

Visualisierung in der FEM mittels Python Results

Kunststoffgerechte Bauteilauslegung in 3D

Der Einsatz von kunststoffgerechten Auslegeverfahren ist aufgrund der zunehmenden Verwendung in hochbeanspruchten Bauteilen unumgänglich. Um die Auswertung der aufgrund der komplexen Polymermechanik aufwendigen Auslegeverfahren zu erleichtern, bietet sich die Visualisierung direkt in der FEM an. Durch die Verwendung von Python Results in Ansys Mechanical ist dies möglich und führt so zu einer intuitiven, reproduzierbaren und kunststoffgerechten Beurteilung der Tragsicherheit.

Elia Jenni¹
Mario Studer²

Kunststoffe sind so beliebt wie noch nie. Die weltweite Produktionsmenge hat sich in den letzten 20 Jahren auf rund 400 Mio. t (2021) verdoppelt [1] und auch das Einsatzgebiet wird immer vielfältiger. Neben dem weiterhin dominanten Gebrauch im Verpackungssektor werden Kunststoffe auch vermehrt in hochbeanspruchten Bauteilen eingesetzt. Grund dafür ist die gezielte Nutzung der Eigenschaftsvielfalt, welche eine anwendungsbezogene, belastungs- und herstellungsgerechte Produktentwicklung ermöglicht. Aspekte wie Designfreiheit, Funktionsintegration und Gewichtseinsparung fließen als zusätzliche Vorteile der Kunststoffe in die Werkstoffwahl ein.

Mit dem Einsatz in hochbeanspruchten Bauteilen gewinnt auch die FE-Analyse und somit die Modellierung von Kunststoffen zunehmend an Bedeutung. Aufgrund der komplexen Polymermechanik ist die Formulierung eines Werkstoffmodells mathematisch jedoch sehr anspruchsvoll und bis anhin kein allumfassendes Modell vorhanden. Dies führt zu einer vorwiegend phänomenologischen Modellierung, welche auf den verwendeten Kunststofftyp und Lastfall begrenzt ist und auf deren Einsatz aufgrund des hohen experimentellen Aufwandes meist verzichtet wird. Umso wich-

tiger ist somit die Berücksichtigung der kunststoffspezifischen Eigenschaften bei der Bauteilauslegung durch die Wahl eines geeigneten Auslegeverfahrens.

Kunststoffmechanik

Aufgrund ihrer makromolekularen Struktur besitzen Kunststoffe spezifische Eigenschaften, die sie teilweise stark von anderen Werkstoffklassen wie Metallen unterscheidet. Kunststoffe bestehen aus einer Vielzahl von ineinander verknäuelter Molekülketten mit mehr oder weniger starkem Zusammenhalt zwischen den Ketten. Dieser Zusammenhalt ist vom Abstand der Molekülketten, dem Valenzwinkel sowie dem Ordnungszustand (Entropie) abhängig und kann durch eine Vielzahl an Umgebungsgrößen beeinflusst werden. So haben Temperatur, Feuchte, Belastungszeit, Belastungsgeschwindigkeit wie auch Belastungsart je nach Kunststoff einen entscheidenden Einfluss auf den Zusammenhalt der Molekülketten und so auf das mechanische Verhalten des Kunststoffs.



Prof. Dr. Mario Studer (Bild: IWK)

Versagensarten (quasi-)statischer Lastfälle

Der kettenartige Aufbau ist auch bei der Beschreibung der Versagensarten entscheidend. Im Falle einer (quasi-)statischen Belastung werden drei Versagensarten unterschieden: Rissbildung, Verstreckung und Bruch. Dabei kann der Bruch als Aufbre-

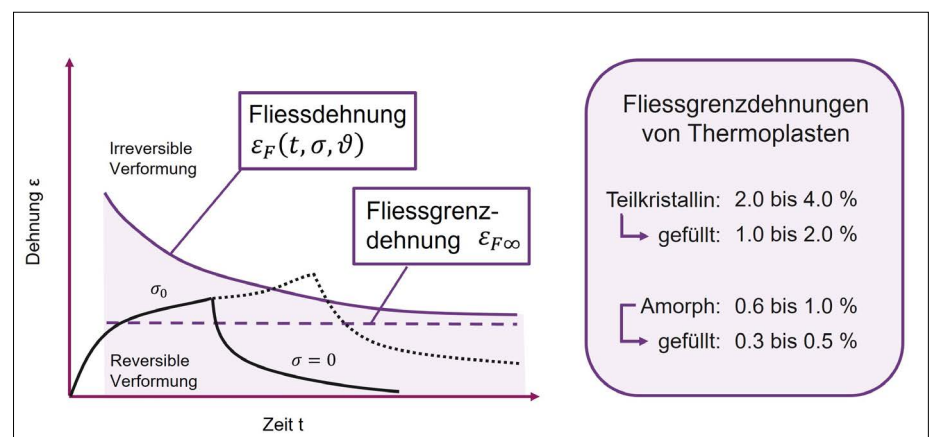


Bild 1: Fließdehnung in Abhängigkeit von Zeit, Spannung und Temperatur sowie Fließgrenzdehnung als Asymptote (schematisch) mit pauschalen Richtwerten für unterschiedliche Kunststoffgruppen. (Bild: IWK in Anlehnung an Kunz [3])

¹ wissenschaftlicher Mitarbeiter,
IWK Institut für Werkstofftechnik und
Kunststoffverarbeitung, Rapperswil

² Fachbereichsleiter Simulation & Design,
IWK Institut für Werkstofftechnik und
Kunststoffverarbeitung, Rapperswil

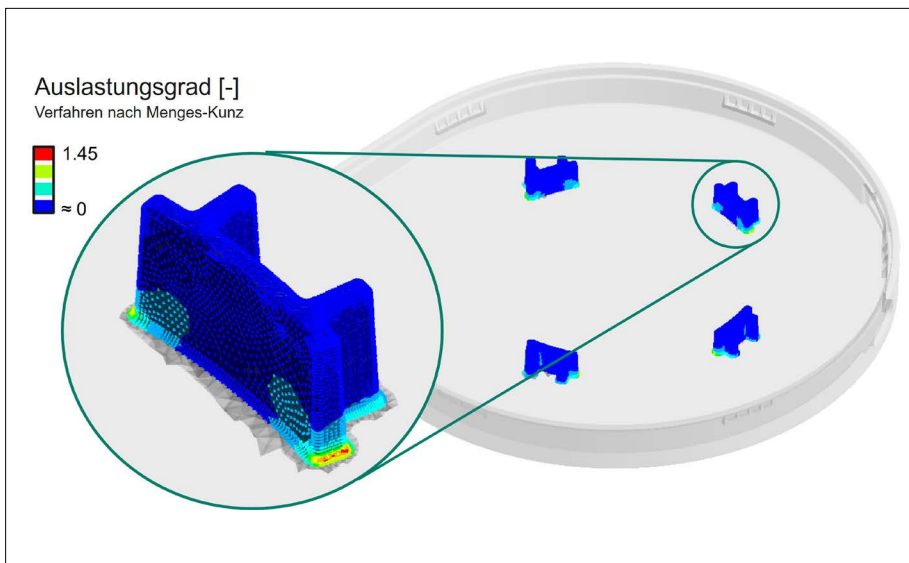


Bild 2: Visualisierter Auslastungsgrad einer kontaktlosen Handyladestation aus PC-ABS bei der Auslegung nach Menges und Kunz. (Bild: IWK)

chen oder Zerreißen der Molekülketten betrachtet werden und beschreibt das finale Versagen des Kunststoffes. Liegen Kunststoffe mit zähem Verhalten vor, geht dem Bruch eine mehr oder weniger grosse Ver Streckung voraus, die als Abgleiten oder Ausziehen der Molekülketten verstanden werden kann. Bevor diese makroskopischen Versagensmechanismen auftreten, kommt es durch kleinste Überdehnungen der Molekülketten bereits zu irreversiblen Schädigungen im Mikrobereich. Diese kleinen Verformungen und Kerben wirken als Rissursprung und sind somit insbesondere bei langzeitbelasteten Bauteilen kritisch.

Aus den Mechanismen der Versagensarten geht hervor, dass die Dehnungen eine übergeordnete Rolle spielen. So sind es die Überdehnungen der Molekülketten, die Schäden im Material induzieren und bei der Auslegung von Kunststoffen berücksichtigt werden sollten. Je nach abzugrenzender Versagensart ist jedoch ein unterschiedlicher Kennwert für die Beschreibung der zulässigen Materialgrenze zu wählen. Zu den verbreiteten Größen gehören die Bruch- und Streckdehnung sowie die Fließdehnung, welche die Linearitätsgrenze beschreibt und der Auslegung gegen Rissbildung entspricht. Aufgrund zeitintensiver Messmethoden kaum bekannt ist hingegen die Fließgrenzdehnung. Dieser Materialgrenzwert ist weitgehend unabhängig von Temperatur, Zeit, Spannungszustand, Umgebungsmedium etc. und kann näherungsweise als Dauer-

festigkeit des Kunststoffes betrachtet werden. [2]

Kunststoffgerechte Auslegeverfahren

Neben der Wahl eines geeigneten Materialgrenzwertes wird bei der kunststoffgerechten Auslegung versucht, die verschiedenen Umgebungseinflüsse mit Hilfe von passenden Einflussfaktoren abzubilden. Dabei unterscheidet sich die Vorgehensweise teilweise deutlich, was anhand der folgenden zwei Ansätze für die Auslegung von unverstärkten oder kurzfaserverstärkten Thermoplasten für (quasi-)statische oder mehrmalige Belastungen aufgezeigt werden soll.

Auslegung nach Oberbach auf Basis belastungsadaptierter Spannungs-Dehnungs-Diagrammen [4]

Die Auslegung nach Oberbach setzt den Schwerpunkt auf den Einfluss der Belastungsart und benötigt die Spannungs-Dehnungs-Kurve eines unter Einsatzbedingungen durchgeführten Zugversuchs als Grundlage für die Auslegung. Die Materialkennlinie wird mit den gewünschten Spannungs-Dehnungsgrenzwerten, z. B. der Streckgrenze, normiert und anschliessend für die Normierung des E-Moduls verwendet. Der normierte E-Modul gibt nun Aufschluss über die Verformungsfähigkeit des Werkstoffs und bestimmt so die weiterführende Differenzierung der Belastungsart. Unterschieden werden kurzzeitig, kurzzei-

tig mehrmalig (mit genügend Erholung zwischen den Zyklen), langfristig mit Relaxation und langfristig mit Retardation. Des Weiteren wird der Einfluss von Bindenähten anhand pauschaler, nach Kunststoffgruppen differenzierter Einflussfaktoren berücksichtigt. Zusammen mit einem Sicherheitsfaktor wird so der zulässige Spannungsgrenzwert definiert, welcher in der Auslegung berücksichtigt wird.

Auslegung nach Menges und Kunz auf Basis von Dehngrenzen [3]

Durch die Wahl der Fließgrenzdehnung als Materialgrenzwert ist die Auslegung nach Menges und Kunz sehr konservativ und wird meist mit einem Sicherheitsfaktor von 1.0 eingesetzt. Nichtsdestotrotz werden die verschiedenen Einflussfaktoren sehr umfangreich betrachtet, wobei eine Wechselwirkung untereinander vernachlässigt wird. Berücksichtigt wird der temperaturabhängige Einfluss der Belastungszeit sowie der nachteilige Effekt von Füllstoffen über empirische Formeln. Ergänzt werden pauschale, nach Kunststoffgruppen differenzierte Richtwerte für den Einfluss von Medien und Bindenähten. Ausgehend von der Fließgrenzdehnung, die meist über einen Richtwert für den zugehörigen Kunststofftyp angenähert wird, entsteht so ein an den Lastfall und die Umgebung angepasster zulässiger Materialgrenzwert.

In der Auslegung nach Menges und Kunz werden durch die Verwendung der Grösstdehnungshypothese (GDH) nach Navier [5] auch die Belastungen kunststoffgerecht betrachtet. Mit der Berücksichtigung der maximalen Hauptdehnung wird die höhere Sensibilität von Kunststoffen bezüglich Zugbelastungen berücksichtigt und eine Auslegung rein mit Dehnungswerten ermöglicht.

Implementierung in Ansys mittels Python Result

Aufgrund der Unterscheidung zwischen Druck- und Zugbelastung sowie den komplexen empirischen Formeln einiger Einflussfaktoren wird für die Durchführung der kunststoffgerechten Auslegung vorzugsweise eine leistungsfähige Umgebung eingesetzt. Solch eine geeignete Umgebung konnte durch die Schnittstelle zwischen Python und Ansys direkt in der

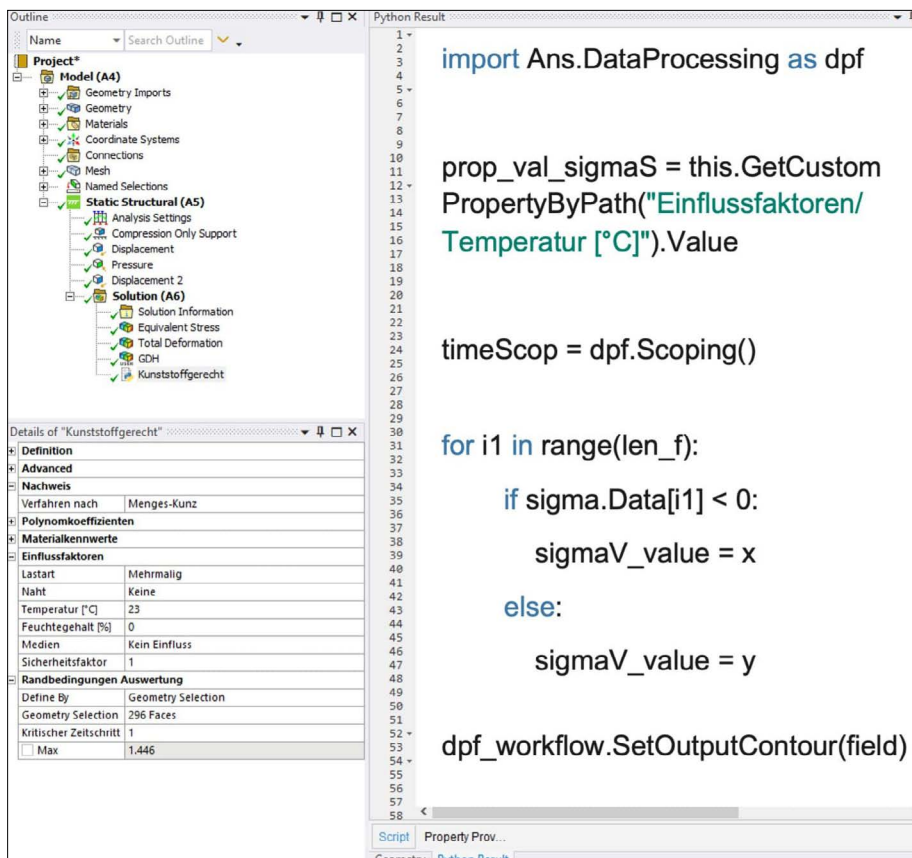


Bild 3: Aufbau eines Python Results. (Bild: IWK)

FE-Analyse geschaffen werden. Durch sogenannte Python Results wird dem Anwender eine individuelle und effiziente Bearbeitung der FE-Ergebnisse ermöglicht und dank der Visualisierung des Auslastungsgrades am Bauteil auch die Beurteilung der Tragsicherheit erleichtert (Abb. 2).

Data Processing Framework [6]

Ausschlaggebend für die effiziente Bearbeitung der grossen Datenmengen einer FE-Analyse ist der Umgang mit Datenfeldern. Mit dem Zugriff auf das Data Processing Framework (DPF) ist in den Python Results ein geeigneter und von der Physik des Solvers unabhängiger Rahmen vorhanden. Das DPF ermöglicht die Nutzung einer Vielzahl an zugeschnittenen Operatoren für die tensorielle Bearbeitung von Datenfeldern, welche eindeutig einer Geometrie und einem Zeitschritt zugewiesen sind und die Ergebnisse pro Knoten beinhalten. Aus der Bearbeitung und Kombination dieser Datenfelder resultieren zahlreiche benutzerspezifische Ergebnisse, welche mit Hilfe des Python Results direkt am Bauteil visualisiert werden können.

Python Result

Neben der Verwendung des DPF's kann in den Python Results auch mit klassischem Python Code gearbeitet werden. Dies ermöglicht die Verwendung von if-Statements und for-Schleifen, welche für eine Bearbeitung einzelner Werte eines Datenfeldes eingesetzt werden können und so beispielsweise die Unterscheidung des Vorzeichens eines Ergebnisses an jedem Knoten zulassen. Wie in Bild 3 erkennbar ist, ermöglichen Python Results dem Anwender auch das Anlegen eigener Eingabe- und Ausgabeparameter. Dies führt zu einer einfachen und intuitiven Eingabe von benutzerspezifischen Werten wie beispielsweise der Umgebungsbedingungen für die Auslegeverfahren und ermöglicht eine schnelle Variierung der Randbedingungen. Auch der Zugriff auf die Materialdaten ist gewährleistet, sodass ein durchgängiger Datenfluss mit minimalen Fehlerquellen entsteht.

Fazit

Die direkte Implementierung der Auslegung in die FE-Analyse führt zu reproduzierbaren Ergebnissen und einer eindeutig

zu Lastfall, Geometrie und Material zuweisbaren Bewertung der Tragsicherheit. Das Kopieren von Daten kann grösstenteils umgangen werden und durch die Darstellung des Auslastungsgrades direkt am Bauteil wird die Auswertung und Optimierung deutlich vereinfacht und beschleunigt. Zudem wird durch den Einsatz von kunststoffgerechten Auslegeverfahren die Beurteilung aussagekräftiger und die Dimensionierung zuverlässiger. Somit führt das in diesem Artikel vorgestellte Vorgehen zu einer geeigneten Grundlage für den Einsatz von Kunststoffen in zahlreichen weiteren, hochbeanspruchten Bauteilen. Erste Anwendungen in der Industrie wurden äusserst positive aufgenommen und sprechen so für das Potenzial von zahlreichen weiteren Anwendungen.

Quellen

- [1] PlasticsEurope, Plastics-The facts 2022, Seite 16ff.
- [2] Menges, G., Schmidt, H.: Spannungsrisse bei Langzeit-Zugbeanspruchung von Kunststoffen. *Kunststoffe* 57(1967)11, S. 885–890
- [3] Kunz, J.: Dehngrenzen und sprödes Verhalten. *KunststoffXtra*, 5–6 2022, S. 25–28
- [4] Oberbach, K.: Berechnung von Kunststoff-Bauteilen, Berechnungsmethoden und zulässige Werkstoffanstrengungen; Tagungsband Konstruieren mit Kunststoffen, 11. Konstruktions-Symposium der DECHEMA, Bd. 91(1981), S. 181–196
- [5] Navier, C. L. M. H., Saint-Venant, A. J. C.: *Résumé des leçons données à l'Ecole des Ponts et Chaussées sur l'application de la mécanique à l'établissement des constructions et des machines*. 3. Aufl., Paris 1864
- [6] PyAnsys, Online-Dokumentation, <https://dpf.docs.pyansys.com>, (05.06.23)

Kontakt

IWK Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung
 Prof. Dr. Mario Studer
 OST Ostschweizer Fachhochschule
 Eichwiesstrasse 18b
 CH-8645 Rapperswil-Jona
www.ost.ch