

# Erweiterung der IDAC-Datenbank um zyklische Werkstoffkennwerte

Dipl.-Ing.(FH) Stefan Einbock  
Prof. Dr.-Ing. W.-U. Zammert

30. Juni 2006

## 1 Einleitung

Für jede Finite Elemente Rechnung und einen sich daran anschließenden Festigkeitsnachweis werden Daten benötigt. Abhängig von der Art der Berechnung und des Nachweises sind beispielsweise zügige oder zyklische Werkstoffdaten notwendig. Oftmals können diese jedoch nur durch aufwendige Versuche ermittelt werden. Deshalb bietet es sich an, die Daten einer gut gepflegten, aktuellen Datenbank zu entnehmen.

Da aber insbesondere die Ermittlung zyklischer Werkstoffkennwerte mit einem hohen Versuchs- und damit Kostenaufwand verbunden ist, sind diese Daten meist nicht vorhanden. Um aber dennoch eine Lebensdauerabschätzung durchführen zu können, bietet es sich an, die zyklischen Kennwerte aus den statischen Kennwerten nach dem Stand der Technik abzuschätzen und diese Daten in eine vorhandene Datenbank ein zu pflegen.

## 2 Inhalt Datenbank

Die IDAC-Datenbank der CADFEM GmbH beinhaltet vor allem statische Werkstoffkennwerte wie die Zugfestigkeit  $R_m$ , die Streckgrenze  $R_e$ , den E-Modul  $E$ , die Dichte  $\rho$  usw. verschiedenster Werkstoffe. Da aber die für eine Betriebsfestigkeitsrechnung notwendigen zyklischen Kennwerte (wie Nennspannungswöhlerlinien, Verfestigungsexponenten  $K'$  und -koeffizienten  $n'$ , zyklischen Dehnungs-Koeffizienten  $\varepsilon'_f$  und -Exponenten  $c$  sowie zyklischen Spannungs-Koeffizienten  $\sigma'_f$  und -Exponenten  $b$ ) meist nicht angegeben sind, wurden diese nach dem Stand der Technik [1], [2] abgeschätzt und die Datenbank um diese Kennwerte erweitert. Damit ist eine Lebensdauerabschätzung

---

mit dem ANSYS Workbench Fatigue Modul möglich. Eine Erweiterung der Datensätze erfolgte dabei für Stahlwerkstoffe sowie für Aluminium- und Titanlegierungen.

Die Datenbank wurde in drei Datengruppen gegliedert:

1. *Datengruppe\_1\_linear.xml* beinhaltet nur linear elastische Spannungs-Dehnungsbeziehungen. Allerdings liegen für die Datensätze der Stahlwerkstoffe und der Aluminiumlegierungen die nach [1] und [2] abgeschätzten zyklischen Kennwerte und Spannungswöhlerlinien vor. Für Titanlegierungen wurden die zyklischen Kennwerte nach [2] abgeschätzt und ebenfalls mit aufgenommen.
2. Bei *Datengruppe\_2\_nichtlinear\_zyklisch.xml* wurden zusätzlich zu den zyklischen Kennwerten noch die zyklische Spannungs-Dehnungskurve als MISO definiert. Die Datensätze dieser Datenbank ermöglichen damit eine elastisch-plastische Finite Elemente-Rechnung mit der abgeschätzten zyklischen Spannungs-Dehnungskurve als Materialgesetz. **Mit diesen Daten darf auf keinen Fall eine statische FE-Rechnung durchgeführt werden!**
3. *Datengruppe\_3\_nichtlinear\_zuegig.xml* nichtlineare Werkstoffkennwerte wie die zügigen elastisch-plastische Spannungs-Dehnungskurven (multilineare isotrope Verfestigung MISO), temperaturabhängige E-Module, usw. für statische Berechnungen.

#### **Hinweise:**

Statische elastisch-plastische FE-Rechnungen dürfen nur mit den Daten der dritten Datengruppe durchgeführt werden. Statische und zyklische linear-elastische Berechnungen können mit den Daten der ersten Datengruppe erfolgen. Die zweite Datengruppe ist ausschließlich für elastisch-plastischen FE-Rechnungen von Bauteilen unter zyklischer Beanspruchung gedacht.

## **3 Berechnung der zyklischen Kennwerte**

### **3.1 Die Kennwerte des Kerbspannungskonzepts [10]**

Ein Betriebsfestigkeitsnachweis nach dem Kerbspannungskonzept [10] erfolgt auf der Basis örtlicher, linear-elastisch berechneter Spannungen. Basis dieses Festigkeitsnachweises bildet die Spannungswöhlerlinie. Diese wird in ANSYS Workbench als Punktfolge eingegeben. Bis zu Rev. 10.0 wird sie aufgrund eines Übersetzungsfehlers in der deutschen Version unglücklicherweise als

Dehnungswöhlerlinie bezeichnet. Angegeben werden abgeschätzte Wöhlerlinien für die Werkstoffgruppen Aluminiumlegierungen und Stahl. Sie sind nach der FKM-Richtlinie [1] und der Beziehung von Basquin [8]

$$\sigma_A = \sigma_D \cdot \left( \frac{N}{N_D} \right)^{-1/k} \quad (1)$$

abgeschätzt, also durch Geradenstücke im doppellogarithmischen Netz dargestellt worden. Sie gelten für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 97,5% und für gekerbte Bauteile sowie für ein konstantes Spannungsverhältnis von  $R = -1$ .

Die Wöhlerlinien für Stahl werden dabei als Gerade im Zeitfestigkeitsbereich mit dem Neigungsexponenten  $k = 5$  dargestellt. Ab  $N_D = 10^6$  Zyklen beginnt der Dauerfestigkeitsbereich mit der abgeschätzten Werkstoffwechselfestigkeit von  $\sigma_D = 0,45 R_m$ . Die Darstellung des Dauerfestigkeitsplateaus geschieht bis zu einer Zyklenzahl von  $N = 10^9$ . Als obere Begrenzung der Wöhlerlinie wird nach einem Vorschlag von [9] die Zugfestigkeit  $R_m$  gewählt. Dadurch wird die Wöhlerlinie für Stahl durch drei Geradenstücke im doppellogarithmischen Netz angenähert, siehe Abbildung 1.

Spannungswöhlerlinien für Aluminiumlegierungen werden durch vier Gera-

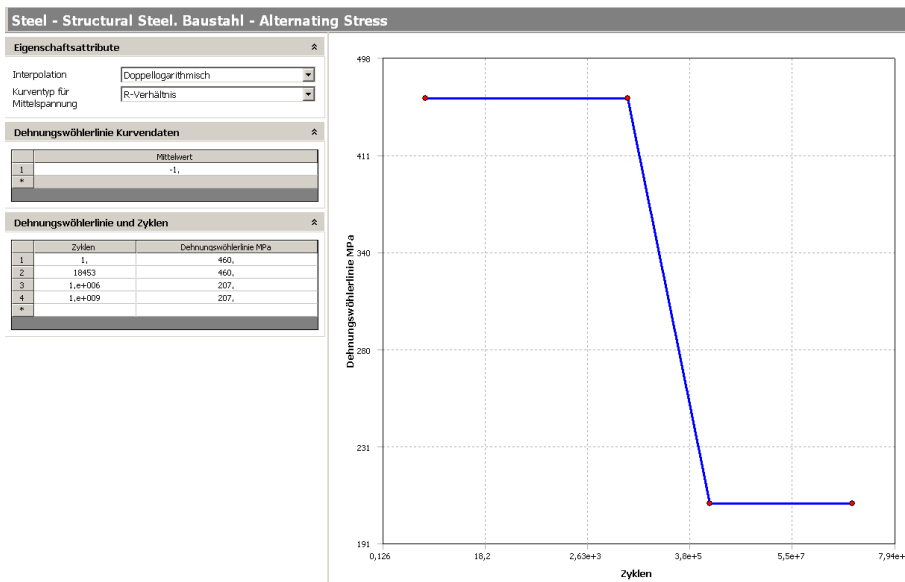


Abbildung 1: Darstellung der Spannungswöhlerlinie in ANSYS Workbench durch drei Geradenstücke im Doppellogarithmischen Netz für Stahl.

denstücke definiert. Sie werden nach oben ebenfalls durch die Zugfestigkeit

$R_m$  begrenzt. Für eine Zyklenzahl  $N < N_D = 10^6$  werden sie durch ein Geradenstück mit dem Neigungsexponenten  $k = 5$  definiert. Bei  $N = N_D = 10^6$  Zyklen wird die ertragbare Spannungsamplitude von  $\sigma_D = 0,30 R_m$  bestimmt. Für  $10^6 < N < 10^8$  beschreibt ein Geradenstück mit der Neigung  $k = 15$  den Verlauf der Wöhlerlinien. Ab  $N = 10^8$  gehen sie in einen horizontalen Verlauf über, siehe Abbildung 2.

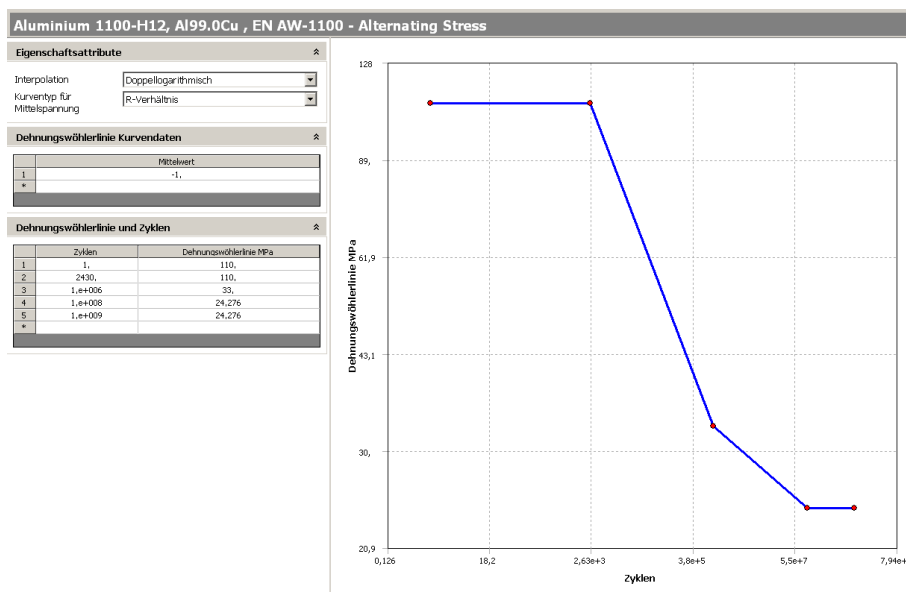


Abbildung 2: Darstellung der Spannungswöhlerlinie in ANSYS Workbench durch vier Geradenstücke im Doppellogarithmischen Netz für Aluminiumlegierungen.

### 3.2 Die Kennwerte des Kerbgrundkonzeptes [10]

Bei dem Kerbgrundkonzept [10] erfolgt der rechnerische Betriebsfestigkeitsnachweis aufgrund der elastisch-plastischen Kerbgrundbeanspruchung. Diese können entweder aus den linear-elastisch berechneten Strukturspannungen abgeschätzt, oder mittels einer elastisch-plastischen FE-Rechnung bestimmt werden. In beiden Fällen ist die Kenntnis der zyklischen Spannungs-Dehnungskurve Voraussetzung zur Spannungsermittlung, sowie die Dehnungswöhlerlinie zur Festigkeitsbewertung. Die notwendigen Kennwerte (Verfestigungsexponenten  $n'$  und -koeffizienten  $K'$  für die Zuordnung der zyklischen Spannungs-Dehnungskurve; zyklischen Dehnungs-Koeffizienten  $\varepsilon'_f$  und -Exponenten  $c$  sowie zyklischen Spannungs-Koeffizienten  $\sigma'_f$  und -Exponenten  $b$  für die Definition der Wöhlerlinie) werden für die Werkstoffgruppen Stahl,

Aluminium- und Titanlegierungen mit dem Uniform Material Law (UML) [2] aus den statischen Werkstoffkennwerten (dem E-Modul  $E$  und der Zugfestigkeit  $R_m$ ) geschätzt, siehe Abbildung 3. Sie gelten somit für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 50%.

Kennwert	Manson Universal Slopes	Manson Universal Slopes modifiziert Muralidharan / Manson	Uniform Material Law Bäumel / Seeger	
		alle Werkstoffe	nichtleg. & niedriglegierte Stähle	Al, Ti-Leg.
Schwingfestigkeitskoeffizient $\sigma'_f$	$1,90 \cdot R_m$	$0,623 \cdot R_m^{0,832} \cdot E^{0,168}$	$1,50 \cdot R_m$	$1,67 \cdot R_m$
Schwingfestigkeitsexponent $b$	-0,12	-0,09	-0,067	-0,065
Duktilitätskoeffizient $\varepsilon'_f$	$0,76 \cdot D^{0,6}$	$0,0196 \cdot D^{0,155} \left(\frac{R_m}{E}\right)^{-0,53}$	$0,59 \cdot \Psi$	0,35
Duktilitätsexponent $c$	-0,6	-0,56	-0,58	-0,69
Zug-Druck-Dauerfestigkeit $\sigma_G$			$0,45 \cdot R_m$	$0,42 \cdot R_m$
Dehnung bei $\sigma_G$ $\varepsilon_G$			$0,45 \cdot \left(\frac{R_m}{E}\right) - 1,95 \cdot 10^{-4} \cdot \Psi$	$0,42 \cdot \left(\frac{R_m}{E}\right)$
Grenzlastspielzahl $N_G$ bei $\sigma_G$			$5 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$
zykl. Verfestigungskoeffizient $K'$			$1,65 \cdot R_m$	$1,61 \cdot R_m$
zykl. Verfestigungsexponent $n'$			0,15	0,11

$$D = \ln\left(\frac{1}{1-Z}\right)$$

$$\Psi = 10 \quad \text{für} \quad \frac{R_m}{E} \leq 3 \cdot 10^{-3}$$

bzw

$$\Psi = \left(1375 - 1250 \cdot \frac{R_m}{E}\right) \quad \text{für} \quad \frac{R_m}{E} > 3 \cdot 10^{-3}$$

Abbildung 3: Uniform Material Law, nach Bäumel und Seeger [2]

Aus den Dehnungs-Lebensdauer-Parametern wird von ANSYS Workbench automatisch die zyklische Spannungs-Dehnungskurve nach Ramberg-Osgood und die Dehnungswöhlerlinie nach Manson-Coffin-Morrow MCM [3]-[5] dargestellt. Im Materialdatenblatt des jeweiligen Werkstoffes kann zwischen diesen beiden Darstellungen gewählt werden. Abbildung 4 zeigt die Dehnungswöhlerlinie nach MCM (Ermüdungslebensdauer aufgrund von Dehnungen), während Abbildung 5 die zyklische Spannungs-Dehnungskurve nach Ramberg-Osgood (zyklische isotrope Verfestigung) darstellt.

### 3.2.1 Kennwerte bei linear-elastischer FE-Rechnung

Für die Berechnung der Ermüdungslebensdauer mit dem ANSYS Workbench Fatigue Modul aufgrund einer linear-elastischen FE-Rechnung sind die Dehnungs-Lebensdauer-Parameter (Verfestigungsexponenten  $n'$  und -koeffizienten  $K'$  für die Zuordnung der zyklischen Spannungs-Dehnungskurve; zyklischen Dehnungs-Koeffizienten  $\varepsilon'_f$  und -Exponenten  $c$  sowie zyklischen Spannungs-Koeffizienten  $\sigma'_f$  und -Exponenten  $b$  für die Definition der Wöhlerlinie) notwendig.

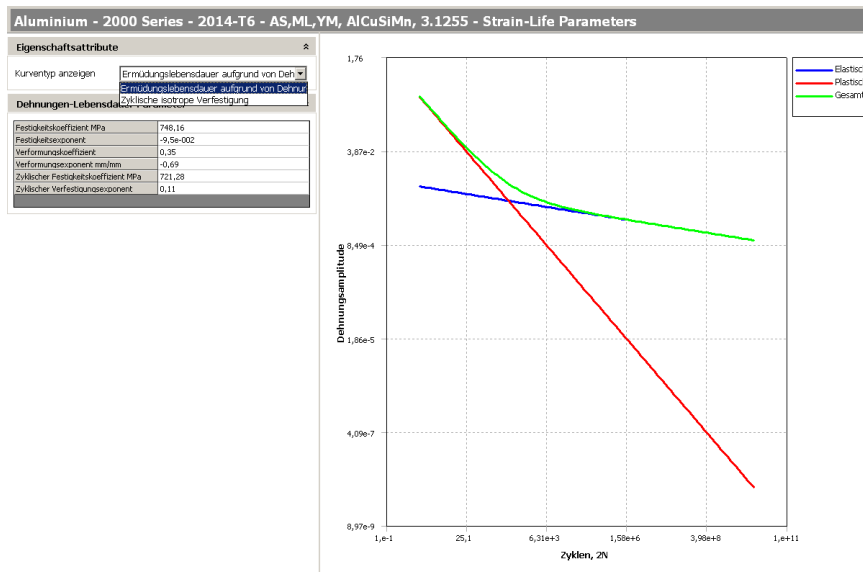


Abbildung 4: Die Dehnungswöhlerlinie nach dem Ansatz von MCM [3]-[5] auf der Basis von Dehnungs-Lebensdauer-Parametern in ANSYS Workbench.

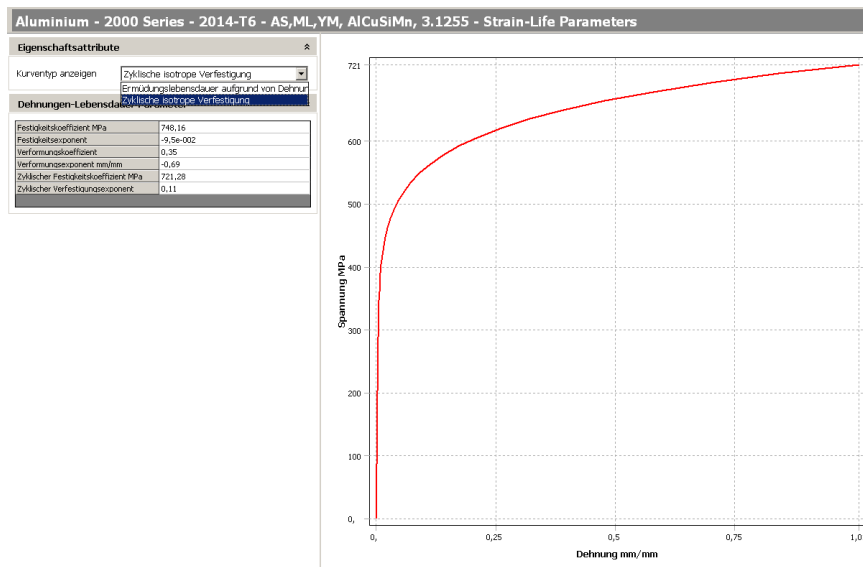


Abbildung 5: Die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve nach dem Ansatz von Ramberg-Osgood [6] auf der Basis von Dehnungs-Lebensdauer-Parametern in ANSYS Workbench.

Das UML ist nicht für hochlegierte Stahlwerkstoffe gültig. Allerdings wurden für diese Werkstoffe die zyklischen Kennwerte trotzdem mit dieser Methode abgeschätzt damit zumindest in grober Näherung zyklische Kennwerte vorhanden sind die als Anhaltswerte dienen können. Aus diesen Daten wird dann in Ansys Workbench eine Dehnungswöhlerlinie nach dem Ansatz von Manson-Coffin-Morrow MCM [3]-[5]

$$\varepsilon_{a,t} = (\sigma'_f/E) \cdot (2N)^b + (\varepsilon'_f) \cdot (2N)^c. \quad (2)$$

berechnet. Mit der Gesamtdehnungsamplitude  $\varepsilon_{a,t}$  und der Zyklenzahl  $N$ . Die zyklische isotrope Verfestigung (zyklische Spannungs-Dehnungskurve) wird mit der Spannungsamplitude  $\sigma_a$  nach der Ramberg-Osgood Beziehung [6]

$$\varepsilon_{a,t} = \varepsilon_{a,e} + \varepsilon_{a,p} = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'}\right)^{1/n'} \quad (3)$$

als Addition von elastischer  $\varepsilon_{a,e}$  und plastischer Dehnungsamplitude  $\varepsilon_{a,p}$  dargestellt. Diese dient mit Hilfe der Neuberregel [7]

$$\sigma_a \cdot \varepsilon_{a,t} = \frac{\sigma_H^2}{E} \quad (4)$$

der Berechnung von Hysteresekurven und der Bestimmung von elastischen und plastischen Spannungen und Dehnungen aus den Ergebnissen einer linear elastischen FE-Rechnung (hierin ist  $\sigma_H$  die linear elastisch berechnete Spannung). Abbildung 5 zeigt die in ANSYS Workbench verwendete zyklische Spannungs-Dehnungskurve.

### 3.2.2 Kennwerte bei elastisch-plastischer FE-Rechnung

Um auch die Kerbgrundbeanspruchung anhand einer elastisch-plastischen FE-Rechnung ermitteln zu können, wurde die zyklische Spannungs-Dehnungskurve in Workbench als multilineare isotrope Verfestigung mit sechs Stützpunkten angenähert. **Dabei werden in ANSYS Workbench im Gegensatz zu ANSYS Classic NICHT die Spannungen über der Gesamtdehnung aufgetragen! Es werden hier die Spannung über dem plastischen Dehnungsanteil aufgetragen, siehe Abbildung 6!** Als Stützpunkte des elastisch-plastischen Materialverhaltens wurden die Spannungsamplituden  $\sigma_a = 6/20R_m; 11/20R_m; 15/20R_m; 17/20R_m; 19/20R_m$  sowie  $R_m$  definiert. Die zugehörigen **plastischen** Dehnungsamplituden liefert die Ramberg-Osgood-Beziehung [6]

$$\varepsilon_{a,p} = \left(\frac{\sigma_a}{K'}\right)^{1/n'}. \quad (5)$$

Die für die Definition der zyklischen Spannungs-Dehnungskurve notwendigen Verfestigungsexponenten  $n'$  und -koeffizienten  $K'$  ergeben sich wieder aus dem UML [2], siehe Abbildung 3. Aufgrund der Einschränkung, dass die maximal auftretende Spannung die Zugfestigkeit des Werkstoffs nicht übersteigen darf, sind auch die plastischen Dehnungsanteile auf ca. 1 – 2% begrenzt.

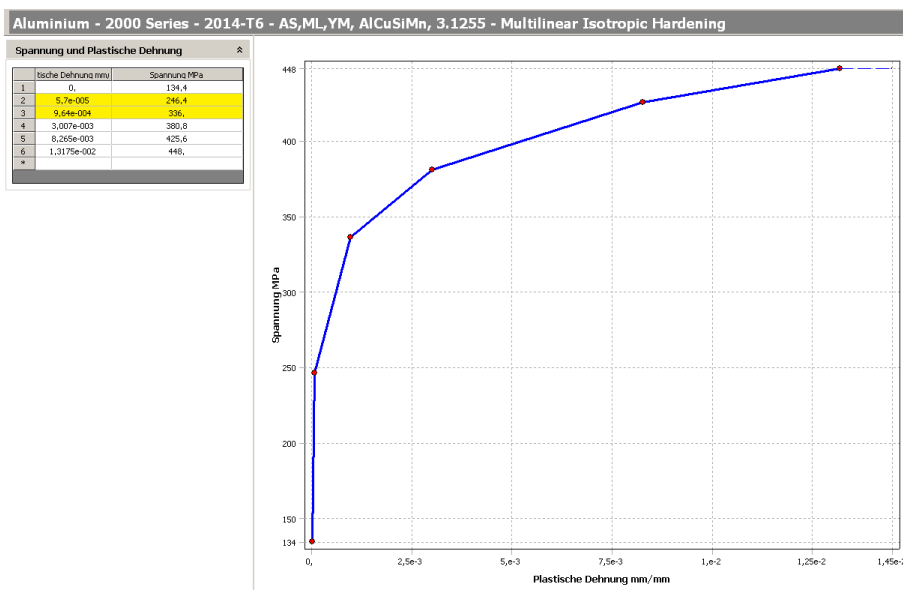
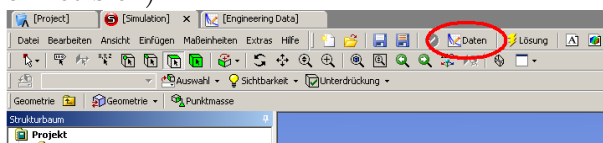


Abbildung 6: Eingabe der Stützpunkte zur Beschreibung des nichtlinearen Materialverhaltens (der zyklischen Spannungs-Dehnungskurve) nach dem Materialmodell der multilinear isotropen Verfestigung als **Spannung  $\sigma_a$  über plastischer Dehnung  $\varepsilon_{a,p}$** .

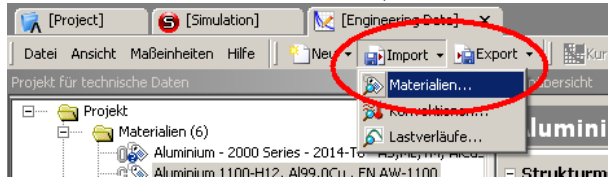
## 4 Installation der Datenbank

Zur Installation der Datenbanken sind folgende Schritte notwendig:

1. Workbench Simulation starten
2. auf Menüpunkt „Daten“ klicken (Registrierkarte „Engineering Data“ öffnet sich)



3. Im Menü „Import“ → „Materialien...“ auswählen (bestehende Materialdatenbank wird angezeigt)



4. Im sich öffnenden Fenster die Schaltfläche „Hinzufügen“ anklicken und über „Durchsuchen“ die Speicherquelle der zu installierenden Materialdatenbank wählen.

## 5 Support/Hinweise

Hinweise:

Die zyklischen Kennwerte wurden mit Methoden nach dem Stand der Technik abgeschätzt. Der Autor erklärt hiermit den Ausschluss jeder Haftung für Schäden, die aus der Anwendung der abgeschätzten zyklischen Kennwerte entstehen können. Der Anwender hat zu entscheiden, ob die abgeschätzten zyklischen Kennwerte für seine Zwecke geeignet sind. Ihre Verwendung hat mit der notwendigen Sorgfalt zu geschehen.

Sollten Fragen offen geblieben sein, wenden Sie sich bitte an:

Fachhochschule Esslingen - Hochschule für Technik  
Fachbereich Maschinenbau  
Labor für Konstruktion und Simulation  
Dipl.-Ing.(FH) Stefan Einbock  
Kanalstr. 33  
73728 Esslingen  
Tel.: 0711/397-3184  
Fax.: 0711/397-3182.

## Literatur

- [1] Hänel, B.; Haibach, E.; Seeger, T.; Wirthgen, G.; Zenner, H.; Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen, (4., erweiterte Auflage), VDMA Verlag, 2002.
- [2] Bäuml, A.; Seeger, T.: Materials Data for Cyclic Loading, Supplement 1. Materials Science Monographs, 61. Amsterdam 1990.
- [3] Coffin, L. F. jr.: A Study of the Effect of Cyclic Thermal Stresses on a Ductile Metal. Trans ASME 76 (1954), S. 931-950.
- [4] Morrow, J.: Cyclic Plastic Strain Energy and Fatigue of Metals. In: Internal Friction, Damping and Cyclic Plasticity. 67th Meeting of American Society for Testing and Materials, ASTM STP 378, 1964, S. 45-87.
- [5] Manson, S.S.; Fatigue: A Complex Subjekt - Some Simple Approximations. Experimental Mechanics, 5, S. 193-226, 1965.
- [6] Ramberg, W.; Osgood W. R.: Description of stress-strain curves by three parameters. Tech. Rep. No. 902, NACA (1943).
- [7] Neuber, H.: Über die Berücksichtigung der Spannungskonzentration bei Festigkeitsberechnungen, Konstruktion 20, H.7, S. 245-251, 1968.
- [8] Basquin, O.H.: The exponential law of endurance tests. Proc. ASTM 10 (1910), S. 625-630.
- [9] Gudehus, H.; Zenner, H.: Leitfaden für eine Betriebsfestigkeitsrechnung, Empfehlung zur Lebensdauerabschätzung von Maschinenbauteilen (4. Auflage). Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf 1999
- [10] Haibach, E.; Betriebsfestigkeit - Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung (zweite Auflage). Springer- Verlag 2002.