

Erzeugung und Konsolidierung von Werkstoffmodellen für unterschiedliche CAE-Werkzeuge

Thies Marwitz, Christopher Schaak, Uwe Diekmann (Matplus GmbH)

Abstract

Materialkarten unterschiedlicher CAE-Werkzeuge unterscheiden sich teilweise deutlich - auch bei an sich gleichen Inhalten, z.B. für die Beschreibung von Plastizität und Versagen. Werden Materialkarten als individuelle Dateien für die jeweiligen Zielsysteme bereitgestellt, sind ein Vergleich und eine Konsolidierung nur schwer möglich. Demzufolge wird die Werkstoffphysik für einen Werkstoff bei unterschiedlichen Solvern inkonsistent abgebildet. Dies hat Auswirkungen auf die Konsistenz der Berechnungsergebnisse unterschiedlicher Teams mit ihren verschiedenen Werkzeugen. Ziel ist daher die systemübergreifende Schaffung einer Übertragbarkeit und Kompatibilität der spezifischen Modelle.

Mit Matplus EDA® steht eine übergreifende Integrationsumgebung für Werkstoffinformationen zur Verfügung. Ergebnisse aus Werkstoffprüfungen und -simulationen werden zusammen mit allgemeinen Materialkennwerten und Modellbeschreibungen in einem sogenannten Mastermodell konsolidiert. Dieses Mastermodell beinhaltet die übergreifende und rückverfolgbare Datenbasis für den dynamischen Export konsistenter Materialkarten für unterschiedliche CAE-Zielsysteme.

Mit EDA® kann der Prozess von der Werkstoffdatenermittlung, über die Konsolidierung bis hin zur Modellierung von Plastizität, Versagen und anderen Phänomenen durch Nutzung flexibel konfigurierbarer Funktionen nachvollziehbar, versonierbar und jederzeit abrufbar abgebildet werden.

1 Einleitung

Die Nutzung von CAE-Werkzeugen zur numerischen Simulation erfordert Werkstoffinformationen, die üblicherweise Solver-spezifisch in sogenannten Materialkarten bereitgestellt werden. Die Materialkarten beschreiben z.B. das Festigkeitsverhalten und das Versagensverhalten des jeweiligen Materials, entweder als mathematische Formeln oder als numerische Fließkurven. Dabei ist der Umfang der Werkstoffinformationen für verschiedene Simulationsanwendungen unterschiedlich – es existieren somit mehrere Materialkarten bereits für ein Simulationssystem. Bei Verwendung mehrerer Simulationssysteme in einem Unternehmen gibt es jeweils weitere Materialkarten. Klassisch werden Materialkarten als Dateien gespeichert und über Dateisysteme bereitgestellt. Somit sind im Sinne eines Dokumentenmanagements eine Vielzahl von unterschiedlichen Dateien zu verwalten und konsistent zu halten. Die unterschiedlichen Notationsformen der Materialkarten erschweren einen direkten Vergleich, so dass für denselben Werkstoff je nach Solver in der Bezeichnung und Form (Einheiten) unterschiedliche Werkstoffinformationen bereitgestellt werden. Dazu kommen Herausforderungen, die mit der Ermittlung der Werkstoffeigenschaften zusammenhängen:

(a) Werkstoffbezeichnungen beziehen sich in der Regel auf Standards, die eine Streuung der Eigenschaften in Abhängigkeit von Variationen in der chemischen Zusammensetzung und der Prozessgeschichte zulassen. Die mechanischen Eigenschaften eines Werkstoffes ergeben sich nicht nur aus der Zusammensetzung, sondern insbesondere aus der Phasenzusammensetzung und Gefügestruktur, welche maßgeblich vom Herstellungs- bzw. Bearbeitungsprozess abhängig ist. Diese Varianzen werden in der CAE-Simulation meist nicht berücksichtigt. Oftmals werden nur unsichere Katalogwerte für (initiale) Struktursimulationen herangezogen.

(b) Werkstoffprüfungen zur Beschreibung des komplexen Werkstoffverhaltens sind häufig teuer und zeitaufwendig. Budget- und Zeitbeschränkungen führen dazu, dass solche teuren Aufgaben nicht statistisch abgesichert werden, so dass Materialkarten, die sich auf wenige Messungen stützen, ungenau sein können.

Das Speichern der Materialkarten als Datei in einem rudimentären Dateisystem oder auf dem Arbeitsplatzrechner des CAE-Ingenieurs macht eine spätere Nachvollziehbarkeit unmöglich. Im schlimmsten Fall wird innerhalb eines Unternehmens mit verschiedenen Versionen einer Materialkarte simuliert und abweichende Ergebnisse produziert. Es bedarf einer Rückverfolgbarkeit, welche den Ursprung und Hintergrund der enthaltenen Informationen sicherstellen. Zusätzlich muss eine effiziente, nachverfolgbare Revisionierung möglich sein, damit nicht mehrere Materialkarten für einen Werkstoff

mit unterschiedlicher Aktualität im Unternehmen kursieren. Wenn CAE-Systeme ihre Materialkarten nicht dynamisch und systemgestützt erhalten, wird ein geregeltes Dokumentenmanagement notwendig.

In den vorhergehenden Abschnitten wurden zwei Herausforderungen im Kontext der Materialkarte für CAE-Werkzeuge identifiziert:

(a) Das softwarespezifische Erzeugen von Materialkarten bzw. die darin enthaltenen Modelle und die Modellbildung basierend auf Werkstoffdaten und

(b) das Dokumentenmanagement von Materialkarten. Beide genannten Punkte sind systemkritisch, um effizient mit CAE-Werkzeugen zu arbeiten und belastbare Berechnungen zu generieren.

Das System EDA® der Matplus GmbH adressiert beide Herausforderungen und kann diese effizient lösen. EDA® ermöglicht, Berechnungsergebnisse aus der Werkstoffsimulation mit den Informationen aus der Werkstoffprüfung zusammenzuführen. Integrierte mathematische Funktionen unterstützen eine Modellbildung. Modelle, z.B. für Plastizität können über bi-direktionale Schnittstellen in die Zielformate unterschiedlicher CAE-Systeme exportiert werden. Darüber hinaus ermöglicht EDA® die Integration und Konsolidierung der Informationen aus dem gesamten Werkstoff-Lebenszyklus.

2 Werkstoffsimulation – Berechnete Materialkarten

Simulationswerkzeuge zur Vorhersage von Werkstoffeigenschaften sind eine Möglichkeit, diesen Herausforderungen ohne stark erhöhten Prüfaufwand zu begegnen. Insbesondere die Berechnung von Daten der Strukturmetalle ist unter Verwendung von CalPhad („**C**al**P**had „**C**al**C**ulation of **P**hase **D**iagrams“) und der JMAK-Gleichung („**J**ohnson-**M**ehl-**A**vrami-**K**olmogorow“) zusammen mit weiteren empirischen und physikalisch basierten Modellen Stand der Technik. Durch die Variation der freien Parameter der Werkstoffeigenschaften und Verfahrensparameter wird ein Testfeld aufgespannt, dessen Punkte jeweils Simulationen mit einem definierten Parametersatz anstoßen. Hierbei ist die Erzeugung von mehreren tausend Simulationen möglich und sinnvoll. Das Ergebnis jeder einzelnen Simulation liefert die Werkstoffkennwerte für die entsprechende Parametrisierung und erlaubt eine vergleichende Bewertung des Einflusses der Variationen auf die resultierenden Werkstoffkennwerte. Moderne Simulationstools wie z.B. JMatPro® ermöglichen einen direkten Export der berechneten Ergebnisse für viele CAE-Werkzeuge. [GUO10].

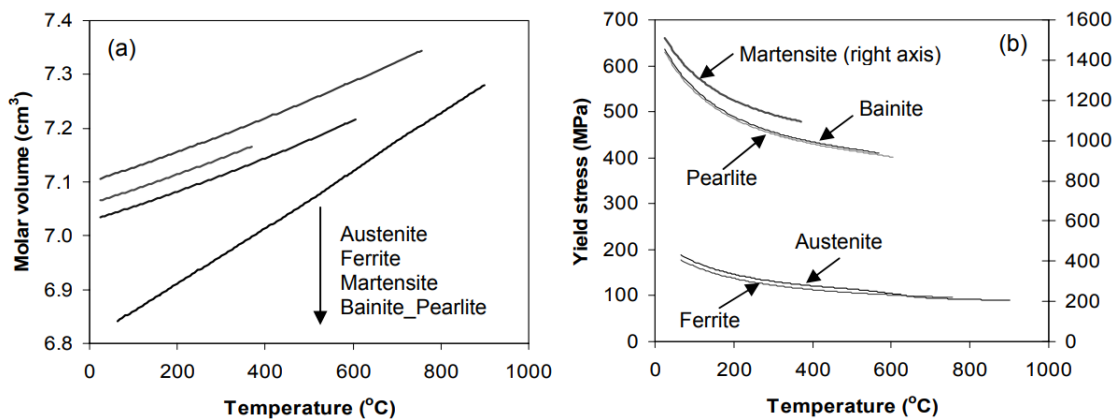


Abbildung 1: Beispielhafte synthetische Werkstoffdaten für die Warmumformung von 22MnB5 [guo10]

Eine Kombination dieser synthetischen Werkstoffdaten mit Daten aus Werkstoffprüfungen wird zur Validierung, Kalibrierung und Extrapolation der Daten verwendet. Hierbei kommen beispielsweise Werkstoffmodelle für die Plastizität, wie Johnson-Cook [JO83] und Hensel-Spittel [HE78] sowie für das Fitting verschiedene Optimierer, wie die Nelder-Mead-Methode oder Powell-Methode zum Einsatz [BS13]. Durch die Vielzahl an möglichen Herkunfts- und Informationsquellen (Werkstoffprüfung & Simulation) von Materialkarten und die Vielzahl von verschiedenen anwendungsabhängigen Formaten der Materialkarten entsteht ein hoher Aufwand für deren Erstellung und Verwaltung.

3 Konsolidieren von Werkstoffinformationen

Um Werkstoffe und ihre Eigenschaften digital und in CAE-Werkzeugen für numerische Simulationen nutzen zu können, werden Werkstoffmodelle benötigt, die physikalische Materialeigenschaften beschreiben. Sie können als eine konstitutive Gleichung oder als diskrete Kurvenscharen abgebildet

werden und in Solver-spezifische Materialkarten umgewandelt werden. Die verschiedenen Solver verwenden verschiedene Formate und Einheitensysteme für die Eingabe- und Ausgabedateien. Typische Beispiele sind Modelle für das Materialversagen, um eine Schädigungsvorhersage zu ermöglichen oder Modelle für die Plastizität, um die Umformgrenzen genauer zu definieren bzw. zu untersuchen. Andere Modelle, ebenfalls für numerische Simulationen im Umfeld von Elektromotoren, beschreiben magnetische (Verlust-) Eigenschaften von Werkstoffen (z.B. Eisenverluste nach Bertotti [LE20]). Werkstoffmodelle können auf mikrostrukturellen, physikalischen oder phänomenologischen Ansätzen basieren und beschreiben die Realität konvergent. Qualifiziert wird die Genauigkeit bzw. Beschreibungsqualität anhand der Abweichung zwischen Simulationsergebnis und realen Messwerten. Die Komplexität des Modells hängt im Wesentlichen von den berücksichtigten Einflussgrößen bzw. Parametern ab, beispielsweise sind beim Materialversagen (Zugversuch) signifikante Einflussgrößen: Belastungsart, Orientierungen, Dehnraten und Temperatur. Bei der Modellbildung ist von besonderer Bedeutung, dass das Modell stabil und damit prädiktiv ist sowie im Idealfall eine hohe Beschreibungsqualität hat. Herausfordernd wird dies insbesondere bei mehrdimensionalen Modellen.

3.1 Mastermodell und Anwendungsmodell

Die Werkstoffdaten werden mittels Matplus EDA® in einem Werkstoffmastermodell konsolidiert. Dieses Mastermodell ist als homogene Informationsquelle für verschiedene Solver unterschiedlicher Hersteller konzipiert. Die Idee hinter dem Mastermodell ist die Definition eines universellen Stammdatenmodells, das alle erforderlichen Eigenschaften und Attribute in durchgängigen und vergleichbaren Einheiten in Abhängigkeit von verschiedenen Standards enthält und folglich immer konsistent ist. Das zugrundeliegende Datenmodell bestehend aus Eigenschaften, Einheiten, konstitutiven Gleichungen und Umrechnungsfaktoren ist administrativ unbeschränkt erweiterbar. Alle Daten werden in einem offenen und lesbaren JSON-Format gespeichert – es gibt keine proprietäre und/oder binäre Datenstrukturen. So können auch parametrische Datenfelder abgebildet und in der Datenbank mit Metadaten abgelegt werden. EDA® ermöglicht zudem die dynamische Visualisierung der Datenfelder (z.B. mit VEGA Visualisierung) und damit die einfache Vergleichbarkeit der Modellierungsergebnisse sowie Mastermodelle.

Mit Hilfe von konfigurierbaren Mapping-Tabellen ist es möglich, Anwendungsmodelle zu erstellen, die die spezifischen Informationen für den jeweiligen Solver bzw. die numerischen Simulationen enthalten. Über die Mapping-Tabellen werden die konsolidierten Daten und gemeinsame, sowie spezifische Parameter in Solver-spezifische Bezeichnungen, Formate und Einheitensysteme umgewandelt. Anwendungsmodelle sind somit spezifische Untermengen des Mastermodells. Abbildung 2 verdeutlicht diesen Zusammenhang grafisch.

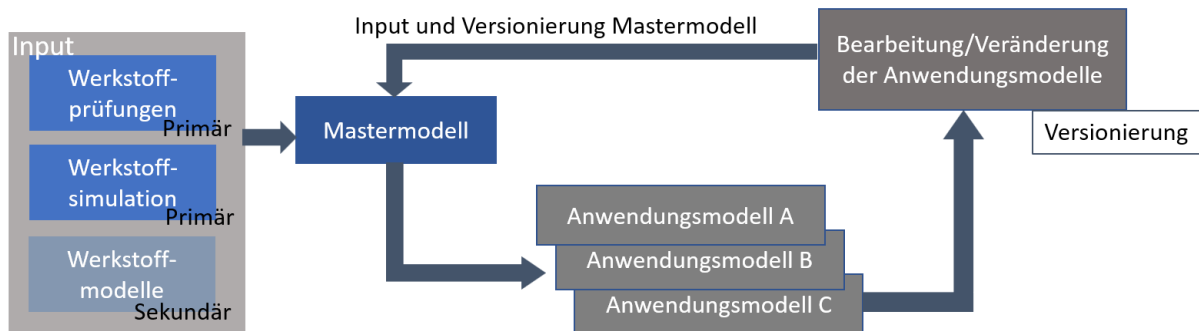


Abbildung 2: Beschreibung der Strukturbeziehung zwischen Mastermodell und Anwendungsmodell

Für die Erstellung des Mastermodells in EDA® können unterschiedliche Datenquellen herangezogen werden: Daten aus der Werkstoffsimulation und Werkstoffprüfdaten als primäre Quellen sowie bereits bestehende Werkstoffmodelle als sekundäre Quelle (Abbildung 2). Basierend auf den aus dem Mastermodell abgeleiteten Anwendungsmodellen können die Materialkarten exportiert werden. Überdies können vorhandene Materialkarten der CAE-Werkzeuge in EDA® importiert und in ein Mastermodell überführt werden, so dass eine Konsolidierung erreicht und eine gemeinsame Basis für gleiche Materialien unterschiedlicher CAE-Werkzeuge gebildet werden kann.

3.2 Werkstoffmodellierung in EDA®

Im Folgenden wird die Werkstoffmodellierung in EDA® anhand von Fließkurven beispielhaft beschrieben. Der Prozess besteht aus:

- Import von Daten aus der Werkstoffprüfung, Werkstoffsimulation oder bereits bestehenden Materialkarten in die EDA® Integrationsumgebung,
- Integrierte Datenverarbeitung und -harmonisierung,
- Kurvenanpassung (Curve-Fitting) an konstitutive Gleichungen,
- Parametrisierung der Modelle.

Es ist hervorzuheben, dass der gesamte Workflow im erweiterbaren EDA®-System erfolgt und auf externe Hilfsprogramme, wie Tabellenkalkulationen und Visualisierungswerkzeuge verzichtet werden kann. EDA® bietet alle Möglichkeiten der SciPy-Bibliothek [BS13] sowie erweiterbare mathematische Funktionen.

Der Prozess der Werkstoffmodellbildung für Fließkurven startet in EDA® mit dem Import der Rohdaten, z.B. aus dem Zugversuch. EDA® bietet verschiedene Importfunktionen, um Daten direkt von Prüfmaschinen zu übernehmen und in das JSON-Format zu überführen. Die Rohdaten können in EDA® visualisiert werden und mittels verschiedener Funktionen ein Glätten und optionale Datenreduktionen durchgeführt werden. Beispielsweise kann mittels Resampling die Anzahl der Messpunkte auf eine effiziente, handhabbare Anzahl minimiert werden, sowie Mittelwertkurven erstellt werden. Der Algorithmus für das Resampling ist so programmiert, dass wesentliche Informationen nicht verloren gehen (z.B. Obere- / Untere Streckgrenze bei ausgeprägter Lüdersdehnung). Darüber hinaus kann mittels integrierter Funktionen beispielsweise die Wahre Spannung berechnet werden (vgl. Abbildung 3). Die in EDA® bereitgestellten Funktionen für die Datenaufbereitung können durch kundenspezifische, sogenannte Plugins in der Sprache Python erweitert werden.

Mit den so aufbereiteten Rohdaten als technische und wahre Spannungs-Dehnungskurve ist eine schlanke Modellierung von Werkstoffeigenschaften in EDA® möglich.

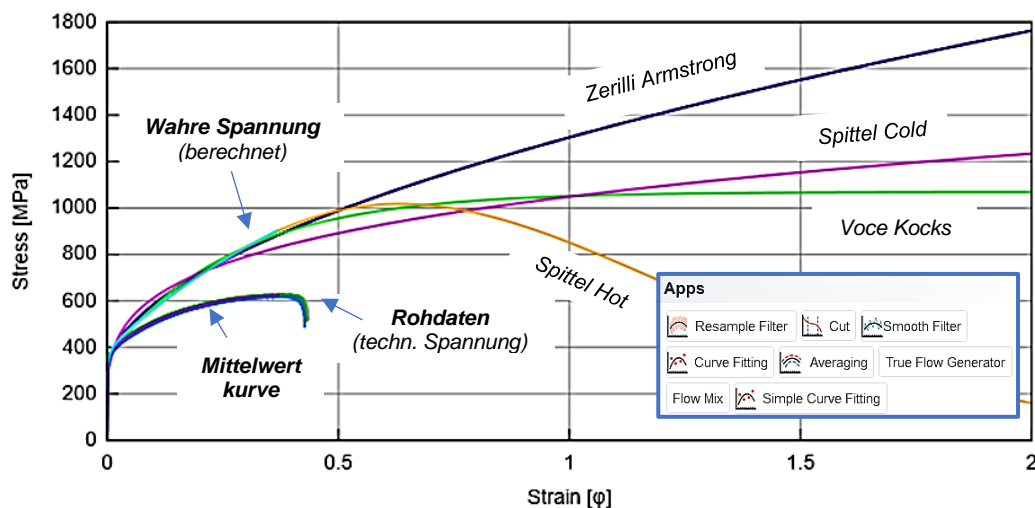


Abbildung 3: Vergleich verschiedener Werkstoffmodelle für das Fließverhalten basierend auf der wahren Spannung. Die wahre Spannung wurde aus einer Mittelwertkurve berechnet.

3.3 Curve Fitting

Das „Curve-Fitting“ ist der Prozess der Konstruktion einer Kurve oder mathematischen Funktion, die am besten zu einer Reihe von Datenpunkten passt. Basis bilden empirische oder physikalische Modelle aus der Literatur für die jeweilige vorliegende Materialeigenschaft. EDA® nutzt die SciPy-Minimierungsbibliothek [BS13], so dass eine Reihe von Algorithmen für die Kurvenanpassung zur Verfügung stehen.

Das Mastermodell für metallische Strukturwerkstoffe bezieht sich hauptsächlich auf die Plastizitätswerkstoffmodelle. Verschiedene Modelle können hierzu ausgewählt werden, um die Plastizität auf unterschiedliche Weise zu modellieren (Abbildung 3). Abbildung 4a/b und Abbildung 5a/b zeigen hierzu den Workflow in EDA®. Experimentelle Daten können ausgewählt werden und dann mit beliebigen Funktionen modelliert werden. Die Funktionen können selbst erstellt sowie parametrisiert werden und ebenfalls in EDA® als Objekt gespeichert und organisiert werden. Die Objekte in EDA® basieren auf verschiedenen Typen, die an unterschiedliche Funktionen gekoppelt sind. Über den Typ „fitting_function“ kann eine beliebige Funktion gebildet werden.

a) Organisieren von experimentellen Daten, simulierten Daten und modellierten Kurven



b) Definieren und parametrisieren von mathematischen Modellen – Ändern der Werte und Parameter

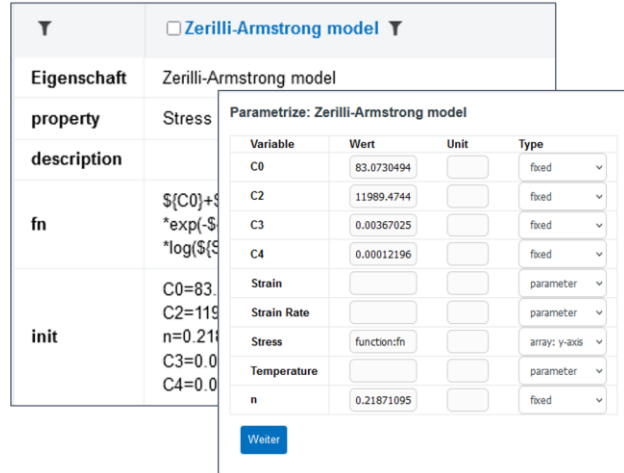
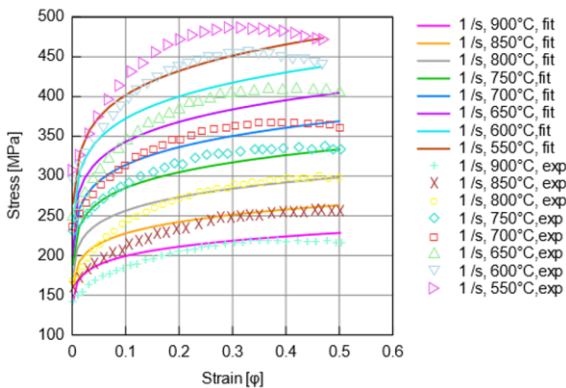


Abbildung 4: Organisation der Baumstruktur und Parametrisierung von Werkstoffmodellen

Die Werte der Parameter und die Art der Funktionsbestandteile, ob Parameter, Konstante oder Wertebereich, kann über die typenspezifische Funktion „Parametrize“ (Abbildung 4b) konfiguriert werden. Alle definierten Funktionen können zum „Curve Fitting“ verwendet werden und bezogen auf die experimentellen Daten verglichen werden. Die Werte der Funktion sind jederzeit anpassbar und können so modifiziert werden, dass das Modell mit den experimentellen Werten konvergiert. Wird eine Funktion ausgewählt (z.B. Zerilli-Armstrong [ZE87], Abbildung 4b) können verschiedenen Minimierungsalgorithmen verwendet werden, um die Modelle auf die Messdaten anzupassen und so die Funktionsvariablen zu bestimmen. Abbildung 5a zeigt ein Curve-Fitting nach Johnson-Cook in Abhängigkeit der Temperatur und Dehnrates. Es ist offensichtlich, dass die Beschreibungsqualität des Modells stark von der Temperatur abhängt. Für höhere Temperaturen erscheint das Modell eine bessere Beschreibungsqualität aufzuweisen als für niedrige Temperaturen. Um diesen Eindruck zu quantifizieren, berechnet EDA® automatisch eine Abweichung nach der Methode der kleinsten Quadrate. Dieser schlanke Workflow ermöglicht den schnellen Test verschiedenster Werkstoffmodelle und den anschließenden quantitativen Vergleich. Zusätzlich können verschiedene Minimierungsmethoden aus der SciPy-Bibliothek verglichen werden, da die verwendeten Methoden ebenfalls einen Einfluss auf das Ergebnis haben können.

a) Grafische Darstellung und Vergleich der experimentellen und modellierten Fließkurven anhand von Johnson-Cook mit Dehnrates und Temperatur als dynamische Parameter



b) Export der CAE-neutralen modellierten Kurven/Werte in verschiedene CAE-Formate – gesteuert über Mapping-Tabellen

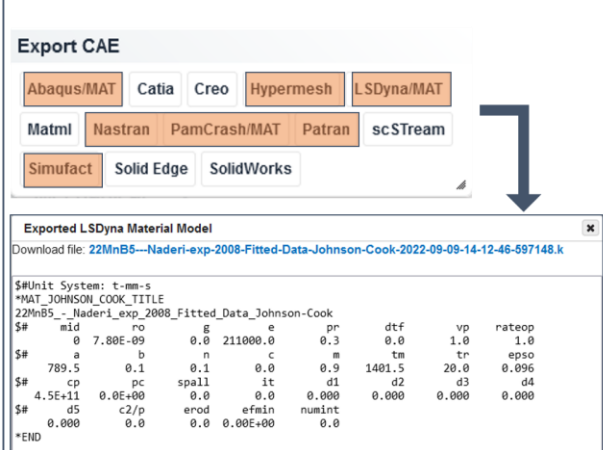


Abbildung 5: Curve-Fitting und Export von Materialkarten in EDA®

3.4 Dokumentenmanagement und Export von Materialkarten

Nach Erstellung des Werkstoffmodells auf Basis der aufbereiteten Daten können, wie in Abbildung 5b dargestellt, verschiedene Exporter (CAE und CAD) genutzt werden, um die konsolidierten und modellierten Daten in unterschiedlichen Formaten den CAE-Werkzeugen zur Verfügung zu stellen (Tab. 1). Grundsätzlich werden die Modelle systemübergreifend mit den gleichen Funktionsparametern,

wie Temperatur oder modellspezifischen Funktionskonstanten, im systemspezifischen Format abgebildet. Teilweise gibt es Unterschiede in den Bezeichnungen der Parameter oder es wird wie bei Pam-Crash (ESI Group) eine vereinfachte Form des Johnson-Cook Modells [JO83] verwendet (nicht Dehnungsratenabhängig). Die unterschiedlichen Ansätze sind, aufgrund der gemeinsamen Benennung der Parameter/Konstanten aller Funktionsbestandteile in EDA®, in alle entsprechenden Materialkarten übertragbar.

Tabelle 1: Übersicht der erweiterbaren CAE- und CAD-Interfaces

| CAE-Schnittstellen | | CAD-Schnittstellen | |
|--------------------|-------------|--------------------|----------------------|
| • Abaqus | • Pam-Crash | • Catia V5 | • Siemens NX |
| • ANSYS Workbench | • HyperMesh | • Creo | • Siemens Teamcenter |
| • LS-Dyna | • Patran | • Solid Works | • Siemens SolidEdge |
| • Simufact | | | |

Die Schnittstelle dafür wird über die Mapping-Tabellen hergestellt, die ebenso als JSON-Strukturen vom Administrator angepasst werden können. Für den Export werden die Attribute der Modellfunktionen in die jeweilige Bezeichnung der Materialkarte zusammen mit den geforderten Einheiten übersetzt. Die Mapping-Tabellen ordnen vereinfacht einem Attribut aus EDA® mehrere mögliche Bezeichnungen zu und ermöglichen je nach Wahl der zu exportierenden Materialkarte die Übersetzung. So kann auch bei Versionierung und Änderung der werkzeugspezifischen Auslegung der Materialkarten durch Anpassung der Mapping-Tabellen schnell und einfach reagiert und eine homogene Parametrisierung erzielt werden. Ergibt sich bei der Optimierung der Materialkarte und deren Parametern in der Simulation ein Modell mit besserer Beschreibungsqualität, so kann die Materialkarte nach EDA® zurückgeführt und das entsprechende Material nachvollziehbar revisioniert werden. Demzufolge können die Materialkarten in EDA® analog einem Dokumentenmanagement, aufgrund der Revisionshistorie und dem vorhergehenden Prozess der Masterwerkstoffmodellierung und -konsolidierung, organisiert und der Entstehungsprozess nachvollzogen werden.

Die Materialkarten der CAE-Werkzeuge werden in bestimmten anwender- und systemspezifischen Einheitensystemen genutzt. In EDA® werden die Einheiten konsistent dargestellt und mithilfe der Mapping-Tabellen und internen Umrechnung in die jeweiligen zuvor definierten Einheitensysteme der Werkzeuge ausgeleitet.

4 Schlussfolgerung

Konsistente Werkstoffdaten aus Werkstoffprüfung und Werkstoffsimulation gewinnen an Bedeutung. Mit der Integrationsumgebung für Werkstoffinformationen Matplus EDA® können die spezifischen Herausforderungen im Umgang mit Werkstoffmodellen und Materialkarten für CAE nachhaltig erweiterbar gelöst werden. Zum einen können mit Hilfe von EDA® die Daten und Informationen aus Labor und Werkstoffsimulation konsolidiert und der Datenursprung langfristig und zentral nachvollzogen werden. Zum anderen können effizient und einfach Werkstoffmodelle erstellt und in Form von Mastermodellen universell gespeichert werden. Die offene und erweiterbare Struktur von EDA® erlaubt es aus dem Mastermodell Materialkarten in beliebigen Formaten zu generieren und/oder über REST-Schnittstellen bereitzustellen. Darüber hinaus bietet EDA® ein vollständiges, unternehmensweites und erweiterbares Wissensmanagement für Werkstoffe.

5 Referenzen

- [BS13] F. J. Blanco-Silva: Learning SciPy for numerical and scientific computing. Packt publishing Birmingham, 2013.
- [DI20] U. Diekmann, N. Herzig, J. Boll, R. Ufer, P. Rostami, I. Alperovich, T. Alder, S. Rzepa: Towards Integration of Advanced Material Models into PLM, ME-FORM 2020, 2020.
- [GUO10] Z. Guo, G. Kang, N. Saunders, Modelling of Materials Properties Used for Simulation of Hot Stamping. Steel Research International. (2010). 81. 892-895.
- [HE78] A. Hensel, T. Spittel: Kraft- und Arbeitsbedarf bildsamer Formgebungsverfahren, Verlag Grundstoffindustrie, 1978.
- [JO83] G.R. Johnson, W.H. Cook: Proc. 7th Int. Symp. Ballistics, Netherland, 1983, S. 541.
- [LE20] N. R. Leuning: „Tailor-Made“ Elektrobänd und bestmögliche Werkstoffauswahl auf Basis struktureller Materialparameter.
- [MA15] T. Mayer; D. Ringhand; S. Barth: Schädigungsvorhersage mit dem Johnson-Cook-Modell, 2015.
- [ZE87] F.J. Zerilli, R.W. Armstrong: Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations, J. Appl. Phys. 61, 1987, 1816-1825.