionen" zum Tragen. Diese Dreiteilung stellt in gewisser Hinsicht eine Priorisierung der Kriterien dar im Bezug auf mögliche Designkonflikte.

| Handlungsausführung | Konventionen | Wahrnehmungsraum |
|------------------------|---------------|---------------------|
| Rückmeldung | Konsistenz | Strukturiertheit |
| Steuerbarkeit | Dokumentation | Prägnanz |
| Individualisierbarkeit | | Lokalität |
| Flexibilität | | Auswahlpräsentation |
| Ausführungsminimalität | | |

3.2.3 Kriterien des Gestaltungsansatzes

Die Kriterien des Gestaltungsansatzes wollen wir hier kurz vorstellen und dabei mit Beispielen aus dem interaktiven Tutorium sowie den *MuPAD*-notebook illustrieren. Die Definitionen sind dabei [34] entnommen.³

Rückmeldung

Definition:

Unmittelbarkeit der Rückmeldung bedeutet, daß auf jede Aktion der Benutzer eine zeitlich unmittelbare Reaktion des Systems erfolgt, die den Benutzern mitteilt, daß die Eingabe vom System erkannt wurde.

Differenziertheit der Rückmeldung bedeutet, daß die Konsequenzen einer Eingabe möglichst situationsspezifisch und aussagekräftig vom System angezeigt werden.

Zum Beispiel können wechselnde Cursorformen nach einer Eingabe Systemzustände verdeutlichen oder beschriftete Buttons den zu erreichenden Systemzustand angeben, der einer Handlungsausführung folgt.

³Die Kriterien lehnen sich zum Teil an die Gestaltgesetze an. Die folgenden sieben Gestaltgesetze gehen in dieser Form auf Metzger (1966) zurück und sind eine Verallgemeinerung der ursprünglich von Wertheimer 1922/23 aufgestellten Gesetze [38]. Sie lauten:

- Nähe
- Ähnlichkeit/Gleichartigkeit
- Gemeinsames Schicksal
- Aufgehen ohne Rest
- Durchgehende Kurve
- Geschlossenheit
- Gute Gestalt/(objektive) Einstellung

Die Gestaltgesetze liefern auch heute noch ein brauchbares Gerüst für die Gestaltung von Benutzungsoberflächen.

Ziel ist es, orts- und handlungsbezogene Rückmeldung zu geben, die dem möglichen Handlungsabschluß entspricht.

Im *MuPAD*-notebook wird vor der folgenschweren Handlung, alle Ausgaben zu löschen, gewarnt, da diese nicht rückgängig gemacht werden kann. Dieser Hinweis muß vor dem Fortfahren bestätigt werden.

Steuerbarkeit

Definition:

Steuerbarkeit bedeutet, die Benutzer in die Lage zu versetzen, möglichst jederzeit die nächste Eingabe zu bestimmen.

Dabei müssen die Dynamik des Systemverhaltens und die Granularität der Bildschirmobjekte den motorischen und sensorischen Fähigkeiten der Benutzer angepaßt sein.

Undo- und Redo-Funktionen sowie die Möglichkeiten zur Rückkehr zum Startpunkt durch eine *history list* oder Bookmarks sollten zur Verfügung stehen. Dabei sind Ausnahme- und Sonderfälle ausreichend zu berücksichtigen.

Ziel ist es, dem Benutzer jederzeit Abbrechbar-, Unterbrechbar-, Umkehrbar- und Wiederholbarkeit im Programmablauf zu ermöglichen.

Im interaktiven Tutorium besteht die Möglichkeit, in jedem einzelnen Teilbereich des Browser-Fensters einen Kontextwechsel rückgängig zu machen.

Das *MuPAD*-notebook bietet die Möglichkeit, jederzeit die Berechnung des *MuPAD*-Kerns zu stoppen.

Individualisierbarkeit

Definition:⁴

Individualisierbarkeit bedeutet, Konzepte und Mechanismen anzubieten, die es den Benutzern gestatten, Handlungssequenzen und Operationsfolgen, die zum Erreichen eines gewünschten Erscheinungsbildes oder Systemzustands erforderlich sind, zu reduzieren.

Zum Beispiel sollten Voreinstellungen für Systemparameter möglich und verschiedene Wege zum Erreichen eines Ziels vorhanden sein. Dialogabläufe sollten spezifizierbar sein, wobei eine Abwägung zwischen Granularität und Komplexität erfolgen muß.

⁴Definition nach EE ISO 9241 Teil 10: Ein Dialog ist individualisierbar, wenn das Dialogsystem Anpassungen an die Erfordernisse der Arbeitsaufgabe, individuelle Vorlieben des Benutzers und Benutzerfähigkeiten zuläßt.

Ziel ist es, daß sich Software an benutzerspezifische Besonderheiten anpassen läßt und ein System nichts zwingend vorschreibt.

Der Zugang zu den einzelnen Dokumenten im interaktiven Tutorium ist in dreifacher Weise möglich: Ein Dokument kann durch sequentielles Blättern über zwei Button, durch direktes Anwählen im Inhaltsverzeichnis oder durch Starten einer Suchanfrage erreicht werden.

Im *MuPAD*-notebook können Schriftart, -größe und -farbe für die Kommentar-, Ein- und Ausgaberegionen unabhängig voneinander gewählt werden.

Flexibilität

Definition:

Flexibilität bedeutet, den Benutzern zum Erreichen des gewünschten Systemzustandes oder Erscheinungsbildes mehrere Möglichkeiten anzubieten, aus denen sie die für ihre Zwecke oder gemäß ihrer Vorliebe günstigste auswählen können.

Ziel ist es, eine Auswahl von verschiedenen Möglichkeiten anzubieten, ein und dasselbe Ziel zu erreichen, da es kein benutzer- und situationsunabhängiges Optimum in der Gestaltung von Benutzungsoberflächen gibt.

Das *MuPAD*-notebook stellt für das Abarbeiten zwei Vorgehensweisen zur Verfügung: Zum einen kann jede Eingabe einzeln bestätigt werden oder alle Eingaben des notebook werden automatisch evaluiert.

Ausführungsminimalität

Definition:

Ausführungsminimalität zielt darauf, alle Zustandsübergänge zu vermeiden, die weder zur Erledigung der jeweiligen Arbeitsaufgabe erforderlich sind, noch zum Erlernen oder Verstehen des Systemverhaltens.

Zustandsübergänge sind vermeidbar, wenn in einer Eingabesequenz das zu bearbeitende Objekt nicht verändert wird und auch keine für die weitere Bearbeitung erforderlichen Attribute eingestellt werden müssen.

Ziel ist es zum Beispiel, durch das Vererbungsprinzip Gruppenmanipulation von Objekten zu ermöglichen und durch Zeigen anzubieten statt selber benennen zu müssen. Dabei sollte das Benennen von Objekten aber auch möglich sein sowie eine Auswahlvorschau, Einsatz einer *wildcard* und Mehrfachselektion angeboten werden.

Wenn im interaktiven Tutorium die Suche aktiviert wird, erscheint im multifunktionalen Fenster die Eingabeaufforderung. Gleichzeitig werden aber auch Hinweise auf spezielle Funktionen der Suche gegeben wie zum Beispiel die Verknüpfung von Suchbegriffen oder der Einsatz einer *wildcard*, ohne daß der Benutzer diese extra anfordern muß.

Konsistenz

Definition:

Konsistenz heißt, Gleiches gleich zu behandeln, oder umgekehrt, Unterschiede in der Darstellung von Bildschirmobjekten oder der Behandlung von Benutzereingaben nur dann einzuführen, wenn sie eine neue Bedeutung haben.

Ziel ist es, keine unbegründete Abweichung oder Neuerung einführen.

Zum Beispiel sollten sich Menüs in der gleichen Reihenfolge befinden wie auch die in den Menüs enthaltenen Punkte. Dies ist wichtig, wenn sich Handlungen über mehrere Wahrnehmungsräume erstrecken.

Im Tutorium werden Verweise immer in separaten Fenstern dargestellt. Dies gilt für Fußnoten, Formeln, notebooks und die Hilfe.

Strukturiertheit

Definition:

Strukturiertheit bedeutet, das Wahrnehmungsfeld bzw. den jeweiligen Bildschirmaufbau so zu gestalten, daß die darin enthaltenen Informationen möglichst effektiv und verläßlich erschlossen werden können.

Dabei müssen optische, inhaltliche und aufgabenbezogene Aspekte zusammen berücksichtigt werden.

Ziel ist es, Datenklassen zu bilden, logische Zusammenhänge räumlich abzubilden, Objekte auszurichten und abzusetzen, nur durch Struktur zu kodieren, Arbeitspunkte hervorzuheben und den natürlichen Arbeits- und Lesefluß zu beachten.

Im interaktiven Tutorium sind verschiedene Bereiche räumlich abgesetzt: Der funktionale Bereich oben enthält als kleine Gruppen Steuerungselemente sowie andere Funktionen, ein multifunktionales Fenster und das Inhaltsverzeichnis, während der Inhalt im großen Hauptfenster unten dargestellt wird.

Dabei erscheinen gleiche Elemente immer am gleichen Platz.

Prägnanz

Definition:

Prägnanz bedeutet, Bildschirmobjekte so zu gestalten, daß Einzelelemente unter Vielen gut erkannt und ausgewählt werden können.

Veränderliche Objekte, die Systemzustände repräsentieren, sollen diese Zustandsinformation möglichst deutlich gegenüber dem Standardzustand der anderen Objekte verdeutlichen.

Ziel ist es, Objekte schnell zu finden und wichtige Zustände hervorzuheben. Dabei kommt es nicht auf die Gestaltung des einzelnen grafischen Objektes an, sondern auf das Verhältnis der Objekte zueinander und die Einheitlichkeit der Gestaltung.

Im interaktiven Tutorium erfolgt die Visualisierung der Stelle, wo man sich derzeit im Lehrangebot befindet, im Inhaltsverzeichnis durch einen markanten roten Ball hinter dem aktuellen Dokument, welches gerade angezeigt wird.

Im *MuPAD*-notebook werden die unterschiedlichen Regionen (Kommentar, Eingabe, Ausgabe) farblich voneinander abgehoben. Kommentare werden im Kontext des Tutoriums immer schwarz, Eingaben rot und Ausgaben blau dargestellt. Außerdem werden Ein- und Ausgaben durch die Verwendung einer anderen Schriftart verdeutlicht: Kommentare erscheinen in einer serifenlosen, Ein- und Ausgaben in einer Typewriter-Schrift.

Lokalität

Definition:

Lokalität bedeutet, Handlungs- und Wahrnehmungsraum möglichst eng miteinander zu koppeln.

System(rück)meldungen sollten unmittelbar am Ort der Handlung erfolgen und zusammengehörige Aktionen bzw. Operationen sollten in benachbarten Regionen präsentiert bzw. ausgeführt werden können.

Ziel ist es, eine direkte und unmittelbare Kopplung von Handlungs- und Wahrnehmungsraum zu erreichen.

Im *MuPAD*-notebook verändert der Cursor je nach Systemzustand seine Form und es erfolgt unmittelbar am Ort der Eingabe auch eine Ausgabe. Bei Verwendung eines Semikolons zum Abschluß eines *MuPAD*-Befehls erfolgt eine Rückmeldung des Systems. Wenn diese nicht spezifisch genug ist oder sich eine Berechnung über einen längeren Zeitraum erstreckt, wird sie durch eine aussagekräftig textuelle Meldung ergänzt.

Auswahlpräsentation

Definition:

Präsentation der Auswahlmöglichkeiten bedeutet, die jeweils erreichbaren Zielzustände bzw. Operationen zu veranschaulichen.

Wo das nicht möglich ist, sollten zumindest entsprechende Hinweise darauf angebracht werden, daß weitere Auswahl- bzw. Eingabemöglichkeiten vorgesehen sind.

Ziel ist es, den aktuellen Stand im Vergleich zum gesamten bzw. erreichbaren anzuzeigen. Dabei sollten Datenfelder erst dann sichtbar sein, wenn der Zugriff auch möglich ist. Zu Lernzwecken sollten Teile eines Systems nicht versteckt, sondern nur vor dem Zugriff gesperrt werden.

Im interaktiven Tutorium werden zu jeder Seite im Hauptfenster oben rechts die aktuelle Dokumentnummer im Vergleich zur Gesamtanzahl der Dokumente angezeigt (4/19). Somit erhält man eine schnelle Übersicht, wo man sich im Gesamtangebot befindet.

3.2.4 Fazit

Diese Kriterien berücksichtigen natürlich nicht alle Aspekte, die bei der Gestaltung interaktiver Systeme denkbar sind. Allerdings können sie da Hilfestellung leisten, wo Designkonflikte auftreten oder der Entwickler neue Bereiche betritt. Allgemein gültige und evaluierte Konzepte müssen natürlich weiterhin berücksichtigt werden. Die Kriterien können sowohl für die Beurteilung bestehender Systeme eingesetzt werden wie auch dazu dienen, Probleme im Voraus bei der Neuentwicklung zu vermeiden.

Weitere Gestaltungsgrundsätze sind für bestimmte Medien zu beachten wie zum Beispiel die Bildschirmrichtlinie für das "Arbeiten mit Bildschirmgeräten" (Umsetzung von 89/391/EWG), Farbe und Typographie.

So verbietet sich zum Beispiel die Verwendung von kräftiger roter Schrift auf kräftigem blauem Grund aufgrund der chromatischen Aberration. Denn Farben werden wegen der unterschiedlichen Wellenlänge des Lichts unterschiedlich stark gebrochen. So muß das Auge trotz konstanten Abstandes der Schrift ständig die Arbeit des neu Fokussierens leisten. Eine ungestörte Wahrnehmung ist nicht gewährleistet. Wenn es sich bei Textpassagen um Programmcode oder Eingaben am Computer handelt, ist die Verwendung der Typewriter-Schrift die natürliche Wahl. Sie verdeutlicht zum Beispiel bei einzugebenden Befehlssequenzen, Programmlisten oder Ein- und Ausgaberegionen im *MuPAD*-notebook die Bedeutung der Textpassage, setzt sie in den richtigen Bezug und hebt sie vom normalen Text ab.

Einen anderen wichtigen Aspekt stellt die Navigation im interaktiven System dar. Dabei muß abgewogen werden, in welchem Maße der Benutzer zu einer bestimmten Arbeitsweise angeleitet und welche Entscheidungen in der Vorgehensweise dem Benutzer selbst überlassen werden soll. Dem Entwickler des Systems muß zum Beispiel klar sein, ob sequentielles Bearbeiten angestrebt werden soll oder ob auch nicht-sequentielles Lesen sinnvoll sein kann.

Das System muß dem Benutzer eine angemessene Orientierung bereitstellen, gerade wenn ein großer Datenraum erschlossen werden soll. So muß der Benutzer jederzeit abschätzen können, welche Menge an Information ihn noch erwartet und welche Menge er schon bearbeitet hat. Es muß auch immer ersichtlich sein, wo er sich zum aktuellen Zeitpunkt im gesamten Informationsangebot befindet.

Wie sich die Berücksichtigung der einzelnen Kriterien in der interaktiven Lehreinheit "Maschinenlabor Optische Spannungsanalyse" ausgewirkt haben, wird im nächsten Kapitel besprochen. Auf die Gestaltung der *MuPAD*-notebooks wird in Abschnitt 5.2.3 eingegangen.

Kapitel 4

Das interaktive Tutorium “Maschinenlabor Optische Spannungsanalyse”

Der Laborversuch “Maschinenlabor Optische Spannungsanalyse” beschäftigt sich mit der Analyse von Problemen der linear-elastischen Bruchmechanik und Auswertung mittels eines spannungsoptischen Verfahrens. Für die Vorbereitung darauf steht den Studierenden im Laboratorium für Technische Mechanik (LTM) derzeit ein Tutorium als Print-Werk zur Verfügung. Dieses informiert über Hintergründe, Stand der Forschung, Theorie und Praxis und soll sie in die Lage versetzen, den Laborversuch selbstständig durchführen zu können.

Mit der Umsetzung des Print-Tutoriums in eine interaktiv bearbeitbare und multimedial ergänzte Lehreinheit, dem interaktiven Tutorium “Maschinenlabor Optische Spannungsanalyse”, wird dem Benutzer eine Arbeitsumgebung bereitgestellt, die in einen funktionalen Bereich oben und einen inhaltlichen Bereich unten aufgeteilt ist. Es werden verschiedene Zugangsformen zum Erschließen des Inhalts angeboten und Animationen sowie Interaktionen fördern den Umgang und das Verständnis des zu vermittelnden Stoffes. Dies soll eine effektivere Vorbereitung gewährleisten.

Die Inhalte wurden zuerst überarbeitet, welches die Bereiche Text, Bild und Interaktion/Animation umfaßt, und dann in eine computerbasierte Lehreinheit umgesetzt.

4.1 Überarbeitung

Im vorhandenen Tutorium werden zum Verstehen des Stoffes und späteren Durchführen des Versuchs zum einen über Hintergrund, Stand der Forschung, Theorie und

Praxis informiert, zum anderen werden mathematische Verfahren und die beiden möglichen Wege der Anwendung dargestellt.

Letzterer Punkt der Mathematik wurde im Kapitel 1 behandelt. Bei Verwendung und Integration von verschiedenen Medientypen in einem multimedialen Lehrangebot sind die Vor- und Nachteile der einzelnen Typen zu berücksichtigen. Im folgenden wollen wir uns mit der Überarbeitung des inhaltlichen Teils beschäftigen. Darunter fallen Text- und Bildelemente sowie Interaktion und Animation.

4.1.1 Text

Da das Lesen am Bildschirm im allgemeinen anstrengender ist als das Lesen von Print-Medien, steht eine mögliche Kürzung des Inhalts an erster Stelle. Dabei dürfen natürlich wichtige Details nicht unbeachtet gelassen werden.

Um zu kürzen ohne dabei Kompromisse eingehen zu müssen, wurde der Inhalt vollständig neu erarbeitet. Durch Zuhilfenahme von externen Quellen konnten Details wie zum Beispiel die Wirkungsweise polarisierten Lichts in den globalen Zusammenhang, hier dem Polariskop, eingeordnet werden. Für das Tutorium wurde eine thematisch begründete Dreiteilung vorgenommen: Nach einem Überblick gibt ...

- **Kapitel eins** Auskunft über die Historie und eine Einführung in die Problematik der optischen Spannungsanalyse.
- **Kapitel zwei** beleuchtet die Theorie, die hinter den nutzbaren Effekten steht und erarbeitet die mathematischen Verfahren an einer einfacheren sowie einer komplexeren Methode.
- **Kapitel drei** zeigt an einem Beispiel die experimentelle Anwendung der vorher kennengelernten theoretischen Ansätze und mathematischen Verfahren.
- Im **ersten Anhang** werden die mathematischen Verfahren anhand des Programm-Codes der verwendeten *MuPAD*-notebook mit Kommentaren aufgearbeitet.
- Der **zweite Anhang** beschäftigt sich mit dem für das Experiment wichtigen Unterschied zwischen linear und zirkular polarisiertem Licht.

Die Anhänge sind zum Verstehen der Materie und zur Durchführung des Versuchs nicht zwingend erforderlich, sollen aber das Interesse für die Auseinandersetzung mit den mathematischen und zugrundeliegenden Verfahren wecken und den aktiven Umgang mit dem CA-System *MuPAD* fördern.

Die einzelnen Kapitel wurden in ihrer Gesamtheit betrachtet, die Grundvoraussetzungen und das Ziel klar herausgearbeitet und der Weg dorthin anhand einer geeigneten Anzahl von Zwischenschritten dargestellt. Dabei war wichtig, daß jeder Zwischenschritt logisch auf den vorhergehenden aufbaut und auch nachvollziehbar ist. Falls nötig wurde dazu der Sachverhalt einfacher dargestellt, wozu in der Regel mehr Zwischenschritte erforderlich waren. An anderen Stellen war nur eine Reorganisation der Schritte notwendig. Auf interessante aber abschweifende Nebeneffekte wurde nicht eingegangen.

Durch diese intensive Überarbeitung sollte nicht nur das Verständnis des Inhalts einfacher gemacht, sondern auch das Interesse an den zugrundeliegenden Verfahren geweckt werden.

4.1.2 Bild

Die vorhandenen Grafiken und Bilder wurden einer eingehenden Prüfung unterzogen in Bezug auf die Tauglichkeit, den Inhalt verständlicher zu machen bzw. zu illustrieren. Dabei wurde Wert darauf gelegt, daß die Grafiken nur das zeigen, was im Text erwähnt wird oder zum Verstehen des Textes hilfreich sein kann.

Zum Beispiel kann die Theorie für den dreidimensionalen Fall formuliert werden, obwohl die mathematischen Verfahren nachher nur für den zweidimensionalen entwickelt werden. So kann mit Hinweis darauf auf Darstellung des dreidimensionalen Falls verzichtet und auf den übersichtlicheren zweidimensionalen zurückgegriffen werden.

4.1.3 Interaktion/Animation

Im Gegensatz zum Print-Tutorium bietet die elektronische Form des Tutoriums die Möglichkeit, bewegte und interaktive Elemente zu benutzen. Durch moderne Verfahren ist es zum Beispiel möglich, Video- und/oder Tonsequenzen zu digitalisieren und zu präsentieren. Allerdings ist dabei immer der Nutzen im Vergleich zum Aufwand zu berücksichtigen und interaktiv (oder multimedial) darf nicht verwechselt werden mit einer verwirrend angeordneten Anzahl von blinkenden Bildern, die zwar kurzzeitig das Interesse des Anwenders wecken, diesen dann aber überfordern oder die spielerisch eingesetzten Effekte keinen Beitrag leisten im Prozeß des Verstehens und Erschließens des angebotenen Materials.

Navigation

Verschiedene Zugangsmöglichkeiten zu dem Tutorium werden angeboten. Es kann sequentiell gelesen werden (*next-/previous-Button*), über das Inhaltsverzeichnis ein Kapitel direkt ausgewählt werden oder über die Suchfunktion ein Begriff im Text gefunden werden.

Diese Navigationsformen und Suchmöglichkeiten werden später im Abschnitt 4.2.2 ab Seite 65 ausführlich behandelt.

MuPAD-notebook

Ein weiteres Element der Interaktion stellen die *MuPAD*-notebook¹ dar. Diese interaktiven Arbeitsblätter werden vom Hyperwave-Server geladen und in der lokalen *MuPAD*-Installation ausgeführt. (Nähere Erläuterungen zum Hyperwave-Konzept siehe Abschnitt 4.2.2 auf Seite 62f.) Drei *MuPAD*-notebook stehen im zweiten Kapitel zur Visualisierung und Verdeutlichung der mathematischen Verfahren und Abläufe, die zur Auswertung des Versuchs benötigt werden, zur Verfügung:

helligkeit_ein_punkt.mnb Durch mathematisch allgemein verständliche Berechnungen und eine klare Strukturierung des notebook wird der Umgang mit dem CA-System in den Vordergrund gestellt. Die Lichtintensität für einen Punkt des Isochromatenbildes wird in drei Teilschritten exemplarisch berechnet.

isochromatenbild.mnb Die Berechnungen des ersten notebook werden in einer *procedure* zusammengefaßt und ein Isochromatenbild für eine quadratische Fläche berechnet. Das Isochromatenbild wird als Ergebnis zu den gewählten Parametern ausgegeben.

sif_bestimmen.mnb Der umgekehrte Weg, aus einem Isochromatenbild die Parameter zu errechnen, wird vorgestellt. Dabei kann aus vorgegebenen Isochromatenbildern ausgewählt und die Berechnungen anhand von spezifischen Zwischenschritten nachvollzogen werden.

Das CA-System *MuPAD* und die Interaktionsmöglichkeiten werden im Abschnitt 5.1 ab Seite 67 ausführlicher vorgestellt.

Animation

Eine zentrale Bedeutung bei der Durchführung des Versuchs zur optischen Spannungsanalyse kommt der Verwendung von zirkular polarisiertem Licht im Gegensatz zu linear polarisiertem Licht zu (vgl. Kapitel 2 Seite 10f im Tutorium "Maschinenlabor Optische Spannungsanalyse").

¹Der Begriff notebook bezeichnet bei *MuPAD* ein interaktives Arbeitsblatt, welches ein druckfertiges Dokument darstellt. Eine weitere Bezeichnung dafür ist auch *worksheet*. *MuPAD*-notebook werden derzeit unter Windows 95/98/NT unterstützt.

Durch die Verwendung von zirkular polarisiertem Licht ist es uns möglich, die Linienstruktur der Isoklinen (Linien gleicher Hauptspannungsrichtung) zu eliminieren und so ein reines Bild der Isochromaten (Linien gleicher Hauptspannungsdifferenz) zu erhalten auf Grund der Tatsache, daß zirkular polarisiertes Licht im Gegensatz zu linear polarisiertem Licht der Probe gegenüber keine ausgezeichnete Richtung ausweist. Dieser Effekt wird dadurch hervorgerufen, daß die Lichtwellen vor dem Durchlaufen der Probe in eine Rotation um die Achse der Ausbreitungsrichtung versetzt werden², was nach dem Durchlaufen wieder rückgängig gemacht wird.

Da sich die Ursache dieser Bewegung schlecht mit Worten beschreiben läßt und man zwar mit dem Symbol $\textcircled{\parallel}$ die Struktur und Wirkungsweise linear polarisierten Lichts assoziieren können, sich der Effekt des zirkular polarisierten Lichts aber nicht mit dem Symbol $\textcircled{\odot}$ beschreiben läßt, liegt zur Veranschaulichung des Phänomens eine Animation vor. (Zur detaillierten Beschreibung siehe im Teil II Anhang B “Exkurs: Zirkular und elliptisch polarisiertes Licht”, Seite 32f im Tutorium “Maschinenlabor Optische Spannungsanalyse”.) Die Einzelbilder der Animation wurden

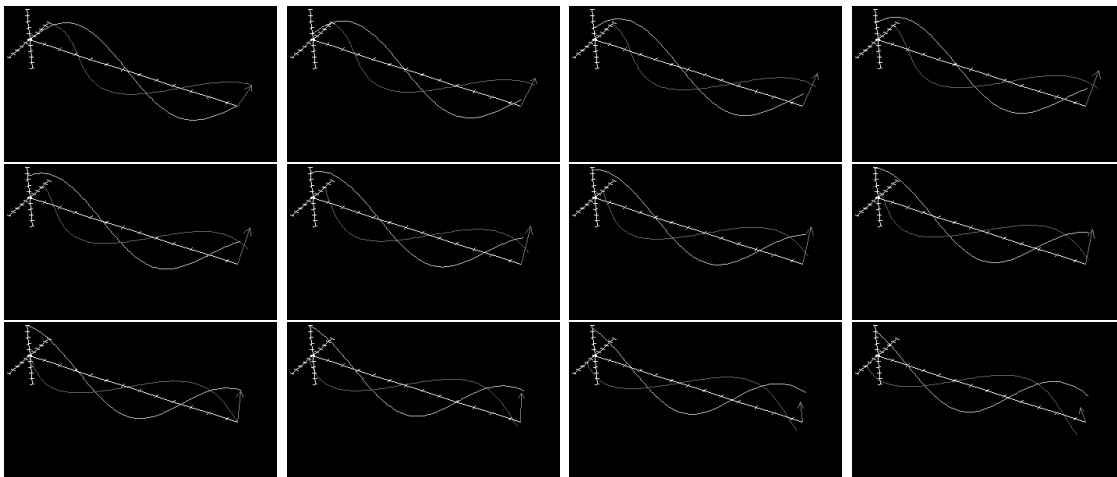


Abbildung 4.1: Standbilder der Animation “Zirkular polarisiertes Licht”

dabei selbst wieder mittels einer *MuPAD*-Routine erzeugt und zu einem *animated-gif* zusammengestellt. Lediglich die Größe der von *MuPAD* erzeugten Einzelbilder wurde verändert und der resultierende rotierende Vektor eingezeichnet.

²Dies geschieht, indem eine sogenannte Viertelwellenplatte in den Strahlengang gebracht wird, die wie ein mit Zug/Druck-Hauptspannungen belastetes Modell wirkt. Das linear polarisierte Licht wird in zwei gleichgroße, aufeinander senkrecht stehende Teilwellen zerlegt, die um eine viertel Wellenlänge gegeneinander phasenverschoben sind. Siehe Kapitel “Ebene Spannungsoptik”, Seite 10f im Tutorium “Maschinenlabor Optische Spannungsanalyse” (Teil II)

4.2 Umsetzung

Für die Umsetzung des Inhalts in elektronische Form stehen verschiedene Möglichkeiten zur Auswahl. Zum einen ist HTML zu nennen. Aber auch eine pdf (*portable document format*) oder dvi (*device independent*) Datei bieten gute Voraussetzungen. HTML bietet im Bezug auf den spezifischen Einsatz in dieser Lehreinheit gravierende Vorteile gegenüber pdf und dvi. Natürlich bringt die Wahl, wie alle anderen Lösungen auch, Nachteile mit sich. Die Abwägung der Vor- und Nachteile wollen wir im folgenden Abschnitt näher beleuchten.

4.2.1 Realisierung in HTML

Die jetzt vorliegenden inhaltlich überarbeiteten Seiten wurden nach HTML konvertiert³ gefolgt von einer differenzierten Anpassung an die gewünschten Strukturen. Dabei wurde auf die automatisch generierte Verweisstruktur der einzelnen HTML-Dokumente verzichtet, da diese Funktionalität vom Gateway des Hyperwave Information Server übernommen werden soll. Hierauf wird in diesem Kapitel später noch eingegangen.

Die Hypertext Markup Language

Die Hypertext Markup Language (HTML) wurde geschaffen, um multimedialfähige, einheitliche, elektronische Dokumente auf dem Internet bereitzustellen. Dabei stellt sie die Fähigkeit des *interactive hypertext linking* sowie deren Spezifikation (HTML) und Strukturierungselemente für das Layout zur Verfügung, wobei Inhalt und Struktur getrennt vorliegen (HTML).

HTML ist keine Programmiersprache und kümmert sich in erster Linie nicht um das Erscheinungsbild des Textes, wie es Textverarbeitungssysteme tun wie zum Beispiel L^AT_EX. Die Intention von HTML ist es, ein Dokument zu strukturieren, um den Inhalt leichter erfaßbar zu machen. Es geht nicht darum zu versuchen, das Dokument in einem aufwendigen Prozeß mittels HTML zu formatieren. Denn die Formatierung der Ausgabe ist wenig vorhersehbar und hängt von den Fähigkeiten des Browsers ab.

Dies ist auch ein Grund, sich an den aktuellen HTML 4.0 Standard zu halten, da ungewiß ist, mit welchem Browser die Seiten betrachtet werden und über welche zusätzlichen und vom Standard abweichenden Erweiterungen dieser verfügt⁴.

³Die Konvertierung erfolgte von L^AT_EX mit dem PERL-Programm latex2html von Nikos Drakos, Computer Based Learning Unit, University of Leeds

⁴Denn in dem Browser-“Krieg” zwischen Netscape Communications, Inc. und Microsoft Corp. wurden – hilfreiche wie auch aufregende – Erweiterungen abweichend vom Standard in die jeweiligen Browser eingebaut, die nicht Teil von HTML waren. Netscape tat dies im Netscape Navi-

Diese Entwicklung ist natürlich der Alptraum eines jeden Entwicklers, alle HTML-Varianten der Standard- und nicht-Standard-Elemente aller Browser-Familien und -Generationen berücksichtigen zu müssen, zumal dazu noch Betriebssystem- wie auch Software-spezifische Besonderheiten kommen. Allerdings hat dies alles der Popularität und Akzeptanz von HTML nichts anhaben können.

Die Vorteile im Vergleich

Trotz oben angesprochener Nachteile ergeben sich durch die Verwendung von HTML grundlegende Vorteile.

Zuerst ist die weite Verbreitung von (frei erhältlichen) Browsern zu nennen, die zum Teil schon im Betriebssystem integriert sind. Damit ist ein hoher Verbreitungsgrad sowie eine hohe Akzeptanz gewährleistet. Wenn zusätzlich Spezial-Software installiert werden muß – wie zum Beispiel kostenpflichtige Software im allgemeinen oder ein externer Viewer wie der Acrobat Reader für pdf oder ein dvi-Viewer wie xdvī – sinkt die Schwelle des Interesses schnell ab, unabhängig davon, welche Lösung die bessere ist.

Weiter bietet die Sprache HTML die Fähigkeit des *interactive hypertext linking*. Die technischen Konstrukte dafür waren von Anfang an bei der Implementation vorgesehen und gehören zum Standard-Funktionsumfang. Dies umfaßt sowohl die Verweise innerhalb des Dokuments, innerhalb einer Dokumentsammlung auf einem Server als auch auf Dokumenten auf anderen, weiter entfernten Servern.

Der textuelle Inhalt der Seite wird im ASCII-Format erstellt. Dies ist die einfachste Form und läßt wenig Kompatibilitätsprobleme erwarten.

Weiterhin läßt die Beschreibungssprache die Möglichkeit zu, den Text in einem speziellen “Wysiwyg”⁵-Editor oder aber auch den Quell-Text in einem beliebigen ASCII-Editor direkt zu bearbeiten. Ein zusätzlicher Schritt des Übersetzens entfällt, da der Quell-Text nur durch den Browser interpretiert werden muß. Der Text ist so leicht modifizier- und wartbar.

gator, um den Browser-Markt zu beherrschen im Hinblick auch auf den lukrativen kommerziellen Bereich und um als Marktführer den “de facto standard” zu diktieren. Daraufhin intervenierte Microsoft und baute wiederum Erweiterungen in den eigenen Browser Internet Explorer ein, der dann den Standard der Version 4.0 begründete mit Hinblick darauf, daß das World Wide Web Consortium (W3C) den dominierend Einfluß auf den HTML-Standard wiedergewinnt, während bei Version 3.2 der Standard eher von der Industrie selbst geschaffen worden war [9].

⁵What you see is what you get

Von einem HTML-Dokument im Browser heraus kann ein Objekt aufgerufen werden, dessen Typ anhand des *mime-type* erkannt und welches dann in einem externen Viewer dargestellt wird. So kann durch Aktivieren eines *MuPAD*-notebook die lokale *MuPAD*-Installation gestartet werden.

Die Nachteile im Vergleich

Der Hauptnachteil gegenüber anderen Lösungen wie zum Beispiel einer dvi-Datei ist die Tatsache, daß mathematische Typographie wie der Satz von Formeln oder die Verwendung von speziellen Zeichensätzen, welche heutzutage in allen wissenschaftlichen Anwendungen anzutreffen sind, nicht Einzug gehalten hat in die Standard-Version von HTML.

Alle Formeln wie auch spezielle Zeichensätze müssen als Bild-Elemente in den Text eingebunden werden. Die Wart- und Anpassbarkeit in diesem Bereich kann daher sehr mühselig werden.

Unter der Schirmherrschaft des World Wide Web Consortium (W3C) [41], welches eine Haupt-Standard-Organisation des Internets ist und sich um Entwicklung und Standardisierung von Aspekten des Internets wie dem `http`-Protokoll, `HTML`, `CSS` und `XML` kümmert, entwickelt die *HTML-Math Working Group* [39] seit zwei Jahren die MathML Beschreibungssprache [40]. Außerdem wird am neuen *eXtended HTML*-, dem XML-Standard [43, 42] gearbeitet.

4.2.2 Basis Hyperwave Information Server

Als Speicher- und Präsentationsmedium kommt kein herkömmlicher Web-Server zum Einsatz, sondern der Hyperwave Information Server (HWIS). Hierbei handelt es sich vom Prinzip um eine objektorientierte Datenbank, auf die mittels eines Web-Interface zugegriffen werden kann [16, 17].

Das Gateway

Als großen Vorteil bietet das Serverkonzept die Möglichkeit der Trennung von Inhalt, Form und Funktion durch ein frei konfigurierbares Gateway [30] (siehe Abbildung 4.2).

Dabei werden die rein inhaltlichen HTML-Seiten in einer Reihenfolge (*sequence*) und Baumstruktur (*collection*) auf dem Server abgelegt. Eine Navigation oder gar Verweisstruktur der einzelnen Seiten ist bisher nicht vorhanden. Das Gateway, geschaltet zwischen *database (dbserver)* und Browser (*client*), fügt in Abhängigkeit der Nutzerrechte und des speziellen Gateways Funktionalitäten hinzu und ordnet Inhalt und Funktionen in der im Gateway definierten Form an (siehe Abbildungen 4.3 und 4.4).

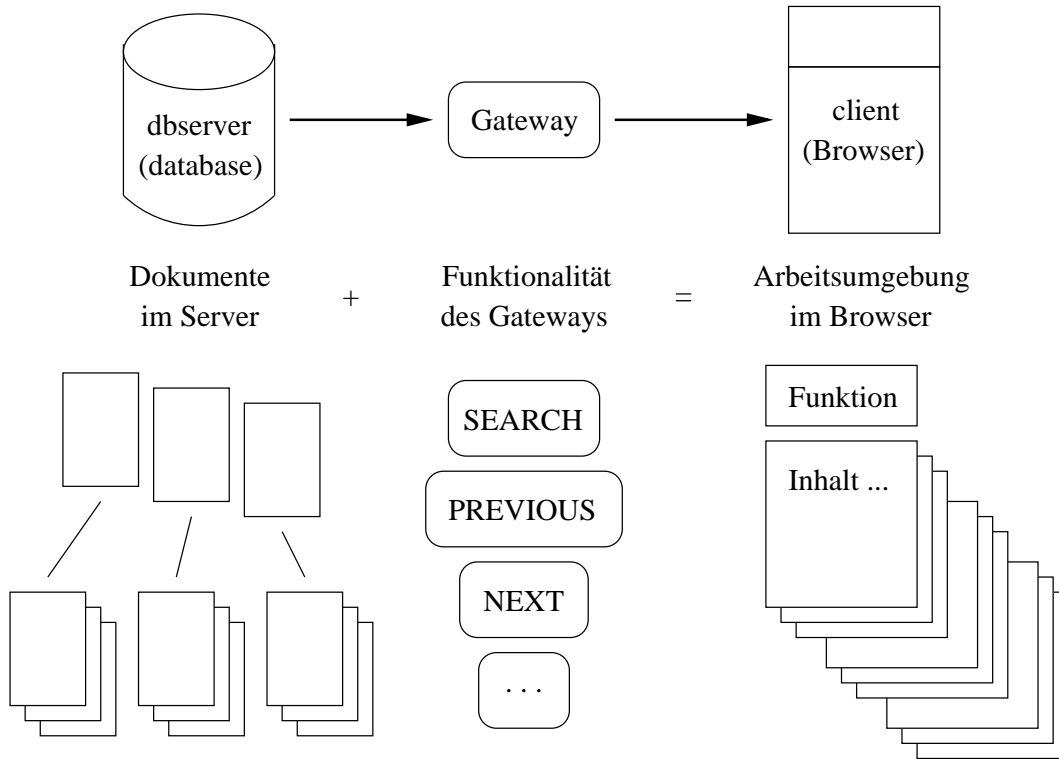


Abbildung 4.2: Server - Gateway - Client

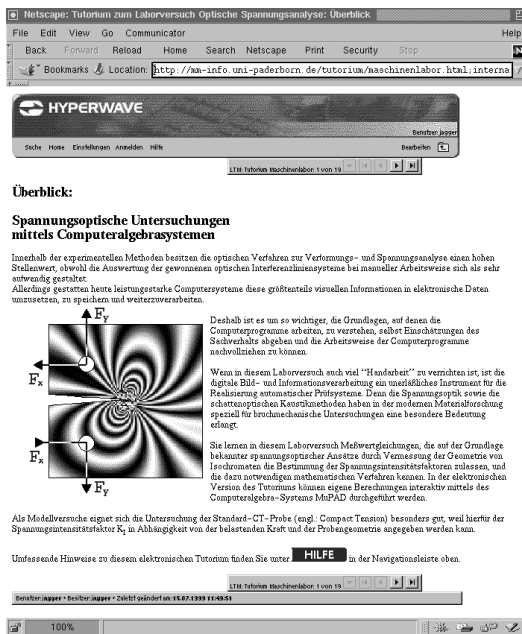


Abbildung 4.3: Standard-Gateway des HWIS

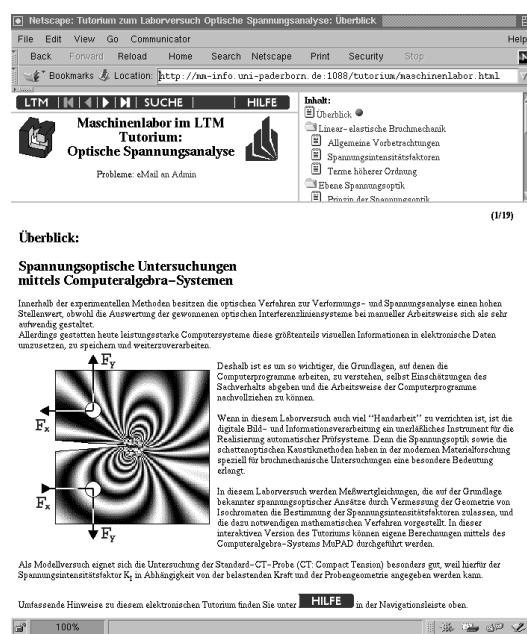


Abbildung 4.4: Gateway des Tutoriums

Dazu kann die Bereitstellung eines dynamisch erzeugten Inhaltsverzeichnis, eines (Volltext-)Suchformulars, von Navigationselementen, Diskussionsforen, Annotationen, etc. gehören.

Möglich ist also, daß technisch unbedarfte Autoren interaktive Seiten erstellen und diese vom HWIS automatisch zu einem Kurs zusammengefaßt, in eine Lehrumgebung integriert und nach Art und Definition des Gateways präsentiert werden.

Durch die Zugangskontrolle mittels einer differenzierten Rechtevergabe ist es auch möglich, verschiedene Kurse anzubieten aber nur bestimmten Personen zugänglich zu machen.

Für die Lehreinheit “Maschinenlabor Optische Spannungsanalyse” wurde ein Gateway von Grund auf neu erarbeitet, welches sich durch einen spezifischen, reduzierten Funktionsumfang auszeichnet. Dadurch bleiben die Schablonen (*template*), die einzelne Funktionen des Gateways steuern, klein und lassen eine höhere Effizienz zu.

Die Such-Funktion

Der HWIS stellt eine Such-Funktion (*ftserver*) zur Verfügung. Dabei läßt sich die Suche auf bestimmte Merkmale von Dokumenten (*attribute*) und Bereiche des Servers (*scope*) einschränken.

Als großen Vorteil ermöglicht die Funktion die Volltext-Suche im Datenbestand.

Das interaktive Tutorium hier bietet beim Aufruf der Such-Funktion gleich die wichtigsten Hilfen für die Syntax der Suche mit an, ohne daß der Benutzer erst danach fragen oder suchen muß.

Die folgenden Abbildungen zeigen den funktionalen Bereich nach der Aktivierung der Suche und der Eingabe des Suchbegriffs (4.5) bzw. die Darstellung der Suchergebnisse (4.6). Rechts wird das Inhaltsverzeichnis angezeigt, wobei der Ball hinter dem Titel das aktuelle Dokument bezeichnet.

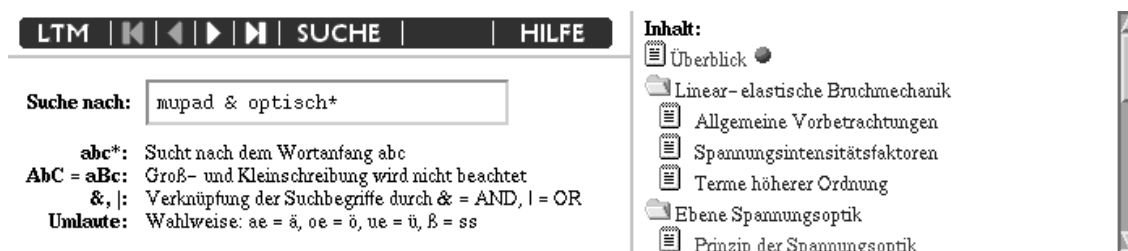


Abbildung 4.5: Funktionaler Bereich nach Aktivierung der Suche und Eingabe des Suchbegriffs

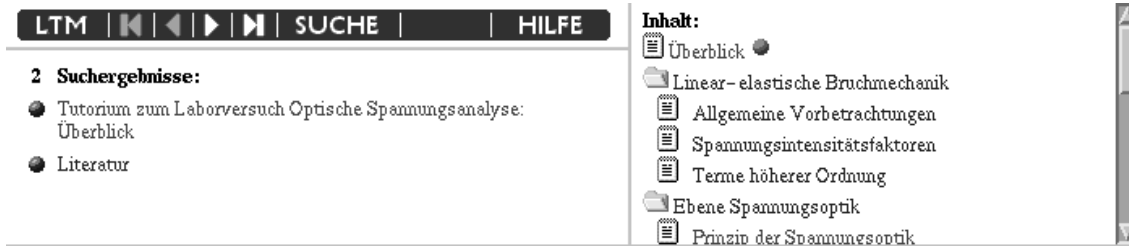


Abbildung 4.6: Funktionaler Bereich mit Darstellung der Suchergebnisse

Das Eingabefeld, welches den Suchbegriff erwartet, ist sofort aktiv für die Tastatureingabe ohne daß der Benutzer dies aktivieren muß (Prinzip der “Reduzierung erzwungener Sequentialität”, siehe Seite 42 im Kapitel 3.2).

Das *hyperwave interchange format*

Als eigenes Format stellt der HWIS das *hyperwave interchange format* (*hif*) zur Verfügung. Dieses erlaubt den Export von Baumstrukturen und allen enthaltenen Objekten, wobei Meta-Informationen getrennt vom Inhalt abgespeichert werden, von jedem und den Import auf jeden beliebigen HWIS.

Die Navigation

Drei mögliche Zugänge zum interaktiven Tutorium stehen zur Verfügung:

1. Das Inhaltsverzeichnis
2. Die Such-Funktion
3. Die Navigations-Button

Dabei ermöglichen die ersten beiden Navigationshilfen einen nicht-sequentiellen Zugang während die letzte Möglichkeit dem sequentiellen Lesen entspricht. Hierauf wird im folgenden kurz eingegangen.

Der HWIS stellt verschiedene Funktionen zur Navigation bereit. Unter anderem einen Verweis auf das erste, das vorige, das nächste und das letzte Objekt einer Dokumentenfolge. Spezielle Abfragen im Gateway ermöglichen es, beim Beginn bzw. Ende einer Sequenz die Funktionen *previous* und *first* bzw. *next* und *last* zu unterdrücken. Die Button könnten in diesem Fall entfallen, da die Funktionalität nicht zur Verfügung stehen und kein Nachteil bei der Navigation entsteht.

Allerdings würden dann benachbarte Button eine neue Position erhalten (Kriterium der Lokalität, siehe Seite 51) und die Übersichtlichkeit beim Benutzen ist beeinträchtigt. Hier dagegen verschwinden die Button nicht, sondern werden ausgegraut dargestellt. Dem Benutzer wird so vermittelt, daß er an dieser Stelle nur in eine Richtung blättern kann, an anderer Stelle aber die Auswahl des Vor- und Zurückblätterns erhalten kann (Kriterium der Auswahlpräsentation, siehe Seite 52).

Kapitel 5

Computeralgebra-Systeme in der Lehre

Der Idee, die Print-Version des Tutoriums zu einer interaktiven Lehreinheit zu erweitern, lag die Frage zugrunde, ob dem Studenten komplexe mathematische Zusammenhänge nicht besser mittels eines CA-Systems nähergebracht werden können. Dann wäre auch denkbar, nicht nur numerische Ergebnisse zu berechnen, sondern auch einen algebraischen Zusammenhang zwischen Eingabeparametern und Lösung zu ermitteln. Eine Bereitstellung von interaktiven Arbeitsblättern, sogenannten *MuPAD-notebook*, bot sich für die beiden in 1.3 ab Seite 16 und 1.4 ab Seite 20 vorgestellten Verfahren an.

Drei *notebook* werden in diesem Tutorium eingesetzt. Dabei führt das erste *notebook* den Anwender anhand einer einfachen Berechnung an das CA-System heran. Das Zweite beschreibt den Weg von den Eingabeparametern hin zum Isochromatenbild, wobei das selbstgenerierte Bildelement eine positive Haltung zum Benutzen des CA-Systems hervorrufen soll. Das dritte *notebook* realisiert dann den mathematisch aufwendigeren Weg vom Isochromatenbild zu den Spannungsintensitätsparametern. Intentionen, Abwägungen, Vor- und Nachteile beim Einsatz des CA-Systems *MuPAD* werden in diesem Kapitel behandelt.

5.1 *MuPAD* im Vergleich

Es gibt verschiedene Möglichkeiten mathematische Berechnungen auf Computer-Basis durchführen zu lassen. Zum einen existieren Programmiersprachen wie zum Beispiel C/C++ und Fortran, zum anderen Mathematikprogramme oder CA-Systeme wie *MuPAD* [36], Maple [28] und Mathcad [29].

CA-Systeme bieten die besten Voraussetzungen aufgrund einer nicht zu feinen Granularität der mathematischen Basiseinheiten – wie sie den Programmiersprachen anhaftet – und einer umfangreichen Bibliothek von komplexen und elementaren mathematischen und symbolverarbeitenden Funktionen.

Ein CA-System besitzt zwar eine eigene Syntax zum Formulieren des mathematischen Sachverhalts (Programmiersprache¹), doch läßt sich diese Sprache so lesen wie der mathematische Sachverhalt formuliert wird.

Dabei können Algorithmen aus vorhandenen komplexen Funktionen zusammengesetzt werden, was die Lesbarkeit des Programm-Codes erhöht, sowie auch eigene Konstrukte in einer Prozedur zusammengefaßt werden.

Ein weiterer Vorteil gegenüber herkömmlichen Programmiersprachen ist, daß numerische Berechnungen mit beliebiger Genauigkeit und sowohl algebraische, symbolische wie numerische Rechnungen durchgeführt werden können. Außerdem muß ein *MuPAD*-Programm nicht kompiliert werden. Es wird vom *MuPAD*-Kern zur Laufzeit interpretiert.

Als Fazit ergibt sich, daß ein CA-System den interaktiven Umgang des Anwenders mit Beispielen unterstützen kann.

5.1.1 Bibliotheken

CA-Systeme wie *MuPAD* beinhalten eine Reihe von Bibliotheken. Dabei stellt eine *MuPAD*-Bibliothek ein Paket von Funktionen zur Lösung von Problemen eines speziellen Gebiets wie etwa der Linearen Algebra, der Zahlentheorie oder der Numerik zur Verfügung. Informationen über ein Paket können mit dem Befehl `help(paket_name)` und die enthaltenen Funktionen mit `info(paket_name)` abgerufen werden.

So stehen im Paket `linalg` Funktionen wie das Transponieren einer Matrix oder das Lösen eines Gleichungssystems zur Verfügung, wobei sich der Anwender zuerst einmal keine Gedanken über den verwendeten Algorithmus machen muß. Eine eigene Implementation entfällt zum Beispiel im Gegensatz zur Programmiersprache C/C++. Hier müßten im CA-System vorhandene Standard-Funktionen in aufwendiger Programmierarbeit selbst implementiert oder auf entsprechende externe Bibliotheken zurückgegriffen werden.

In Fortran käme zum Beispiel ein Anbinden der NAG Fortran Routinen² in Fra-

¹Die Programmiersprache von *MuPAD* besitzt eine ähnliche Syntax wie Pascal. Es existiert ein Konzept für objektorientierte Programmierung.

²NAG, The Numerical Algorithms Group Ltd., <http://www.nag.co.uk>: Die NAG C Bibliothek ist eine bekannte kommerzielle C Bibliothek mit einer sehr großen Anzahl an professionellen numerischen Routinen

ge. Diese sind mittlerweile auch als **MAG C** Bibliothek erhältlich und können als ein sogenanntes dynamisches Modul in *MuPAD* eingebunden werden, wie in [5, Seite 154f] und [6, Seite 49f] beschrieben ist.

5.1.2 Hilfe

Das CA-System *MuPAD* stellt eine umfangreiche online-Hilfe zur Verfügung. Diese beschränkt sich nicht nur auf die genaue Definition der Syntax eines Befehls, sondern liefert auch mathematische Hintergründe und Beispiele. Hierbei können die Beispiele zum Ausführen gleich in die Arbeitsumgebung des CA-System übernommen und evaluiert werden.

Eine solche Funktionalität leistet einen entscheidenden Beitrag zum Umgang sowohl mit der Mathematik als auch der Programmierung und Implementation.

5.1.3 Struktur

Gleichzeitig bietet ein CA-System dem Anwender die Möglichkeit, verändernd in den Programm-Code einzugreifen, unterstützt durch komplexe Funktionen und dadurch kürzeren und übersichtlicheren Programm-Code und der speziellen Aufteilung des *MuPAD*-notebook in drei Bereiche: Der Kommentar-, Eingabe- und Ausgaberegion. Diese Regionen sind farblich voneinander abgesetzt und erhöhen dadurch die Lesbarkeit des notebook.

In Kommentarregionen können mathematische oder grundlegende Sachverhalte erläutert und Hinweise zum Benutzen des notebook gegeben werden.

Die Eingaberegionen enthalten in der Regel Zuweisungen, die vom Anwender verändert, und Operationen, die durch Bestätigen evaluiert werden können. Die Intention, daß nicht nur vorgefertigte Programme gestartet, sondern Beispiele verändert und erweitert werden können, ist dabei besonders wichtig. Interaktivität beschränkt sich so nicht nur auf Klicken und Ziehen in einer grafischen Benutzeroberfläche, sondern stellt die gezielte Manipulation des Handlungsraums dar (vergleiche Abschnitt 3.2.2).

Die Rückmeldungen und Ergebnisse erscheinen in der Ausgaberegion unmittelbar dort, wo Berechnungen ausgeführt worden sind (Kriterium der Lokalität, siehe Seite 51).

Durch den strukturierten Aufbau des notebook und den einfachen Zugang zur Grundfunktionalität des CA-System ist der Anwender in der Lage, durch Anwenden und Verändern komplexe mathematische Sachverhalte zu verstehen und zu lernen.

5.1.4 Dynamische Module

Das CA-System *MuPAD* bietet weiter den Vorteil einer effizienten Anbindung mathematischer Software, zum Beispiel eine Integration von C/C++ oder Fortran Programm-Code, sogenannter dynamischer Module [5].

Schon bestehende Programme können so integriert und zum Beispiel Programmteile, in denen numerische Berechnungen im Vordergrund stehen, zeitsparender ausgeführt werden³. So wurden hochauflösende Isochromatenbilder zur Verwendung im interaktiven Tutorium und dieser Arbeit mittels eines *MuPAD*-Programms generiert, welches ein C++-Modul eingebunden hat (siehe Anhang B.1).

Das Konzept der dynamischen Module verbessert den Einsatz eines CA-Systems in der Praxis erheblich. Dadurch lassen sich bisher gemachte Forschungsergebnisse mit dem Einsatz eines modernen CA-Systems verbinden und bestehende Programme integrieren. So ausgestattete CA-Systeme gewinnen in der Praxis zunehmend an Relevanz. Ein Einsatz dieser Systeme in der technisch orientierten Lehre kann deshalb von entscheidendem Vorteil in der Ausbildung der Studenten sein.

5.2 *MuPAD* im interaktiven Tutorium

Für die Anbindung des CA-Systems *MuPAD* an die interaktive Lehreinheit "Maschinenlabor Optische Spannungsanalyse" gibt es verschiedene Möglichkeiten. Im folgenden wird die hier gewählte Variante vorgestellt und deren Vor- und Nachteile mit anderen Möglichkeiten verglichen.

5.2.1 *MuPAD* Installation

Grundlegend stellt sich die Frage, wo die Berechnungen, die während einer Sitzung angestellt werden, ausgeführt werden sollen. Dies kann lokal auf dem Rechner passieren oder auch entfernt (*remote*) auf einem zentralen Server.

Für die Berechnung auf einem zentralen Rechner sprechen folgende Gründe:

- Der Rechner stellt ausreichende Hardware zur Verfügung, die eventuell speziell auf den Betrieb eines CA-Systems ausgelegt wurde.
- Der Rechner steht im Idealfall ausschließlich für das CA-System zur Verfügung, das heißt, es laufen keine weiteren Prozesse, die Rechenzeit und Speicher benötigen.

³Die Verwendung von dynamischen Modulen ist derzeit in der Unix-/Linux-Version und in der aktuellen Entwickler-Version unter Windows 95/98/NT verfügbar

- Die Wartung der Software ist einfach und es ist zu jeder Zeit die neueste Version des CA-Systems vorhanden.
- Eine Ausstattung der lokalen Rechner mit dem CA-System entfällt, das CA-System ist an jedem mit dem Intra-/Internet verbundenen Rechner verfügbar.

Um diese Vorteile nutzen zu können, muß allerdings eine Schnittstelle zwischen CA-System und dem *client* (Browser) bereitstehen. Vorstellbar wäre ein Java-Programm, welches im Browser gestartet wird und eine Eingabe- sowie Ausgaberegion bereitstellt. Das Java-Programm bereitet die Eingabe auf, schickt eine Anfrage an den entfernt laufenden *MuPAD*-Kern, dieser evaluiert die Anfrage und sendet die Ergebnisse zurück, welche vom Java-Programm im Browser dargestellt werden. Allerdings müßten auch Funktionalitäten wie zum Beispiel graphische Ausgaben berücksichtigt werden, da sie für die Lehre von besonderer Bedeutung sind.⁴

Ein unter <http://www.mupad.de/cgi-bin/project/mupad/smupad> abrufbares cgi-Interface stellt zwar einen ersten Schritt dar, schränkt den Einsatz dieser Möglichkeit des entfernten Rechnens aber zu stark ein, um derart komplexe Berechnungen im Rahmen eines Tutoriums durchzuführen.

Aufgrund des Fehlens einer geeigneten Schnittstelle zwischen dem CA-System *MuPAD* und dem Browser wurde hier auf die lokale Installation zurückgegriffen. Aber auch hier ergeben sich Vorteile:

- Unabhängig von der Netzanbindung steht ein schneller Zugriff auf das CA-Systems zur Verfügung.
- Alle Funktionen des CA-Systems sind uneingeschränkt erreichbar wie zum Beispiel auch das Hilfe-System.

5.2.2 *MuPAD*-notebook Fenster

Eine weitere grundlegende Entscheidung muß getroffen werden: Sollen die Berechnungen des CA-Systems im eigenen Fenster erfolgen oder in die inhaltlichen Seiten der Lehreinheit integriert werden? Dazu sollen die beiden Lösungen verglichen werden.

Derzeit unterstützt der Browser Internet Explorer 4.0 im Gegensatz zum Netscape Navigator die Möglichkeit, einen OLE-Container in-place darzustellen. Das heißt, ein *MuPAD*-notebook kann innerhalb eines HTML-Dokuments eingebettet vom Browser

⁴Entsprechende Schnittstellen sind zum aktuellen Zeitpunkt in der Entwicklung und könnten in eine spätere Version des Tutoriums einfließen.

angezeigt werden. Der Benutzer verläßt also die Arbeitsumgebung nicht. Allerdings verschieben sich die Inhalte, wenn Ausgaberegionen gefüllt werden. Eine gewisse Irritation kann dadurch hervorgerufen werden.

Wenn Berechnungen des CA-Systems in einem eigenen Fenster erfolgen, muß der Benutzer zwar einen Kontextwechsel, welcher ein Wechsel der Fenster/Anwendungen darstellt, vollziehen, doch bleiben beide Dokumente an ihrer ursprünglichen Stelle erhalten und gleichzeitig im Wahrnehmungsraum des Benutzers erhalten (Kriterium der Ausführungsminimalität, siehe Seite 49). So können unabhängig voneinander verschiedene Dokumente im Browser und CA-System dargestellt bzw. verändert werden. Während Berechnungen im CA-System erfolgen, kann zu einem erklärenden Dokument im Browser zurückgeblättert werden.

Da der Browser Netscape Navigator die OLE in-place-Technik derzeit nicht unterstützt und eine konsistente Browser-unabhängige Lösung angestrebt wurde, werden Berechnungen des CA-Systems *MuPAD* im eigenen Fenster durchgeführt.

5.2.3 Verbindung von *MuPAD* und Tutorium

Die Verbindung zwischen dem CA-System *MuPAD* und dem interaktiven Tutorium im Browser beschränkt sich darauf, daß durch ein Klicken auf einen *MuPAD*-Verweis ein *MuPAD*-notebook gestartet wird bzw. eine schon bestehendes notebook in den Vordergrund geholt wird. Dabei wird die entsprechende .mnb-Datei vom HWIS in den temporären Bereich des lokalen Rechners geladen und hier ausgeführt⁵.

Durch die Verwendung einer lokalen *MuPAD*-Installation ist es möglich, die Ausgabe von graphischen Elementen und das Hilfe-System zu verwenden. So kann der Benutzer durch den Befehl ?BEGRIFF; im *MuPAD*-notebook Hilfe zum gewünschten Stichwort erhalten. Falls keine Hilfe zum Stichwort vorhanden ist, wird eine Auswahl an ähnlichen Begriffen angeboten (Kriterium der Ausführungsminimalität, siehe Seite 49).

Dem durch ein Semikolon abgeschlossenen Befehl folgt bei *MuPAD* die Ausgabe eines Ergebnisses, während dieses bei einem mit einem Doppelpunkt abgeschlossenen Befehl nicht erfolgt. In beiden Fällen meldet das System in der Statuszeile unten, daß der Kern arbeitet. Bei der Gestaltung der *MuPAD*-notebooks wurde diese schon vorhandene Rückmeldung durch spezifische Meldungen erweitert.

Wenn die Rückmeldung des Systems nicht ausreichend ist – zum Beispiel länger andauernde Rechnungen durchgeführt werden oder die Rückmeldungen nicht aussagekräftig genug sind, werden Hinweise für den Benutzer ausgegeben, die ihn hinreichend über den derzeitigen Stand informieren. In allen Fällen erfolgt die Rückmel-

⁵Zur Initialisierung ist es notwendig, vor den Berechnungen einmalig ein *MuPAD*-script vom Typ .mu zu laden. Dieses enthält in den notebooks verwendete Prozeduren.

derung des Systems unmittelbar am Ort nach der Eingabe in der Ausgaberegion und durch eine veränderte Form des Cursors (Kriterium der Lokalität und Kriterium der Rückmeldung, siehe Seite 51 und 47).

Wenn alle Ausgaberegionen nach einer Evaluation des *notebook* gelöscht werden sollen, um mit veränderten Eingaben neue Berechnungen anzustellen, weist das System darauf hin, daß dieser Vorgang nicht rückgängig gemacht werden kann.

5.3 Aussicht

Drei Aspekte sollen einen Ausblick geben, inwieweit sich der hier gewählte Ansatz erweitern läßt und welche Möglichkeiten offenstehen.

1. Ein Java-Programm als Interface für das CA-System *MuPAD* erhöht die Flexibilität beim Einsatz in interaktiven Lehreinheiten, die im Internet bereitgestellt werden, erheblich. Ohne den Aufwand einer eigenen Installation kann das CA-System eingebunden werden.

Das CA-System könnte also einmal in einer Einrichtung, zum Beispiel einer Universität, installiert werden und von allen Fakultäten genutzt werden, ohne daß die Rechner in einem Netzwerk zusammengefaßt werden müßten oder auf das verwendete Betriebssystem Rücksicht genommen werden müßte (siehe Abschnitt 5.2.1 auf Seite 70).

2. Ein Programm zum Selektieren eines Punktes mit entsprechendem Helligkeitswert aus einem Bild könnte den Benutzer in die Lage versetzen, selbst eine Punktmenge aufzustellen, wie es derzeit noch vorab mit Hilfe des *MuPAD*-Programms in B.1 (Seite 81) geschieht (siehe auch Abschnitt 1.4 auf Seite 20 und *MuPAD-notebook* im Tutorium "Maschinenlabor Optische Spannungsanalyse" (Teil II) auf Seite 20, oben). Dies kann zum Beispiel auch ein Java-Programm sein.

Der Einsatz des beschriebenen Verfahrens und die Verwendung des CA-Systems *MuPAD* wären so für eine interaktive Bestimmung der Spannungsintensitätsfaktoren in der Lehre oder auch Forschung geeignet. Dies könnte in Verbindung mit Punkt 1 auch zu einer verteilt angelegten Bearbeitung führen.

3. Bei einer Erweiterung des *MuPAD*-Programms *generiere* aus Abschnitt 1.3.1 auf Seite 18 und einer weitergehenden Untersuchung kann das CA-System *MuPAD* hilfreich sein bei der Untersuchung eines algebraischen Zusammenhangs zwischen Parametern (Spannungsintensitätsfaktoren) und Lösung des Problems (Grauwertverteilung des Isochromatenbildes).

Kapitel 6

Fazit

Das in dieser Arbeit erstellte interaktive Tutorium “Maschinenlabor Optische Spannungsanalyse” soll in der Vorlesung Maschinenlabor zum Einsatz kommen. Es ersetzt die papierbasierte Version und läßt durch die Umsetzung in ein computerbasiertes Medium vielfältige Formen der Interaktion zu.

Dazu wurden die mathematischen Grundlagen unter ingenieurwissenschaftlichen Gesichtspunkten dargestellt. Es wurden zwei Verfahren abgeleitet, die zum einen die Berechnung der Spannungsintensitätsfaktoren aus Isochromatenbildern, zum anderen das Generieren von Isochromatenbildern zu vorgegebenen Parametern zulassen. Beide Verfahren wurden für das CA-System *MuPAD* als *MuPAD-notebooks* implementiert, so daß sie das Tutorium durch eine neue Qualität der Interaktion für den Lernenden ergänzen.

Die Gestaltung des interaktiven Tutoriums unterscheidet sich grundsätzlich von der papierbasierten Form. Es wurden die Kriterien des Gestaltungsansatzes “Reduzierung erzwungener Sequentialität” im einzelnen vorgestellt und bei der Konzipierung der Lehreinheit angewendet. Auf die Auswirkungen im Tutorium wird verwiesen.

Als Basis für die Bereitstellung des Lehrangebotes im Internet eignet sich der Hyperwave Information Server besonders gut. Unter anderem werden Inhalt und Funktion getrennt behandelt – was Flexibilität und Wartbarkeit verbessert – und die Volltextsuche bietet eine neue Zugangsmöglichkeit zum Lehrangebot. Weiter enthaltene Möglichkeiten wie Annotationen oder Konzepte zum kooperativen Bearbeiten von Dokumenten können die Arbeitsumgebung in Zukunft erweitern.

Ein CA-System wie das im Tutorium eingesetzte *MuPAD* ist durchaus in der Lage, komplexe mathematische Prozesse übersichtlich in einem interaktiven Arbeitsblatt zu präsentieren. Eigene Berechnungen können durchgeführt und Ergebnisse gespeichert werden. Der Forderung, Berechnungen auch über das Internet anstellen zu können, wird durch die derzeitige Entwicklung einer geeigneten Schnittstelle Rechnung getragen.

Die Evaluation des Konzepts dieser Lehreinheit im zukünftigen Lehrbetrieb wird über Erwartungen und Anforderungen Auskunft geben, die in der Praxis an eine interaktive multimediale Lehrumgebung gestellt werden.

Anhang A

Das interaktive Tutorium

Das im Rahmen dieser Arbeit erstellte interaktive Tutorium “Maschinenlabor Optische Spannungsanalyse” soll ab dem Wintersemester 99/00 im Rahmen der Veranstaltung “Maschinenlabor” im Laboratorium für Technische Mechanik (LTM) an der Universität-GH Paderborn in der Lehre eingesetzt werden. Das Tutorium dient den Studenten zur Vorbereitung auf den Versuch im Maschinenlabor, soll Hintergründe, Stand der Forschung, Theorie und Praxis vermitteln und sie in die Lage versetzen, den Laborversuche selbstständig durchführen zu können.

Das interaktive Tutorium wird auf dem HWIS der Arbeitsgruppe “Informatik und Gesellschaft” am Heinz Nixdorf Institut bereitgestellt und ist unter der URL

`http://mm-info.uni-paderborn.de/tutorium`

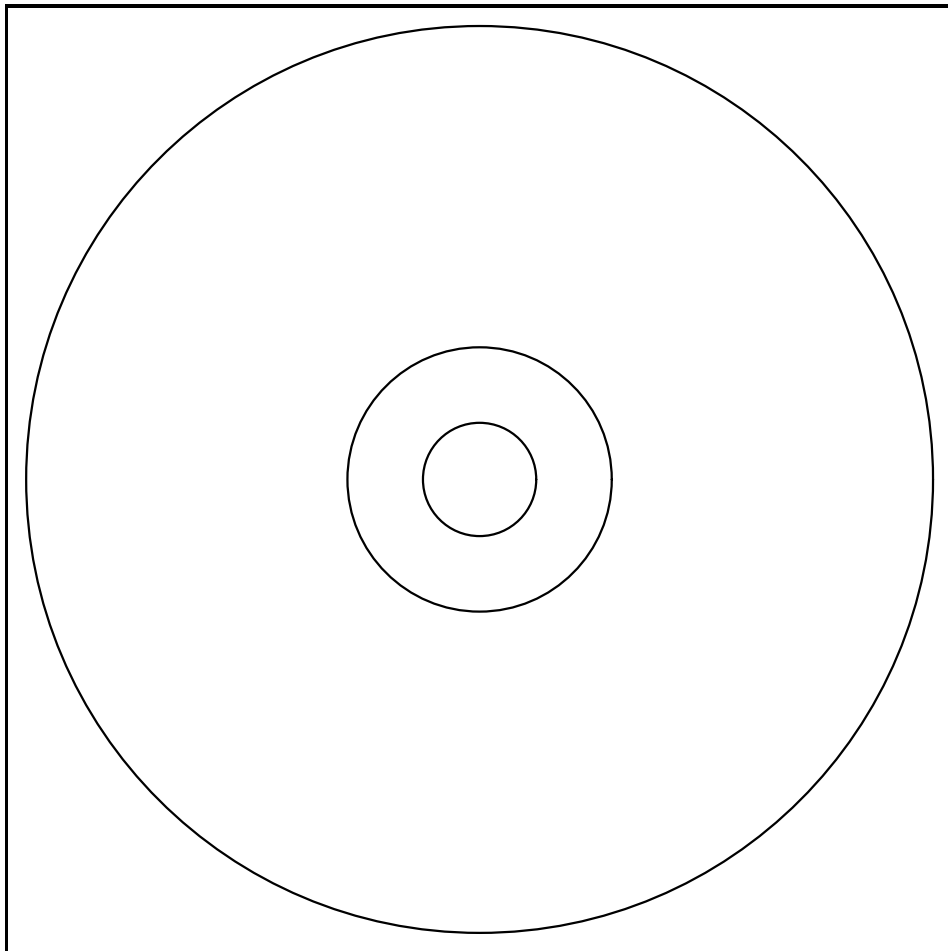
öffentlich zugänglich.

A.1 Die CD-ROM

Die in dieser Arbeit enthaltene CD-ROM beinhaltet alle technischen Voraussetzungen (Software, *MuPAD*-Programme, Dokumentation, etc.), das in der Arbeit beschriebene Tutorium auf einem mit dem Betriebssystem Windows NT ausgestatteten PC zu installieren.¹

¹Natürlich kann der HWIS auf jeder angebotenen Plattform betrieben werden und das Importieren der `.hif`-Datei – auch auf einen schon bestehenden HWIS – ist durch das in den tools enthaltene Programm `hifimport` von den Plattformen Unix/Linux und Windows möglich. Das Tutorium setzt JavaScript-fähige Browser voraus. Die Interaktivität des CA-Systems im *MuPAD*-notebook ist derzeit nur unter Windows 95/98/NT verfügbar.

Dazu gehört als Basis der Hyperwave Information Server 4.1, das CA-System *MuPAD* Pro 1.4.2 – mit jeweils einer 30-Tage Demo-Lizenz, das Tutorium sowohl als interaktive Version mit speziellem Gateway als .hif-Datei zum Import auf den HWIS als auch in Print-Version als PostScript- und pdf-Datei mit den benötigten Readern und einer ausführlichen Installationsanleitung, die im Ordner README als `index.html` vorliegt.



A.2 Bildschirmkopien

Die hier folgenden Bildschirmkopien zeigen die Arbeitsumgebung der interaktiven Lehrinheit "Maschinenlabor Optisch Spannungsanalyse".

In Abbildung A.1 ist die Startseite <http://mm-info.uni-paderborn.de/tutorium> des Tutoriums im Netscape Navigator dargestellt.



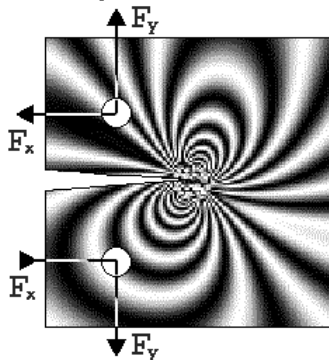
(1/19)

Überblick:

Spannungsoptische Untersuchungen mittels Computeralgebra-Systemen

Innerhalb der experimentellen Methoden besitzen die optischen Verfahren zur Verformungs- und Spannungsanalyse einen hohen Stellenwert, obwohl die Auswertung der gewonnenen optischen Interferenzbildsysteme bei manueller Arbeitsweise sich als sehr aufwendig gestaltet.

Allerdings gestatten heute leistungsstarke Computersysteme diese größtenteils visuellen Informationen in elektronische Daten umzusetzen, zu speichern und weiterzuverarbeiten.



Deshalb ist es so wichtig, die Grundlagen, auf denen die Computerprogramme arbeiten, zu verstehen, selbst Einschätzungen des Sachverhalts abgeben und die Arbeitsweise der Computerprogramme nachvollziehen zu können.

Wenn in diesem Laborversuch auch viel "Handarbeit" zu verrichten ist, ist die digitale Bild- und Informationsverarbeitung ein unerlässliches Instrument für die Realisierung automatischer Prüfsysteme. Denn die Spannungsoptik sowie die schattenoptischen Kaustikmethoden haben in der modernen Materialforschung speziell für bruchmechanische Untersuchungen eine besondere Bedeutung erlangt.

In diesem Laborversuch werden Meßwertgleichungen, die auf der Grundlage bekannter spannungsoptischer Ansätze durch Vermessung der Geometrie von Isochromaten die Bestimmung der Spannungsintensitätsfaktoren zulassen, und die dazu notwendigen mathematischen Verfahren vorgestellt. In dieser interaktiven Version des Tutoriums können eigene Berechnungen mittels des Computeralgebra-Systems MuPAD durchgeführt werden.

Als Modellversuch eignet sich die Untersuchung der Standard-CT-Probe (CT: Compact Tension) besonders gut, weil hierfür der Spannungsintensitätsfaktor K_I in Abhängigkeit von der belastenden Kraft und der Probengeometrie angegeben werden kann.

Umfassende Hinweise zu diesem elektronischen Tutorium finden Sie unter **HILFE** in der Navigationsleiste oben.



Abbildung A.1: Startseite des interaktiven Tutoriums

Der funktionale Bereich oben beinhaltet die vom HWIS zur Verfügung gestellte Funktionalitäten wie Navigation und Suche, während im textuellen Bereich unten die zu vermittelnden Inhalte dargestellt werden.

Abbildung A.2 ist eine Bildschirmkopie und zeigt verschiedene Elemente des interaktiven Tutoriums in eigenen Fenstern: Oben links die Hilfe, oben rechts das Fenster der Fußnoten, in der Mitte links die Animation “Polarisiertes Licht”, unten links ein Verweis auf eine früher hergeleitete Formel und rechts unten die Arbeitsumgebung im Browser-Fenster.

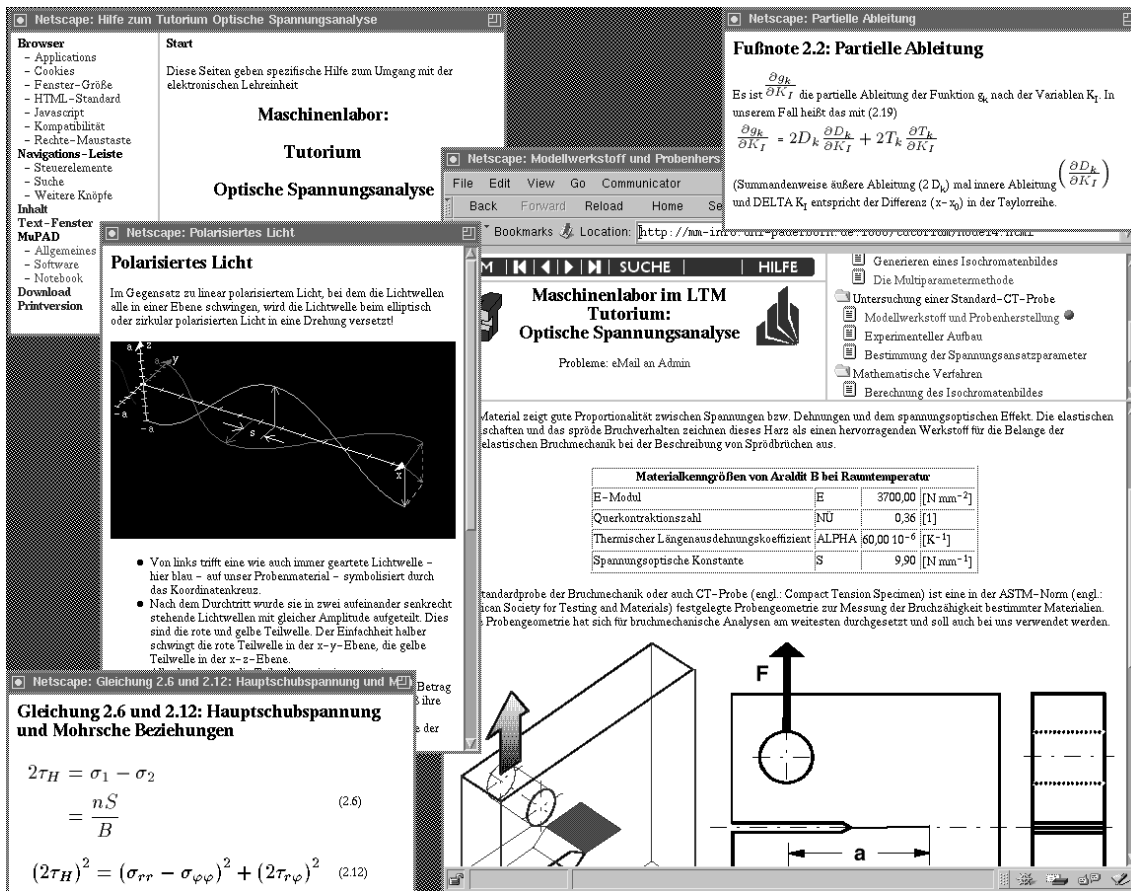


Abbildung A.2: Bildschirmkopie des interaktiven Tutoriums mit ausgewählten Funktionen

Abbildung A.3 auf der folgenden Seite zeigt das *MuPAD*-notebook zur Berechnung eines Isochromatenbildes zu vorgegeben Spannungsintensitätsparametern.

MuPAD Pro - [isochromatenbild.mnb]

Datei Bearbeiten Suchen Notebook Ansicht Fenster Hilfe

Berechnung eines Isochromatenbildes zu vorgegebenen Parametern

Dieses Notebook berechnet zu den Werten **K1**, **K2** und **sigma0x** das Isochromatenbild. Zuerst werden feststehende **Parameter und der mathematische Algorithmus eingelesen**. Jede mit einem roten Punkt • markierte Eingabe mit Shift-RETURN bestätigen!

- `read("C:\\Temp\\init.mu"):`

Die Prozeduren wurden eingelesen!

Welche **Auflösung** soll für das Isochromatenbild gewählt werden?
Rechenzeit bei aufloesung = 60 ca. 40 Sek., bei aufloesung = 90 ca. 90 Sek.

- `aufloesung:=90;`

90

Folgende **Parameter können kombiniert** werden. Es handelt sich um den **3 Parameter-Ansatz**. **K1** stellt Normalspannungs-, **K2** Schubspannungsanteile und **sigma0x** die Fernfeldspannung dar. Der Einfachheit halber wird in diesem Beispiel auf Terme höherer Ordnung verzichtet (**a3**, **b3**, **a4** etc.) Sinnvolle Bereiche sind für **K1**=[10 .. 20], **K2**=[2 .. 12] und **sigma0x**=[0.1 .. 0.01].

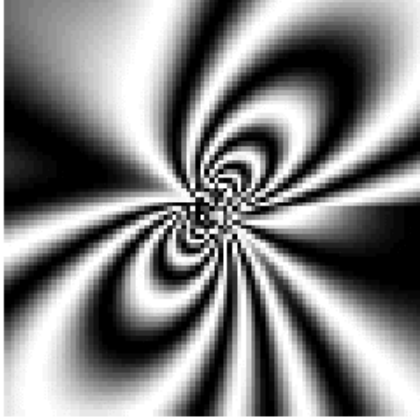
- `k1:=14;`
- `k2:=4;`
- `sigma0x:=0.04;`

14
4
0.04

Die **Prozedur generiere** berechnet für das Bildfeld der Größe `aufloesung x aufloesung` Pixel die **Helligkeitsverteilung des Isochromatenbildes**. Dazu werden für jeden Bildpunkt die karthesischen Koordinaten in Polarkoordinaten umgewandelt, die Spannungsfunktionsansätze ausgewertet und die Helligkeit errechnet. Zum Schluß wird das Bild aus den Daten generiert.

- `generiere():`

Isochromatenbild fuer: k1 = 14, k2 = 4, sigma0x = 0.0400000000



Berechnung gestartet.
Die Haelfte der Bildpunkte wurde berechnet!
Das Isochromatenbild wird generiert.

Abbildung A.3: MuPAD-notebook des interaktiven Tutoriums

Anhang B

Dynamische Module

Das in [5] und [6] beschriebene Konzept der dynamischen Module zur Integration von externen Software-Paketen in interaktive CA-Systeme und die Implementation für *MuPAD* wurden in dieser Arbeit zur numerischen Berechnung von Isochromatenbildern eingesetzt.

Dazu wurde ein C++-Programm entsprechend den Konventionen des *MuPAD Application Programming Interface* (MAPI) erweitert [5, Kapitel 6]. Der `.cpp`-Quellcode wurde mit dem in der *MuPAD*-Distribution enthaltenen *MuPAD Modul Generator* `mmg` zu einem *MuPAD dynamic module* (`.mdm`) übersetzt [5, Kapitel 5]. Dieses kann durch den Befehl `module(modul_name)`; in eine *MuPAD*-Sitzung eingeladen werden.

B.1 Einsatz von dynamischen Modulen beim Berechnen von Isochromatenbildern

Zum numerischen Berechnen von Isochromatenbildern auf Grundlage der analytischen mathematischen Beziehungen dient das folgende *MuPAD*-script und *MuPAD*-module. Es baut weitgehend auf den Beziehungen (1.16) und (1.11)-(1.13) (Seite 16 bzw. 15) auf.

Die so berechneten Isochromatenbilder finden sowohl im interaktiven Tutorium als auch in dieser Arbeit Verwendung.

Gleichzeitig werden Datensätze zu den Isochromatenbildern generiert, die Informationen enthalten über Punkte zum Aufstellen des überbestimmten Gleichungssystems, um aus vorgegebenem Isochromatenbild die Spannungsansatzparameter zu berechnen (Verfahren siehe Kapitel 1.4 ab Seite 20 und Gleichungssystem (1.23) auf Seite 22).

Im *MuPAD*-script (Abschnitt B.1.1) werden zu einer *aufloesung* die Werte der Spannungsintensitätsparameter k_1, \dots, b_4 und ein *kriterium* vorgegeben. Das *kriterium* gibt die Genauigkeit an, welche die Punkte für das Gleichungssystem erfüllen müssen¹. Danach wird die Anzahl der Gleichungen festgestellt, die Bilddaten generiert – wobei Punkte für das Gleichungssystem rot dargestellt werden, die Datenmatrix *B* geschrieben und das Isochromatenbild gezeichnet.

Das Modul *geda_full_proc*² (Abschnitt B.1.2) berechnet die Datenmatrix *A*, welche die Helligkeitsverteilung des Isochromatenbildes und die Tripel (*r*, *Phi*, *n*) enthält. Dabei können später aus den Tripeln ein Gleichungssystem aufgebaut werden. Hierbei sind *r* der Radius, *Phi* der Winkel und *n* die Isochromatenordnung.

B.1.1 Das *MuPAD*-script

```
module(geda_full_proc):

WRITE_PATH="/home/jagger/diplom/linux/teil_3/daten":

//dichtes Bild bei 82, VCam auf 640x480 Pixel
aufloesung:=100:
k1:=25:
k2:=-7:
sigma0x:=0.1:
a3:=0.01:
a4:=0.04:
b3:=0.009:
b4:=0.007:
kriterium:=0.000007:

counter:=0:

A:=geda_full_proc(aufloesung, float(k1), float(k2), float(sigma0x), float(a3),
float(a4), float(b3), float(b4), float(kriterium)):
```

¹Für das Gleichungssystem werden zum Beispiel Punkte von den Mittellinien der Isochromatenschleifen ausgewählt. Diese weisen eine ganzzahlige Isochromatenordnung auf. Da sich beim numerischen Generieren des Isochromatenbildes leichte Abweichungen von ganzzahligen Werten ergeben, muß ein gewisser Toleranzbereich eingeräumt werden. Dies geschieht durch den – nicht zu groß gewählten – Wert *kriterium*, der die Anzahl der Punkte und damit die Größe des Gleichungssystems beeinflusst.

²Hierbei stehen *geda* für *generiere daten* und *full* für die Verwendung aller sieben Spannungsintensitätsparameter $K_I, K_{II}, \sigma_{0x}, a_3, a_4, b_3, b_4$ sowie der Parameter I_1, I_2, b und s .

```

for i from 1 to aufloesung do
  for j from 1 to aufloesung do
    if A[i,j,1]<kriterium and A[i,j,1]<>0.0 then
      counter:=counter+1:
    end_if:
  end_for:
end_for:

B:=array(1..counter, 1..3):
C:=array(1..aufloesung, 1..aufloesung, 1..2):

k:=1:

for i from 1 to aufloesung do
  for j from 1 to aufloesung do
    if A[i,j,1]<kriterium and A[i,j,1]<>0.0 then
      B[k,1]:=A[i,j,2]:
      B[k,2]:=A[i,j,3]:
      B[k,3]:=round(A[i,j,4]):
      k:=k+1:
      C[i,j,1]:=1.0:
      C[i,j,2]:=0.0:
    else
      C[i,j,1]:=A[i,j,1]:
      C[i,j,2]:=A[i,j,1]:
    end_if:
  end_for:
end_for:

dateiname:="aa".expr2text(counter)."_" .expr2text(k1)."_" .expr2text(k2)."_"
      .expr2text(sigma0x)."_" .expr2text(a3)."_" .expr2text(a4)."_"
      .expr2text(b3)."_" .expr2text(b4)."_" .expr2text(aufloesung)." .mu":
write(Text, dateiname, B):
print(Unquoted,"Tripel-Matrix geschrieben! Name: ".dateiname);

print(Unquoted,"Das ueberbestimmte GS hat ".expr2text(counter)." Gleichungen!");

print(Unquoted,"Ich generiere die Punkteliste ...");

liste:=[(point(ii,jj,Colors=[C[ii,jj,1],C[ii,jj,2],C[ii,jj,2]])
  $ jj=1..aufloesung ) $ ii=1..aufloesung]:
print(Unquoted,"Fertig. Ich zeichne das Bild ...");

plot2d(Scaling=Constrained, Axes=None, [Mode=List, liste]);

```

B.1.2 Das *MuPAD*-module

```

#include <stdio.h>
#include <math.h>

// Erzeugen des MuPAD Dynamic Module (.mdm) mit dem MuPAD Modul
// Generator (mmg) (-v: verbose mode):
//     mmg -v geda_full_proc.cpp
// ==> geda_full_proc.mdm
// Im MuPAD-Programm wird das Modul eingebunden mit:
//     module(geda_full_proc);
// Informationen über das geladenen Modul lassen sich anzeigen mit:
//     info(geda_full_proc);
// Aufruf und Zuweisung im MuPAD-Programm mit:
// A:=geda_full_proc(aufloesung, float(k1), float(k2), float(sigma0x),
//                   float(a3), float(a4), float(b3), float(b4),
//                   float(kriterium)):
//
// -----
// Hans Dietmar Jäger (jagger@uni-paderborn.de), Januar/Februar 1999
// -----
// Die Koordinatentripel werden in der Matrix A gespeichert
// Diese kann in einem MuPAD-notebook oder -Programm eingelesen
// werden.
// -----

// main( int argc, char *argv[] )
MFUNC( new, MCnop )
{
    MFnargsCheck(9);
    MFargCheck(1,DOM_INT);
    MFargCheck(2,DOM_FLOAT);
    MFargCheck(3,DOM_FLOAT);
    MFargCheck(4,DOM_FLOAT);
    MFargCheck(5,DOM_FLOAT);
    MFargCheck(6,DOM_FLOAT);
    MFargCheck(7,DOM_FLOAT);
    MFargCheck(8,DOM_FLOAT);
    MFargCheck(9,DOM_FLOAT);

    long   i1=0;
    long   i2=1;
    long   abmessung=20;
    long   aufloesung=MFlong(MFarg(1)); // 61;

```

```

double b=1;
double s=1;
double skalierung=((double)abmessung)/(double)aufloesung;
double k1=MFdouble(MFarg(2)); // 25.0;
double k2=MFdouble(MFarg(3)); // 7.0;
double sigma0x=MFdouble(MFarg(4)); // 0.001;
double a3=MFdouble(MFarg(5)); // 0.001;
double a4=MFdouble(MFarg(6)); // 0.001;
double b3=MFdouble(MFarg(7)); // 0.001;
double b4=MFdouble(MFarg(8)); // 0.001;
double kriterium=MFdouble(MFarg(9)); // 0.00001;

if( aufloesung > 256 ) {
    MError("aufloesung zu gross");
}

long counter=0;
double A[257][257][4];
double xd, yd, r, Phi, n, sigmarr, sigmaphi, taurphi;
double zwerg1,zwerg2,zwerg3,zwerg4,zwerg5,zwerg6,zwerg7,zwerg8,zwerg9
double zwerg10,zwerg11, zwerg12, zwerg13, zwerg14, zwerg15, zwerg16, zwerg17;
double aufloesunghalbe= aufloesung/2.0;
double FPI=3.1415926535897932384;

for( long y=1; y<=aufloesung; y++ ) {
    for( long x=1; x<=aufloesung; x++ ) {
        if( (double)x == aufloesunghalbe ) {
            r=fabs(y-aufloesunghalbe)*skalierung;
            if ( (double)y > aufloesunghalbe ) Phi=FPI/2.0;
            else if ( (double)y < aufloesunghalbe ) Phi=3.0*FPI/2.0;
            else { A[x][y][1]=0.0; continue; }
        } else {
            xd=x-aufloesunghalbe;
            yd=y-aufloesunghalbe;
            r=sqrt(xd*xd+yd*yd)*skalierung;
            if ( (double)x < aufloesunghalbe ) Phi=atan(yd/xd)+FPI;
            else if ( (double)y >= aufloesunghalbe ) Phi=atan(yd/xd);
            else Phi=atan(yd/xd)+2.0*FPI;
        }
        // MFprintf("r=%lf, Phi=%lf\n", r, Phi );
        zwerg1=k1/sqrt(2*FPI*r)/4.0;
        zwerg2=k2/sqrt(2*FPI*r)/4.0;
        zwerg4=Phi/2.0;
    }
}

```

```

        zwerg5=1.5*Phi;
        zwerg8=sin(zwerg4);
        zwerg9=sin(zwerg5);
        zwerg10=cos(zwerg4);
        zwerg11=cos(zwerg5);

if (k1 != 0.0) {
    zwerg1=k1/sqrt(32.0*FPI*r);
    sigmarr=sigmarr + zwerg1 * (5.0*zwerg10-zwerg11);
    sigmaphiphi=sigmaphiphi + zwerg1 * (3.0*zwerg10+zwerg11);
    taurphi=taurphi + zwerg1 * (zwerg8+zwerg9);
}

if (k2 != 0.0) {
    zwerg2=k2/sqrt(32.0*FPI*r);
    sigmarr=sigmarr + zwerg2 * (-5.0*zwerg8+3.0*zwerg9);
    sigmaphiphi=sigmaphiphi - zwerg2 * (3.0*zwerg8+3.0*zwerg9);
    taurphi=taurphi + zwerg2 * (zwerg10+3.0*zwerg11);
}

if (sigma0x != 0.0) {
    sigmarr=sigmarr - sigma0x*pow(cos(Phi), 2.0);
    sigmaphiphi=sigmaphiphi - sigma0x*pow(sin(Phi), 2.0);
    taurphi=taurphi + sigma0x/2.0*sin(2.0*Phi);
}

if (a3 != 0.0) {
    zwerg3=sqrt(r)*a3/4.0;
    zwerg6=2.5*Phi;
    sigmarr=sigmarr + zwerg3 * (3.0*zwerg10+cos(zwerg6));
    sigmaphiphi=sigmaphiphi + zwerg3 * (5.0*zwerg10-cos(zwerg6));
    taurphi=taurphi + zwerg3 * (zwerg8-sin(zwerg6));
}

if (a4 != 0.0) {
    zwerg7=3.0*Phi;
    zwerg12=r*a4;
    sigmarr=sigmarr + zwerg12 * (cos(Phi)+3.0*cos(zwerg7));
    sigmaphiphi=sigmaphiphi + 3.0*zwerg12 * (cos(Phi)-cos(zwerg7));
    taurphi=taurphi + zwerg12 * (sin(Phi)-3.0*sin(zwerg7));
}

if (b3 != 0.0) {
    zwerg13=sqrt(r)*b3/4.0;
    zwerg14=15.0*sin(2.5*Phi);

```

```

    sigmarr=sigmarr - zwerg13 * (9.0*sin(Phi/2.0)+zwerg14);
    sigmaphiphi=sigmaphiphi - zwerg13 * (15.0*sin(Phi/2.0)-zwerg14);
    taurphi=taurphi + 3.0*zwerg13 * (cos(Phi/2.0)-5.0*cos(2.5*Phi));
}

if (b4 != 0.0) {
    zwerg15=3.0*Phi;
    zwerg16=sin(zwerg15);
    zwerg17=sin(Phi);
    sigmarr=sigmarr - 2.0*r*b4*(zwerg17+zwerg16);
    sigmaphiphi=sigmaphiphi - 3.0*r*b4*(1.25*zwerg17-5.0/12.0*zwerg16);
    taurphi=taurphi + 2.0*r*b4*(cos(Phi)-cos(zwerg15));
}

if (i1 != 0.0 || i2 != 1.0) {
    A[x][y][1]=i1+i2*pow(sin(FPI*2.0*b/s*sqrt(pow((sigmarr-sigmaphiphi)
        /2.0,2.0)+pow(taurphi,2.0))),2.0);
} else {
    A[x][y][1]=pow(sin(FPI*2.0*b/s*sqrt(pow((sigmarr-sigmaphiphi)
        /2.0,2.0)+pow(taurphi,2.0))),2.0);
}

    // MFprintf( "A[%ld,%ld]=%lf\n", x, y, A[x][y] );
A[x][y][2]=r;
A[x][y][3]=Phi;
A[x][y][4]=2.0*b/s*sqrt(pow((sigmarr-sigmaphiphi)/2.0,2.0)+pow(taurphi,2.0));
sigmarr=0.0; sigmaphiphi=0.0; taurphi=0;
}
}
MTcell list = MFnewList(aufloesung);
for( long j=1; j<=aufloesung; j++ ) {
    MTcell tmp = MFnewList(aufloesung);
    for( long i=1; i<=aufloesung; i++ ) {
        MTcell part = MFnewList(4);
        for( long k=1; k<=4; k++ ) {
            MFsetList( &part, k-1, MFdouble(A[j][i][k]) );
        }
        MFsig(part);
        MFsetList( &tmp, i-1, part );
    }
    MFsig(tmp);
    MFsetList( &list, j-1, tmp );
}
MFsig(list);
MTcell array= MFlist2array( list, aufloesung, aufloesung, 4 );
MFfree( list );
MFreturn(array);
} MFEND

```

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | Belastete Probe im Polariskop mit resultierendem Isochromatenbild | 4 |
| 1.1 | Belastete Probe im Polariskop | 13 |
| 1.2 | Geometrie des geraden Risses der zweidimensionalen (ebenen) Probe | 13 |
| 1.3 | Schematischer Programmablauf | 16 |
| 1.4 | Koordinaten(-systeme) und Variablen bei den Berechnungen | 17 |
| 1.5 | Schematischer Programmablauf | 25 |
| 3.1 | Dialog “Änderungen speichern?” | 44 |
| 3.2 | Dialog “Sie verlassen das Programm.” | 44 |
| 4.1 | Standbilder der Animation “Zirkular polarisiertes Licht” | 59 |
| 4.2 | Server - Gateway - Client | 63 |
| 4.3 | Standard-Gateway des HWIS | 63 |
| 4.4 | Gateway des Tutoriums | 63 |
| 4.5 | Funktionaler Bereich nach Aktivierung der Suche und Eingabe des Suchbegriffs | 64 |
| 4.6 | Funktionaler Bereich mit Darstellung der Suchergebnisse | 65 |
| A.1 | Startseite des interaktiven Tutoriums | 78 |
| A.2 | Bildschirmkopie des interaktiven Tutoriums mit ausgewählten Funktionen | 79 |
| A.3 | <i>MuPAD</i> -notebook des interaktiven Tutoriums | 80 |

Literaturverzeichnis

- [1] *DIN/EN_9241: Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten - Teil 1-17.* Berlin, unterschiedliche Erscheinungsdaten. http://mm-info.uni-paderborn.de/hyperskript/basis/normen/iso_9241-10/ISO_9241_Teil_10.html.
- [2] A. A. Griffith. The phenomens of rupture and flow a solids. *Phil. Trans. Roy. Soc. Ser. A 221*, pages 163 – 198, London, 1921.
- [3] A. A. Griffith. The theory of rupture. *Proc. 1st. Int. Congr. of Appl. Mech.*, pages 55 – 93, Delft, 1924.
- [4] Andreas Brennecke, Reinhard Keil-Slawik und Werner Roth. *Designorientierung und Designpraxis - Entwicklung und Einsatz von konstruktiven Gestaltungskriterien.* Heinz Nixdorf Institut, Universität-GH Paderborn, 1999.
- [5] Andreas Sorgatz. *Dynamic Modules – User’s Manual and Programming Guide for MuPAD 1.4.* Springer-Verlag Heidelberg, October 1998. ISBN 3-540-65043-1, about 240 pages, with CD-ROM including MuPAD and module demos and C/C++ sources. Refer to the web site <http://www.mupad.de/~andi/Pub/Intro/sor98.shtml>.
- [6] Andreas Sorgatz. *Dynamic Modules – Software Integration in Interactive General Purpose Computer Algebra Systems.* Dissertation, Fachbereich Mathematik-Informatik, June 1999. andi@uni-paderborn.de.
- [7] B. Shneiderman. Education by engagement and construction: Experiences in the AT&T teaching theater. In H. Maurer (editor) *Educational multimedia and hypermedia, Proceedings of EDMEDIA 93*, pages 471 – 479, Charlottesville (VA), 1993. Association for the Advancement of Computing in Education.
- [8] B. Weidenmann. *Information und Lernen mit Multimedia*, Kapitel Multico-dierung und Multimodalität im Lernprozeß, Seite 65 – 84. L. J. Issing und P. Klimsa, Weinheim: Psychologie-Verlags-Union, 1995.

- [9] Chuck Musciano and Bill Kennedy. *HTML The Definitive Guide*. O'Reilly, Sebastopol, CA, 3rd edition, 1998.
- [10] E. Macherauch. *Bruchmechanik in: Grundlagen des Festigkeits- und Bruchverhaltens*. Verlag Stahleisen M. B. H., Düsseldorf, 1974.
- [11] Ferber and Müller. *Technische Mechanik, Statik – Festigkeitslehre*. Fachbuchverlag Leipzig. CD-ROM, ISBN 3-446-19533-5.
- [12] H. Blumenauer und G. Punsch. *Bruchmechanik, Grundlagen, Prüfmethode, Anwendungsbeispiele*. Leipzig, 1973.
- [13] H. G. Hahn. *Bruchmechanik*. Teubner Studienbücher, Stuttgart, 1976.
- [14] H. P. Rossmannith (Hrsg.). *Grundlagen der Bruchmechanik*. Springer Verlag, Wien/New York, 1982.
- [15] Heinz Rutishauser. *Vorlesungen über numerische Mathematik*, Band 1. Birkhäuser Verlag, Basel, Stuttgart, 1976.
- [16] Hermann Maurer. *Hyper-G now Hyperwave, The Next Generation Web Solution*. Addison-Wesley Publishing Company, Harlow, Essex, England, 1996.
- [17] Hyperwave Information Server. *The Hyperwave Advantage*. Hyperwave Information Management GmbH. CD-ROM, Copyright ©1996 - 1997, Version 2.1.
- [18] I. S. Beresin und N. P. Shidkow. *Numerische Methoden 1*, Band 70. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1970.
- [19] J. Hasebrook and M. Gremm. *Multimedia for vocational guidance: Effects of individualized testing, videos, and photography on acceptance and recall*. *Journal of Educational Multimedia and Hypermedia*, Im Druck.
- [20] J. P. Hasebrook. *Lernen mit Multimedia*. *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, 9(2) Seite 95 – 103, 1995.
- [21] J. P. Hasebrook. *Multimedia-Psychologie*. Heidelberg, 1995.
- [22] J. P. Hasebrook. *Exploring Electronic Media and the Human Mind – a Web-Based Training Module*. Technical report, Bankakademie e. V., Oeder Weg 16-18, D-60318 Frankfurt/Main (Germany), 1999. URL: <http://www.bankakademie.de>, email: hasebrook@bankakademie.de.

- [23] U. Glowalla and J. Hasebrook. *Hypermedia user interface design*, chapter An evaluation model based on experimental methods applied to the design of hypermedia user interfaces. Springer, New York, 1995.
- [24] Jeff Conklin. Hypertext: An introduction and survey. *Computer*, 20(9), pages 17 – 41, September 1987.
- [25] J. W. Dally and R. J. Sanford. Classification of stress-intensity factors from isochromatic-fringe patterns. *Experimental Mechanics*, pages 441–448, 1978.
- [26] K. Heckel. *Einführung in die technische Anwendung der Bruchmechanik*. 2. Auflage, Hanser Verlag, München/Wien, 1983.
- [27] K. Kiyek und F. Schwarz. *Mathematik für Informatiker 1*. B. G. Teubner, Stuttgart, 1991.
- [28] Maple V Release 5.1, 1999. <http://www.maplesoft.com/maplevr5.html>.
- [29] MathSoft. Mathcad 8. <http://www.mathsoft.com/mathcad/>.
- [30] Matthias Moser. *Hyperwave PLACE Workshop*. Hyperwave Information Management GmbH, Stefan-George-Ring 19, D-81929 München, document version 1.0 edition, November 1998.
- [31] M. L. Williams. Stress Singularities Resulting From Various Boundary Conditions in Angular Corners of Plates in Extension. *Journal of Applied Mechanics*, Trans. ASME, vol. 74, 1952, p. 526.
- [32] M. L. Williams. On the Stress Distribution at the Base of a Stationary Crack. *Journal of Applied Mechanics*, pages 109–114, March 1957.
- [33] R. E. Mayer and R. B. Anderson. The instructive animation: Helping students build connections between words and pictures in multimedia learning. *Journal of Educational Psychology*, 84(4), pages 444 – 452, 1992.
- [34] Reinhard Keil-Slawik. Vorlesung Software Ergonomie. Arbeitsgruppe Informatik und Gesellschaft, Universität-GH Paderborn, 1999.
- [35] Reinhard Keil-Slawik und Harald Selke. Kompetenzentwicklung '98. Arbeitsgemeinschaft Qualifikations-Entwicklungs-Management Berlin. – Münster; New York; München; Berlin: Waxmann, 1998.
- [36] SciFace Software, Technologiepark 12, D-33100 Paderborn, Germany. MuPAD - The Open Computer Algebra System. Refer to the web site <http://www.sciface.com>.

- [37] The MuPAD Group, Benno Fuchssteiner et al. *MuPAD User's Manual - MuPAD Version 1.2.2*. John Wiley and sons, Chichester, New York, first edition, march 1996. Includes a CD for Apple Macintosh and UNIX.
- [38] W. Metzger. *Wahrnehmung und Bewußtsein. Handbuch der Psychologie*, Band 1/I, Kapitel Figuralwahrnehmung. H. Erke, Göttingen, 1966.
- [39] W3C's Math Home Page, Dezember 1998. <http://www.w3.org/Math/>.
- [40] W3C. Mathematical markup language (mathml[tm]) 1.01 specification, July 1999. <http://www.w3.org/TR/REC-MathML/>.
- [41] W3C World Wide Web Consortium, 1999. <http://www.w3.org/>.
- [42] W3C. XML: Entwicklung, 1999. <http://www.w3.org/TR/xhtml11/>.
- [43] XML: Einführung, 1998. <http://www.xml.org/xml/pub/98/10/guide1.html>.

Hiermit erkläre ich, daß ich die vorliegende Arbeit selbständig verfaßt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Paderborn, den 13. Oktober 1999

Teil II