

# ALADIN

T. Kremer

Analysis of Laminates Disturbed by Notches –

Ein Programm zur Analyse von Ausschnitten in Laminaten



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

KLuB

Konstruktiver  
Leichtbau und  
Bauweisen

## Vorwort

ALADIN ist keine gezielte Programmentwicklung. Es ist aus einer Vielzahl von kleineren Unterprogrammen entstanden, die ich im Laufe meiner Arbeit am Fachgebiet KLuB erstellt habe. Gerade die Routinen zur Darstellung der Bruchkörper haben keinen unmittelbaren Bezug zu Laminaten mit Ausschnitten. Sie haben sich jedoch für einen großen Anwenderkreis als hilfreich erwiesen und wurden daher in ALADIN aufgenommen.

Vor diesem Hintergrund wird verständlich, dass ALADIN – zum Beispiel bezüglich der Bedienfreundlichkeit – nicht mit Programmen konkurrieren kann, die „aus einem Guss“ entstanden sind. Auch sind Möglichkeiten zur Fehlbedienung teilweise nicht abgefangen. Dennoch hoffe ich, dass diese Anwendung dazu beitragen kann, das Verständnis des Spannungszustands an Ausschnitten in Faser-Kunststoff-Verbunden zu steigern.

Die Anwendung ist nicht für Einsteiger in das Thema Faser-Kunststoff-Verbunde gedacht. Für die Bedienung des Programms werden Kenntnisse in der klassischen Laminattheorie sowie der schichtenweisen Bruchanalyse vorausgesetzt.

*Darmstadt, Dezember 2007  
Tobias Kremer*

Dieses Programm ist freie Software. Sie können es unter den Bedingungen der GNU General Public License, wie von der Free Software Foundation veröffentlicht, weitergeben und/oder modifizieren, entweder gemäß Version 2 der Lizenz oder (nach Ihrer Option) jeder späteren Version.

Die Veröffentlichung dieses Programms erfolgt in der Hoffnung, daß es Ihnen von Nutzen sein wird, aber OHNE IRGENDNEINE GARANTIE, sogar ohne die implizite Garantie der MARKTREIFE oder der VERWENDBARKEIT FÜR EINEN BESTIMMTEN ZWECK. Details finden Sie in der GNU General Public License.

Sie sollten ein Exemplar der GNU General Public License zusammen mit diesem Programm erhalten haben. Falls nicht, schreiben Sie an die Free Software Foundation, Inc., 51 Franklin St, Fifth Floor, Boston, MA 02110, USA.

Copyright (C) 2007, Tobias Kremer

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Funktionsumfang</b>	<b>5</b>
1.1	Ausgabegrößen . . . . .	5
1.2	Annahmen . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Beschreibung der Oberfläche</b>	<b>7</b>
2.1	Bereich „Schichteigenschaften“ . . . . .	7
2.2	Bereich „Laminataufbau“ . . . . .	7
2.3	Bereich „Ausschnitt“ . . . . .	8
2.4	Bereich „Belastungen“ . . . . .	8
2.5	Bereich „Ausgaben“ . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Anwendung</b>	<b>9</b>
3.1	UD-Schicht erstellen . . . . .	9
3.1.1	Elastizitätskennwerte . . . . .	9
3.1.2	Festigkeitskennwerte . . . . .	10
3.2	Faser- und Matrixkennwerte definieren . . . . .	11
3.2.1	Faserkennwerte . . . . .	12
3.2.2	Matrixkennwerte . . . . .	12
3.3	Ausschnitt erstellen . . . . .	12
3.4	Berechnungsbericht anfordern . . . . .	13
3.5	Optionen der Berechnung . . . . .	13
3.5.1	Diskretisierung des Ausschnittsrandes . . . . .	14
3.5.2	Suche der Bruchebene . . . . .	14
3.6	Projektdaten laden und speichern . . . . .	14
3.6.1	Laden . . . . .	15
3.6.2	Speichern . . . . .	16
<b>4</b>	<b>Installation</b>	<b>16</b>
4.1	Notwendige Dateien . . . . .	16
4.2	Zusätzlich erzeugte Dateien . . . . .	17

<b>5</b>	<b>Für Entwickler</b>	<b>17</b>
5.1	Daten der Einzelschicht . . . . .	17
5.2	Daten der Faser . . . . .	17
5.3	Daten der Matrix . . . . .	18
5.4	Daten der Ausschnitte . . . . .	18
5.5	PDF-Bericht . . . . .	18

**Kontakt:**

TU Darmstadt  
 Fachgebiet Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen  
 Prof. Dr.-Ing. Helmut Schürmann  
 Petersenstraße 30  
 64287 Darmstadt  
 Tel.: +49 6151 16-6532  
 Fax: +49 6151 16-3260  
 aladin@klub.tu-darmstadt.de

# 1 Funktionsumfang

ALADIN ist ein Programm zur Analyse des Randspannungszustands an beliebig Ausschnitten in geschichteten Laminaten unter einer ebenen Belastung.

Eine Beschreibung der Theorie, auf der ALADIN basiert, erfolgt hier nicht. Sie wird in [Kre07] ausführlich erläutert. Aspekte der Versagensanalyse und der Modellierung der Verbundeigenschaften – insbesondere der klassischen Laminattheorie – können in [Sch07] und der VDI-Richtlinie 2014 nachgeschlagen werden.

ALADIN ist ein Programm, das für Benutzer erstellt wurde, die Grundkenntnisse der Mechanik der Faser-Kunststoff-Verbunde haben. Vermutlich wird ein Anwender ohne Vorkenntnisse nicht in der Lage sein, die Berechnungsergebnisse richtig zu deuten.

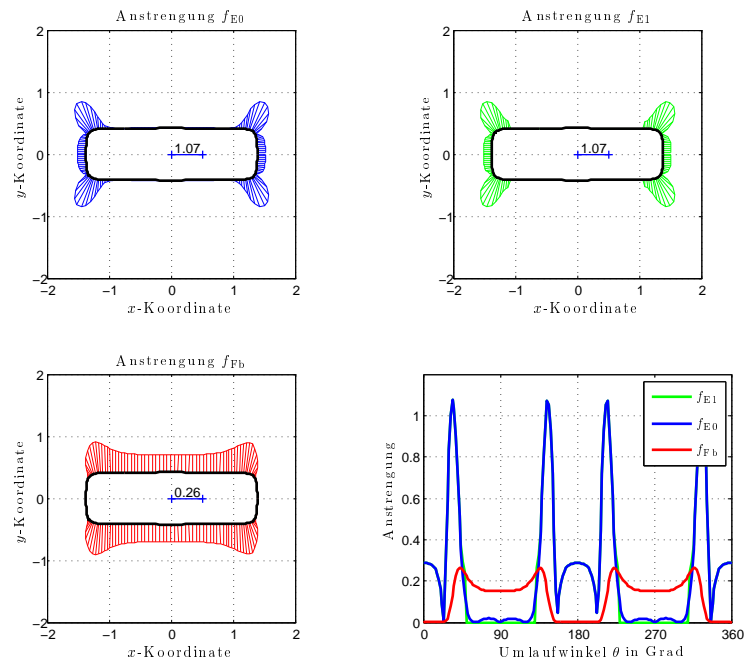
## 1.1 Ausgabegrößen

ALADIN gibt die Berechnungsergebnisse in Form von Diagrammen und einer Ergebnistabelle aus. In der Diagrammform wird die Ergebnisgröße jeweils über dem Ausschnitttrand sowie dem Umlaufwinkel dargestellt. Die nachfolgenden Ergebnisgrößen können in Diagrammform ausgegeben werden:

- Anstrengungen (siehe Abbildung 1)
  - Zwischenfaserbruch-Anstrengung  $f_{E0}$  ohne Einfluss der faserparallelen Spannung
  - Zwischenfaserbruch-Anstrengung  $f_{E1}$  mit Einfluss der faserparallelen Spannung
  - Faserbruch-Anstrengung  $f_{Fb}$
- Spannungen
  - Spannungen der Einzelschicht  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  und  $\tau_{21}$  im Schicht-Koordinatensystem
  - Globale Spannungen  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  und  $\tau_{xy}$  des Verbunds im Verbund-Koordinatensystem

In Tabellenform (siehe Abbildung 2):

- Versagensrelevante Schicht, Ort des Versagens sowie der Versagensmodus
- Globaler Formfaktor sowie lokaler, schichtenweiser Formfaktor
- Aus Verschiebungs-Randbedingungen resultierende Schnittlasten
- Beanspruchung im ungestörten Laminatbereich einschließlich der versagensrelevanten Schicht im ungestörten Bereich



**Abbildung 1:** Ausgabe der Anstrengungsverteilung um ein Langloch unter einaxialem Zug

## 1.2 Annahmen

Die folgende Auflistung gibt eine Übersicht über die im Rahmen der verwendeten Theorien gemachten Annahmen.

Elastizitätsgesetz:

- Ideal linear elastisches Werkstoffverhalten
- Ebenes Werkstoffgesetz der Einzelschicht sowie des Verbunds  $\rightarrow$  ebener Spannungszustand
- Transversal isotropes Werkstoffgesetz der Einzelschicht
- Reine Scheibenbelastung, keine Biegungs-Dehnungs-Koppelungen

Geometrie, Verformungen:

- Lineare Theorie, kleine Verformungen
- Unendlich ausgedehnte Scheibe
- Alle Querschnitte bleiben eben  $\rightarrow$  keine Laminatrandeffekte  $\rightarrow$  keine interlaminaren Schubspannungen

Versagen:

- Anstrengungsberechnung nach VDI-Richtlinie 2014

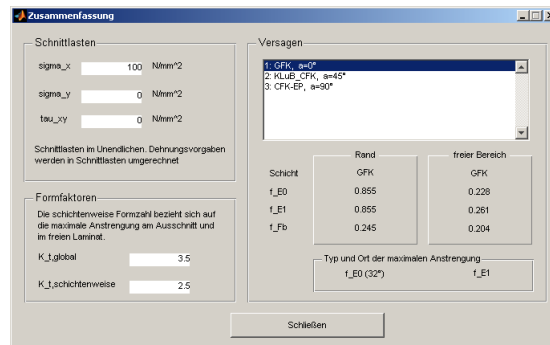


Abbildung 2: Ergebnistabelle für einen mehrschichtigen Verbund

- Iterative Suche der Bruchebene in jeder Schicht (*keine* vereinfachte Berechnung für den ebenen Spannungszustand nach Modus A, B und C)
- Keine Degradation

## 2 Beschreibung der Oberfläche

### 2.1 Bereich „Schichteigenschaften“

In diesem Bereich können die Eigenschaften einer Einzelschicht (UD-Schicht) – zur anschließenden Verwendung im Laminataufbau – zusammengestellt werden. Die Eigenschaften einer Schicht bestehen aus:

- Elastizitätsgesetz der **Einzelschicht**, bezeichnet durch den Name des Einzelschicht
- **Dicke** der Schicht im Millimeter
- Orientierung der Schicht gegenüber der  $x$ -Achse in Grad, dem so genannten Faser-**Winkel**

Der Knopf **Verwenden** überträgt die so definierte Schicht in den Laminataufbau.

**Tip:** Schichtdicken müssen positiv sein, der Schichtwinkel bezieht sich auf die  $x$ -Achse. Neue Schichtdefinitionen können durch Drücken von **Strg + N** erzeugt und sofort verwendet werden.

### 2.2 Bereich „Laminataufbau“

ALADIN verwendet für die Erstellung des Elastizitätsgesetzes nur den Anteil der Scheiben-Steifigkeit. Unsymmetrische **Laminataufbauten** werden „gedanklich“ symmetrisch gemacht, so dass keine Dehnungs-Krümmungs-Koppelungen entstehen. Die Reihenfolge der Schichten spielt daher für das Elastizitätsgesetz keine Rolle.

Der Knopf **Löschen** entfernt die markierte Einzelschicht, wobei die letzte Schicht nicht gelöscht werden kann. Zur Strukturierung des Aufbaus können Einzelschichten mit **hoch** und **runter** in der Tabelle verschoben werden.

In der Listendarstellung steht **a** für den Faserwinkel  $\alpha$  und **t** für die Schichtdicke  $t$ . Das Tilden-Zeichen  $\sim$  trennt die einzelnen Einträge.

**Tip:** Die **Laminatdicke** ist die Summe der Schichtdicken. Sie kann nicht verändert werden, da sie sich aus dem Laminataufbau ergibt.

## 2.3 Bereich „Ausschnitt“

Der aktuell gewählte Ausschnitt wird in verkleinerter Form in einer Vorschau angezeigt, das zugehörige Menü zeigt dessen Namen an. Der Knopf **Neuer Ausschnitt** führt zu der Eingabemaske neuer Ausschnitte in der auch bestehende Ausschnitte editiert werden können.

**Tip:** Der kleine Kreis in der Vorschau markiert den geometrischen Ursprung des Ausschnitts.

## 2.4 Bereich „Belastungen“

An jedem zu berechnenden Bauteil müssen zwingend drei Randbedingungen angegeben werden. Dies können Verschiebungs- oder Kraft-Randbedingungen sein, wobei eine homogene Last-Randbedingung einem freien Rand entspricht. Die Randbedingungen werden in Einheiten von **Spannungs-Randbedingungen** in  $\text{N/mm}^2$  und **Dehnungs-Randbedingungen** in Prozent eingetragen.

**Tip:** Wird versäumt, wenigstens eine inhomogene Randbedingung anzugeben, wird  $\sigma_x = 1 \text{ N/mm}^2$  verwendet.

## 2.5 Bereich „Ausgaben“

ALADIN bietet eine Vielzahl von Diagrammen und Darstellungen zur Analyse des Spannungszustands an. Zur Analyse des Ausschnitts sind nicht immer alle dieser Diagramme erforderlich. Daher kann in dem Feld „Ausgaben“ gewählt werden, welche Diagrammtypen erstellt werden sollen:

- **Schicht-Spannungen:** Die Spannungen  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  und  $\tau_{21}$  im Schicht-Koordinatensystem *jeder* Einzelschicht (1 Diagramm pro Schicht).
- **globale Spannungen:** Die globalen Spannungen  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  und  $\tau_{yx}$  des Verbunds (1 Diagramm).
- **Anstrengungen:** Die Faserbruch- und Zwischenfaserbruch-Anstrengung *jeder* Einzelschicht (1 Diagramm pro Schicht).
- **Zusammenfassung:** Eine tabellarische Zusammenfassung der Lasten und der versagensrelevanten Schichten.

**Tip:** Die Diskretisierung des Ausschnitts und damit die Anzahl der Stützstellen der Diagramme, kann unter **Optionen** → **Diskretisierung Ausschnitt** geändert werden. Soll zusätzlich die Form des Ausschnitts als Diagramm ausgegeben werden kann unter **Optionen** bei **Ausschnitt zeichnen** ein Haken gesetzt werden.



## 3 Anwendung

### 3.1 UD-Schicht erstellen

Eine unidirektionale Schicht (UD-Schicht) definiert sich über:

- Kennwerte des Elastizitätsgesetzes
- Festigkeitskennwerte

Das Menü **Materialdaten** → **UD-Kennwerte** bietet die Möglichkeit neue Schichtdefinitionen zu erstellen oder bereits vorhandene zu bearbeiten.

Da Formelzeichen auf der Programm-Oberfläche nicht dargestellt werden können gilt die folgende, vereinfachte Nomenklatur für die **Indizierung** einer Variablen  $x$ :

- $x\_p \rightarrow x_{\parallel}$
- $x\_s \rightarrow x_{\perp}$
- $x\_sp \rightarrow x_{\perp\parallel}$
- $x\_ss \rightarrow x_{\perp\perp}$
- $x\_p\_p \rightarrow x_{\parallel}^+$
- $x\_p\_m \rightarrow x_{\parallel}^-$
- ...

Der erste Teil der Bezeichnung steht für die Richtung (p: parallel, s: senkrecht), der zweite Teil für das Vorzeichen (p: Plus  $\hat{=}$  Zug, m: Minus  $\hat{=}$  Druck)

#### 3.1.1 Elastizitätskennwerte

ALADIN verwendet als **Elastizitätskennwerte** die so genannten Ingenieurskonstanten, also die Elastizitätsmoduln  $E_1$  und  $E_2$ , den Schubmodul  $G_{21}$  und die Querkontraktionszahl  $\nu_{21}$ . Das Elastizitätsgesetz ist eben und orthotrop. Die Querkontraktionszahl ist die so genannte „große Querkontraktionszahl“ (*major poisson's ratio*).

Es gibt mehrere Möglichkeiten diese Kennwerte einzugeben:

- Direkt die vier **Ingenieurskonstanten** eingeben.
- Über die **Mikromechanik** zwischen Faser und Matrix (Knopf Mikromechanik drücken)
- Direkte Eingabe der Scheiben-**Steifigkeitsmatrix** (Knopf K-Matrix drücken)

Ausgenommen der Mikromechanik, ist der Betrag des **Faservolumenanteils**  $\varphi$  ohne Einfluss auf die elastischen Eigenschaften.

**Mikromechanik** Grundlage der Mikromechanik ist die Ermittlung der elastischen Eigenschaften der Einzelschicht aus dem Verhalten von Faser- und Matrixwerkstoff. Die Berechnung erfolgt nach den in [Sch07] beschriebenen Methoden.

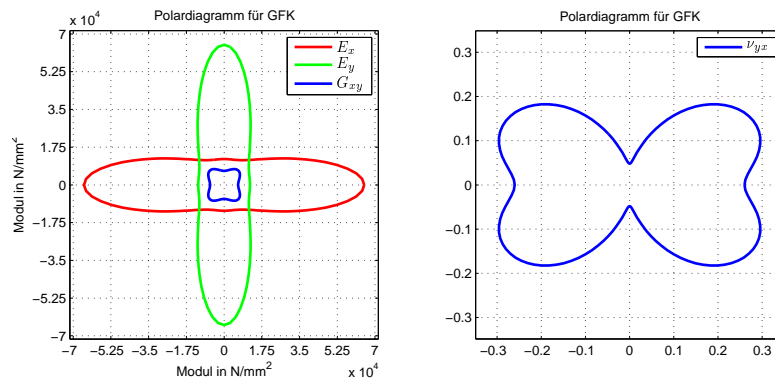
**K-Matrix** Die Scheiben-**Steifigkeitsmatrix** wird in einem Hauptachsensystem definiert. Daher sind keine Dehnungs-Schiebungs-Koppelungen vorhanden, es müssen somit vier Koeffizienten (\*) angegeben werden. Der mit „-“ markierte Eintrag wird automatisch erzeugt.

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{21} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} * & * & 0 \\ - & * & 0 \\ 0 & 0 & * \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{21} \end{pmatrix}$$

Die Steifigkeitsmatrix wird in die Ingenieurskonstanten umgerechnet. Durch mehrmaliges Umrechnen kann es daher durch Rundungsfehler zu Abweichungen kommen.

**Tip:** ALADIN überprüft, ob die eingegebene Steifigkeitsmatrix invertiert werden kann. Unter Umständen ist ALADIN der Auffassung, dass eine Matrix schlecht konditioniert sei und gibt eine Warnmeldung aus. Ist man sich sicher, dass die Matrix korrekt ist, kann diese Warnung ignoriert werden.

**Polardiagramm** Der Knopf Polardiagramm zeichnen... erzeugt ein so genanntes Polardiagramm der aktuell ausgewählten Einzelschicht. Das Diagramm wird dadurch erzeugt, dass die Einzelschicht gedreht und die zugehörigen Elastizitätskennwerte entsprechend transformiert werden. Auf diese Weise erhält man eine graphische Darstellung der elastischen Eigenschaften einer Einzelschicht in Abhängigkeit ihrer Orientierung.



**Abbildung 3:** Polardiagramm einer Einzelschicht. Links die Modulen  $E_x$ ,  $E_y$  und  $G_{xy}$ , Rechts die (große) Querkontraktionszahl  $\nu_{yx}$

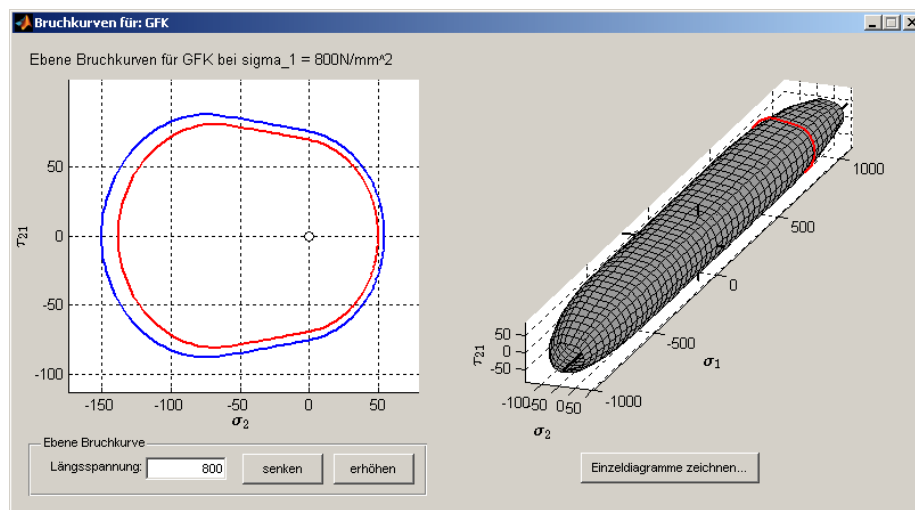
**Tip:** Die oben erläuterten Funktionen können auch genutzt werden, um Elastizitätsgrößen umzurechnen oder sich graphisch darstellen zu lassen, auch wenn gar kein Ausschnitt berechnet werden soll.

### 3.1.2 Festigkeitskennwerte

Die Beschreibung der Festigkeitskennwerte einer Einzelschicht erfolgt mit Hilfe der Basisfestigkeiten  $R$ , der zugehörigen Steigungsparameter  $p$  sowie der Schwächungsparameter  $s$  und  $m$ . Die genaue Ermittlung dieser Kennwerte kann der VDI-Richtlinie 2014 oder [Sch07] entnommen werden.

Durch **Koppeln** der Steigungsparameter  $p$  nach PUCK [Puc96] werden die Parameter  $p_{\perp\perp}$  von  $p_{\perp\parallel}$  abhängig gemacht. Dies ermöglicht eine vereinfachte Berechnung der Versagensgrenzen, die in ALADIN jedoch keine Anwendung findet. Um die ALADIN-Ergebnisse mit denen einer vereinfachten Berechnung vergleichen zu können, wird hier die Kopplung der Steigungsparameter angeboten. Details können der Literatur entnommen werden.

**Bruchkörper** Die gewählten Festigkeitskennwerte können in Form von Bruchkörpern für den ebenen Spannungszustand dargestellt werden. Die Oberfläche der Bruchkörper hüllt jeweils die Spannungszustände ein, die kein Versagen auslösen. Durch Drücken des Knopfes **Bruchkörper zeichnen...** wird die ebene Bruchkurve und die „Bruchzigarre“, wie in Abbildung 4 gezeigt, erstellt.



**Abbildung 4:** Bruchkörper der Einzelschicht für den ebenen Spannungszustand. Links die ebene Bruchkurve, rechts die „Bruchzigarre“

Der Einfluss der Schwächungsparameter  $s$  und  $m$  lässt sich an der Bruchkurve erkennen. Die Bruchkurve ist ein Schnitt durch die Bruchzigarre an einer Stelle  $\sigma_1$ . Durch die Schwächung schnürt sich die Bruchzigarre und damit auch die Bruchkurve, zu hohen faserparallelen Spannungen  $\sigma_1$  hin, ein.

**Tip:** Sind die Steigungsparameter  $p_{\perp\perp}^{\pm}$  nicht bekannt, können diese durch Drücken des Knopfes **Koppeln** gemäß der Vorgaben von Puck erzeugt werden.

**Tip:** Sollen Darstellungen der Bruchkörper abgespeichert werden, um sie z.B. in einer Ausarbeitung zu verwenden, so können durch Drücken von **Einzeldiagramme zeichnen...** separate, editierbare Darstellungen erzeugt werden.

### 3.2 Faser- und Matrixkennwerte definieren

Die Definition von Faser- und Matrixkennwerte ist nur dann notwendig, wenn die **Mikromechanik** zur Definition der Elastizitätskenngrößen einer Einzelschicht verwendet werden soll. Ist dies nicht der Fall, so sind die dort definierten Werkstoffe ohne Belang.

### 3.2.1 Faserkennwerte

Über das Menü **Materialdaten** → **Faserkennwerte** erreicht man die Eingabemaske für Faserwerkstoffe. Die dort verwendeten Indizes haben die folgende Bedeutung:

- **Fq** → quer zur Faserrichtung
- **F1** → längs zur Faserrichtung

Durch Drücken des Knopfes **isotrop** werden die Eigenschaften der Faser so verändert, dass sie einem isotropen Werkstoffgesetz folgen. Glasfasern besitzen zum Beispiel ein isotropes Werkstoffgesetz.

### 3.2.2 Matrixkennwerte

Über das Menü **Materialdaten** → **Matrixkennwerte** erreicht man die Eingabemaske für Matrixwerkstoffe. Der dort verwendete Index **M** hat die Bedeutung „Matrix“. Der Matrix-Werkstoff wird immer als isotrop angenommen.

**Tip:** Man erreicht die Eingabemasken zur Definition neuer Faser- und Matrix-Werkstoffe auch über die Maske zur Definition einer Einzelschicht.

## 3.3 Ausschnitt erstellen

Ausschnitte werden in ALADIN durch eine Reihendarstellung mit Hilfe von **Koeffizienten** im komplexen Raum beschrieben.  $\theta = 0 \dots 2\pi$  ist dabei der Umlaufwinkel um den Ausschnitt.

$$Z(\theta) = \underbrace{e^{i\theta}}_{\text{Kreis}} + \underbrace{\sum_n \frac{m_n}{e^{i\theta n}}}_n_{\text{ueberlagerte Form}}$$

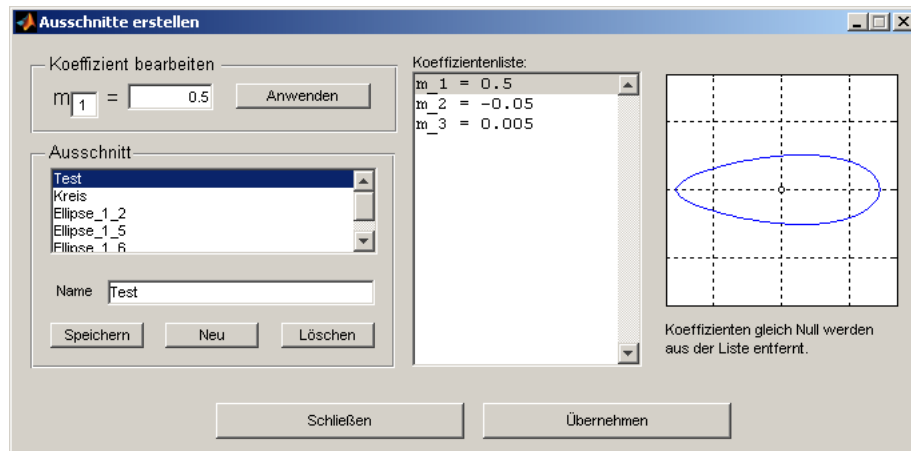
Diese Darstellung kann als Überlagerung von verschiedenen Grundformen interpretiert werden. Durch Überlagerung von sehr vielen Grundformen können **beliebige Ausschnitte** erzeugt werden.

Die reellen Koordinaten ergeben sich aus dem Real- und Imaginärteil von  $Z(\theta)$ :  $x(\theta) = \Re(Z(\theta))$  und  $y(\theta) = \Im(Z(\theta))$ . Details zu dieser Darstellung können [Kre07] oder [UR00] entnommen werden.

In Abbildung 5 ist ein tropfenförmiger Ausschnitt gezeigt. Dem Kreis (Parameter  $m_0$ ) wird zunächst eine Ellipse (Parameter  $m_1$  „2-Eck“) und ein Dreieck (Parameter  $m_2$ ) überlagert. Die Krümmung des Ausschnitts wird anschließend durch Überlagerung eines Vierecks (Parameter  $m_3$ ) korrigiert.

Zur zielgerichteten und schnellen Erstellung von Ausschnitten sollten die folgenden Regeln beachtet werden:

1. Der Parameter  $m_n$  erzeugt ein  $(n + 1)$ -Eck.
2. Der Wechsel des Vorzeichens erzeugt eine Drehung der Grundform.
3. Werte  $|m| > 1$  sind nicht zulässig.
4. Umso größer  $n$  wird, desto kleiner sollte der Betrag von  $m_n$  sein.



**Abbildung 5:** Definition eines Ausschnitts mit Hilfe der Koeffizienten  $m_n$ .

5. Beim Entwurf mit kleinen  $n$  beginnen.

**Tip:** In der Literatur z.B. [UR00] sind häufig Listen der Koeffizienten für elementare Ausschnitte wie ein Langloch vorhanden.

### 3.4 Berechnungsbericht anfordern

ALADIN bietet die Möglichkeit automatisiert einen Bericht im PDF-Format über die Berechnung zu erstellen. Dieser Bericht enthält alle Informationen über verwendete Lasten, die Ausschnittsform sowie der Materialeigenschaften. Der Empfänger des Berichts besitzt damit alle Angaben, um die Ergebnisse nachvollziehen zu können. Um diese Möglichkeit nutzen zu können muss ein  $\text{\LaTeX}$ -Minimalsystem auf dem Rechner installiert sein. Im dem Menü **Info** → **LaTeX-Info** finden Sie weitere Informationen zur Installation von  $\text{\LaTeX}$ .

Die Erstellung des **PDF-Berichts** wird im Menü **Optionen** aktiviert. Sein Inhalt ist unabhängig von den im ALADIN-Hauptfenster angeforderten Ausgaben. Der Bericht wird, nach seiner Erstellung, automatisch geöffnet.

**Vorsicht:** Schließen Sie den Berechnungsbericht, bevor Sie eine neue Rechnung starten. Der Bericht enthält sonst nicht die aktuellen Berechnungsergebnisse.

**Tip:** Die Tastenkombination **Strg + P** aktiviert und deaktiviert die Erstellung des PDF-Berichts.

**Tip:** Die Ausgaben des  $\text{\LaTeX}$ -Compilers werden entweder in den Matlab-Workspace oder die Eingabeaufforderung – über die ALADIN gestartet wurde – zurückgegeben.

**Tip:** Programme wie der Acrobat Viewer verhindern, dass das geöffnete Dokument aktualisiert werden darf, besser eignet sich in diesem Fall Ghostview.

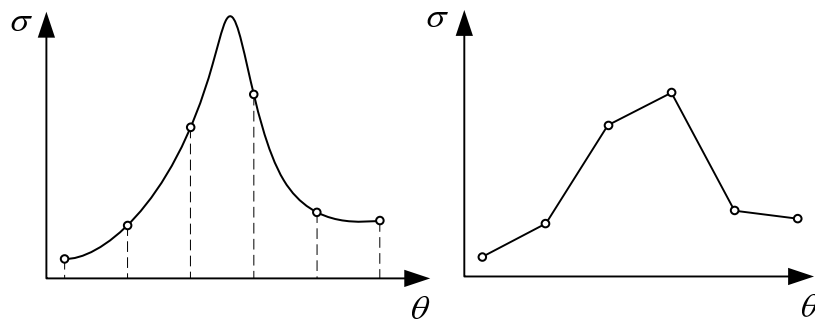
### 3.5 Optionen der Berechnung

Das Menü **Optionen** enthält zwei Möglichkeiten, die Berechnung am Ausschnitt zu beeinflussen.

- Die **Diskretisierung** des Ausschnittsrandes
- Das Winkelinkrement zur **Suche der Bruchebene**

### 3.5.1 Diskretisierung des Ausschnittsrandes

Der Spannungszustand am Rand des Ausschnitts wird an diskreten Stellen ausgewertet. Die Genauigkeit der Ergebnisse an den **Stützstellen** hängt jedoch nicht von der Anzahl der Stützstellen ab. Es besteht aber die Gefahr, dass bei sehr wenigen Stützstellen und damit einer räumlich sehr weiten „Abtastung“ das exakte Maximum nicht ausgewertet wird. Abbildung 6 verdeutlicht diesen Umstand. Eine zu hohe Anzahl von Stützstellen führt jedoch – gerade in Kombination mit der Anstrengungsberechnung – zu einem unangemessenen numerischen Aufwand.



**Abbildung 6:** Auswertung der Lösung an diskreten Stützstellen. Links der kontinuierliche Verlauf, rechts der quasi-kontinuierliche Verlauf auf Basis der diskreten Stützstellen. Scharfe Maxima werden bei zu grober Diskretisierung nicht richtig wiedergegeben.

### 3.5.2 Suche der Bruchebene

Die **Bruchebene** in jeder einzelnen UD-Schicht wird in ALADIN iterativ gesucht (siehe [Sch07]). Es muss daher ein **Winkelinkrement** für die iterative Bruchebensuche angegeben werden.

Eine Verkleinerung des Winkelinkrements erhöht die Rechenzeit erheblich, da für jeden diskreten Punkt des Rands die Bruchebensuche durchgeführt wird.

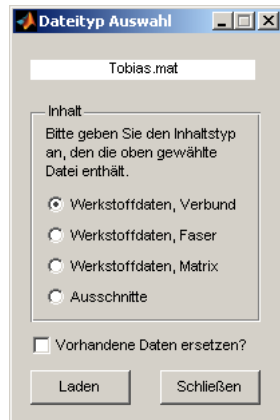
**Tip:** Verändert Sie das Winkelinkrement nur dann, wenn Sie fundierte Hinweise dafür haben, dass eine Bruchebene mit dem voreingestellten Inkrement nicht korrekt gefunden wird.

## 3.6 Projektdaten laden und speichern

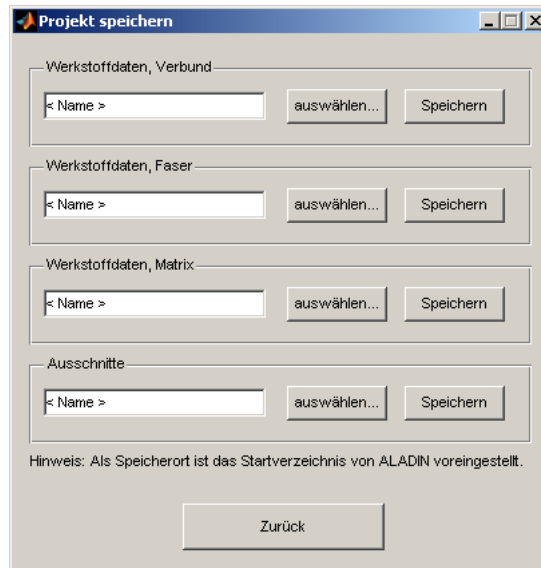
Projektdaten können über das Menü **Datei** gespeichert oder geladen werden. Unter „Projektdaten“ werden dabei die folgenden Daten verstanden:

- Werkstoffdaten Verbund: Kennwerte (Elastizitäts- und Festigkeitsgrößen) einer Einzelschicht
- Werkstoffdaten Faser: Kennwerte (Elastizitätsgrößen) der Faser

- Werkstoffdaten Matrix: Kennwerte (Elastizitätsgrößen) der Matrix
- Ausschnitte: Parameter, die einen Ausschnitt beschreiben.



**Abbildung 7:** Laden von Projektdaten, Abfrage des Inhalts der gewählten Datei.



**Abbildung 8:** Speichern von Projektdaten in unterschiedliche Dateien, je nach Inhalt.

Beim Start von ALADIN werden die folgenden Dateien gesucht und versucht zu laden:

- Faserdaten.mat
- Matrixdaten.mat
- Werkstoffdaten.mat
- Ausschnitte.mat

Sind diese Dateien nicht verfügbar oder ungültig, so wird jeweils ein Standard-Elastizitätsgesetz und ein Kreis als Ausschnittsform erzeugt. Dieses Vorgehen soll die Benutzung von ALADIN ermöglichen, auch wenn die Standard-Eingaben fehlen oder ungültig sind.

### 3.6.1 Laden

Die Kennwerte werden in separaten Dateien – mit der Dateierweiterung MAT – gespeichert. ALADIN kennt beim Öffnen einer MAT-Datei deren Inhalt nicht, daher muss angegeben werden, welchen Inhalt die Datei besitzt. Abbildung 7 zeigt das zugehörige Fenster. Vermutet ALADIN, dass ein falscher Inhaltstyp gewählt wurde, wird eine Warnmeldung ausgegeben.

Sollen bereits bestehende Kennwerte beim Laden überschrieben werden, muss der Haken bei 'Vorhandene Daten ersetzen?' aktiviert werden. Alle Daten, die in der graphischen Oberfläche eingetragen wurden, werden dann gelöscht und durch den Inhalt der Datei ersetzt.

### 3.6.2 Speichern

Beim Speichern wird der jeweils gewählte Kennwert-Typ in einer separaten Datei – mit der Dateierweiterung MAT – gespeichert. Abbildung 8 zeigt die Maske zum Speichern der Projektdaten.

**Tip:** Zum Laden und Speichern stehen die Tastenkombinationen Strg + L und Strg + S zur Verfügung.

**Tip:** Das Standard-Verzeichnis zum Speichern und Laden ist das Start-Verzeichnis der Anwendung.

## 4 Installation

ALADIN ist in MATLAB R2006a (Version 7.2.0.232) programmiert und zu einer – in einer Windows-Umgebung – lauffähigen EXE-Datei kompiliert. ALADIN kann also auch ohne das Programmpaket MATLAB ausgeführt werden. Einzige Voraussetzung ist die Installation gewisser Bibliotheken, die jedoch in der kostenlosen *MATLAB Component Runtime* (MCR) enthalten sind. Ist MATLAB bereits installiert, wird die MCR nicht benötigt.

Zum Starten von ALADIN muss nur die EXE-Datei aufgerufen werden. Dies ist auch von Wechseldatenträgern aus möglich. Voraussetzung ist jedoch, dass der Anwender **Schreibrechte** auf dem entsprechenden Datenträger besitzt.

### 4.1 Notwendige Dateien

Die folgenden Dateien müssen vorhanden sein, um ALADIN starten zu können:

- ALADIN.exe
- ALADIN.ctf
- KLuB-Logo.jpg

Optional wird empfohlen, die nachfolgenden Datei mit Standard-Werten in das gleiche Verzeichnis wie die obigen Dateien zu legen:

- Faserdaten.mat
- Matrixdaten.mat
- Werkstoffdaten.mat
- Ausschnitte.mat

Zur Erzeugung eines PDF-Berichts wird zusätzlich noch eine EPS-Datei mit einem Logo benötigt:

- KLuB-Logo.eps

**Tip:** Die Manipulation der Logo-Dateien führt dazu, dass ALADIN nicht mehr im vollen Umfang verwendet werden kann!



## 4.2 Zusätzlich erzeugte Dateien

Beim erstmaligen Aufruf von ALADIN wird ein Verzeichnisstruktur in dem Ordner \ALADIN\_mcr angelegt. Je nach Geschwindigkeit des Rechners kann dies einige Zeit in Anspruch nehmen. Bei erneutem Aufruf von ALADIN wird auf die in \ALADIN\_mcr erzeugte Struktur zurück gegriffen, was den Start von ALADIN wesentlich beschleunigt.

## 5 Für Entwickler

In diesem Kapitel werden Angaben über die Datei-Formate gemacht, so dass eigene Schnittstellen zu ALADIN programmiert werden können. ALADIN ist ein MATLAB-basiertes Programm und verwendet strukturierte Datentypen, die über die handles-Struktur an die verschiedenen Programmteile weitergereicht werden.

### 5.1 Daten der Einzelschicht

Der Datentyp für die Einzelschicht ist wie folgt aufgebaut:

`Werkstoffdaten.Pos(1,i)`

Wobei `Pos` ein Feld mit den folgenden Einträgen ist:

```
Werkstoffdaten.Pos(1,i).Name
    .E_p
    .E_s
    .G_sp
    .ny_sp
    .phi
    .R_p_p
    .R_p_m
    .R_s_p
    .R_s_m
    .R_sp
    .p_sp_p
    .p_sp_m
    .p_ss_p
    .p_sp_m
    .ss
    .mm
```

`i` bezeichnet also den  $i$ -ten Verbundtyp. Die Variable `Name` ist vom Typ String.

### 5.2 Daten der Faser

Der Datentyp für den Faserwerkstoff ist wie folgt aufgebaut:

`Faserdaten.Pos(1,i)`

Wobei `Pos` ein Feld mit den folgenden Einträgen ist:

```
Faserdaten.Pos(1,i).Name
      .E_Fl
      .E_Fq
      .G_F
      .ny_F
```

$i$  bezeichnet also den  $i$ -ten Faserwerkstoff. Die Variable `Name` ist vom Typ String.

### 5.3 Daten der Matrix

Der Datentyp für den Matrixwerkstoff ist wie folgt aufgebaut:

```
Matrixdaten.Pos(1,i)
```

Wobei `Pos` ein Feld mit den folgenden Einträgen ist:

```
Matrixdaten.Pos(1,i).Name
      .E_M
      .ny_M
```

$i$  bezeichnet also den  $i$ -ten Matrixwerkstoff. Die Variable `Name` ist vom Typ String.

### 5.4 Daten der Ausschnitte

Die Ausschnitte werden über ihre Koeffizienten  $m_n$  definiert, die in einem Feld abgelegt sind:

```
Ausschnitte.Pos(1,i).m
      .Name
```

$i$  bezeichnet also den  $i$ -ten Ausschnitt. Die Variable `Name` ist vom Typ String. `m` ist ein eindimensionales Feld, dessen erster Eintrag der Koeffizient  $m_1$  ist. Die Größe des Felds `m` ist also durch den größten Index eines Koeffizienten bestimmt. „leere“ Einträge sind nicht erlaubt und müssen mit 0 (Null) aufgefüllt werden.  $m_1 = 0.5$ ,  $m_5 = 0.001$  wird also `[0.5 0 0 0 0.001]` geschrieben.

**Tip:** ALADIN öffnet bei jedem Start zu nächst die Dateien `Faserdaten.mat`, `Matrixdaten.mat`, `Werkstoffdaten.mat` und `Ausschnitte.mat`. Sind diese nicht verfügbar, so ist im Programm-Quelltext jeweils eine gültige Werkstoff- und Ausschnittdefinition als Rückfalllösung enthalten.

### 5.5 PDF-Bericht

Nach der Erstellung der PDF-Datei werden alle temporären L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X-Dateien sowie die erzeugten EPS-Grafiken gelöscht:

```
dos('del *.log ');
dos('del *.dvi ');
dos('del *.tex ');
dos('del *.aux ');

dos('del Spannungen_Schicht_*.eps');
dos('del Anstrengung_Schicht_*.eps');
dos('del Ausschnitt.eps');
dos('del Spannungen_global.eps');
```

## Literatur

- [Kre07] KREMER, Tobias: Analyse und Optimierung von Kerben in Faser-Kunststoff-Verbunden – Methoden zur Analyse und Bewertung von Ausschnitten sowie werkstoff-spezifische Optimierungsverfahren. In: SCHÜRMANN, Helmut (Hrsg.): *Schriftenreihe Konstruktiver Leichtbau mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. Aachen : Shaker-Verlag, 2007. – Zugel. Diss. der TU Darmstadt
- [Puc96] PUCK, Alfred: *Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten – Modelle für die Praxis*. München Wien : Carl Hanser Verlag, 1996. – Buch ist vergriffen, jedoch elektronisch verfügbar unter <http://www.klub.tu-darmstadt.de/forschung/download.php>
- [Sch07] SCHÜRMANN, Helmut: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. 2., bearb. und erw. Aufl. Berlin Heidelberg New York : Springer Verlag, 2007
- [UR00] UKADGAONKER, Vijay G. ; RAO, D.K. N.: A general solution for stresses around holes in symmetric laminates under inplane loading. In: *Composite Structures* 49 (2000), S. 339–354

## Index

- Annahmen, 6
- Anzahl der Diagramme, 8
- Ausgabegrößen, 5
  - Anstrengung, 5
  - Formfaktoren, 5
  - globale Spannungen, 5
  - Schicht-Spannungen, 5
- Ausgaben, Art der, 8
- Ausschnitt, 8
- Ausschnitt definieren, 12
- Ausschnitt-Diskretisierung, 14
  
- Belastung
  - Spannung, 8
  - Verschiebung, 8
- Berechnungsbericht, 13
- Bericht aktualisieren, 13
- Bruchkörper, 11
- Bruchkurve, eben, 11
- Bruchzigarre, 11
  
- Festigkeiten
  - UD-Schicht, 10
  
- Ingenieurskonstanten, 9
- Iterative Suche der Bruchebene, 14
  
- K-Matrix, 10
- Konditionierung, 10
- Koppelung, 11
  
- Laminataufbau, 7
  
- Mikromechanik, 9
  - Faserkennwerte, 12
  - Matrixkennwerte, 11, 12
  
- Optionen, 13
  - Diskretisierung, 14
  - Suche Bruchebene, 14
  
- PDF-Bericht, 13
- Polardiagramm, 10
- Projekt, 14
  
- Schichtdicke, 7
- Schichteigenschaften, 7
- Schwächung, 11
  
- Steifigkeitsmatrix, 10
- Steigungsparameter, 11
  
- UD-Schicht, 9
  - Eigenschaften, 9