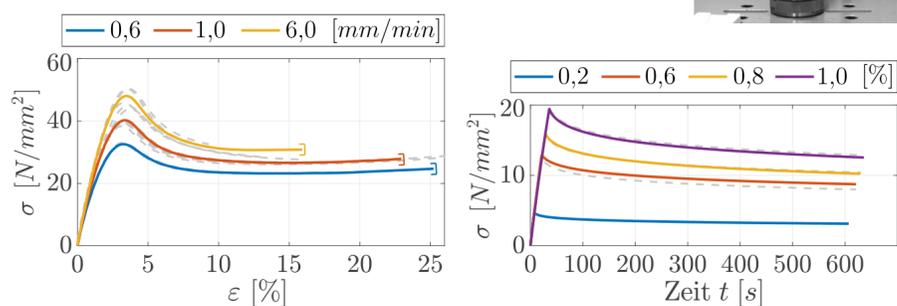
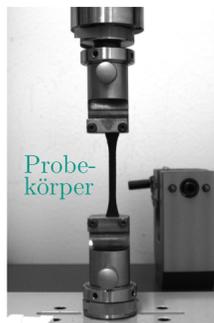


Beschreibung des Verhaltens 3D-gedruckter Materialien auf Basis phänomenologischer und datenbasierter Materialmodelle

Julian Pappenberger

1. Motivation und Ziele

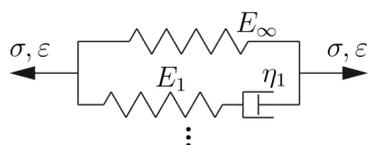
Um im Rahmen von numerischen Simulationen Werkstoffverhalten mathematisch abbilden zu können, werden Materialmodelle eingesetzt. Hierfür müssen zunächst Materialversuche erfolgen. Im Falle dieser Arbeit lagen technisch gemessene Zug- und Relaxationsversuche eines 3D-gedruckten Kunststoffes vom *Institut für Mechanik und Statik der Universität der Bundeswehr München* vor, mit denen Materialmodelle entwickelt wurden. Das vorliegende Material zeigt elastisches, plastisches und viskoses Verhalten mit ei-



ner ausgeprägten Ratenabhängigkeit. Für die Materialmodellierung dieses Kunststoffes wurden zwei verschiedene Ansätze verfolgt.

2. Klassische phänomenologische Materialmodellierung

In der klassischen phänomenologischen Materialmodellierung werden Parameter bestehender Modelle an Versuchsdaten bestimmt.

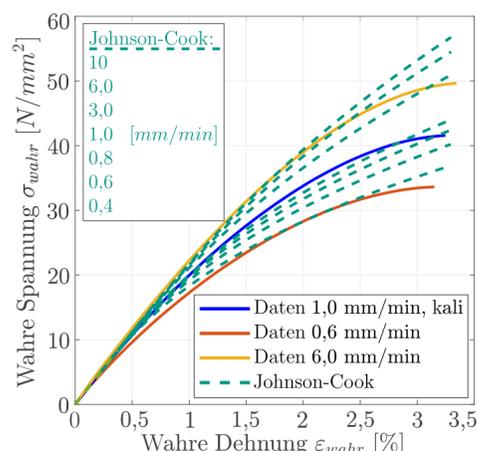


So kann mittels des generalisierten Maxwell-Modells viskoelastisches Verhalten modelliert werden. Hierfür werden die Parameter E_i

und η_i an den vorliegenden Relaxationsversuchen bestimmt. Um elastoplastisches Materialverhalten darzustellen kann beispielsweise das Johnson-Cook-Modell verwendet werden:

$$\sigma_{wahr} = \underbrace{(A + B(\epsilon^{pl})^N)}_{\text{Verfestigung}} \underbrace{(1 + C \ln \dot{\epsilon}_{eq}^{pl})}_{\text{Ratenabhängigkeit}} \underbrace{(1 - T_H^M)}_{\text{Temperaturabhängigkeit}}$$

Dieses 1D-Modell beschreibt in wahren Spannungen eine Verfestigung mit Raten- und Temperaturabhängigkeit, welche bei Kunststoffen häufig auftritt. Die Parameter dieses Materialmodells können an Zugversuchen bestimmt werden. Anschließend kann das Modell in numerischen Simulationen eingesetzt werden. Hierfür wurde im 2D die Annahme einer isotropen Verfestigung mit von Mises-Vergleichsspannung getroffen – weitere Versuchsergebnisse zeigen ein isotropes Materialverhalten auf.

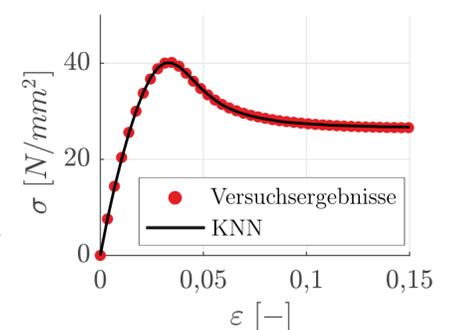


3. Künstliche neuronale Netze als Materialmodell

Die Forschung an künstlichen neuronalen Netzen hat sich in den letzten Jahren deutlich intensiviert. Auch in der Materialmodellierung können diese eingesetzt werden. Ein neuronales Netz bildet eine verkettete Funktion $z = f^{\text{FNN}}(x, w)$, welche abhängig von den Eingangs-

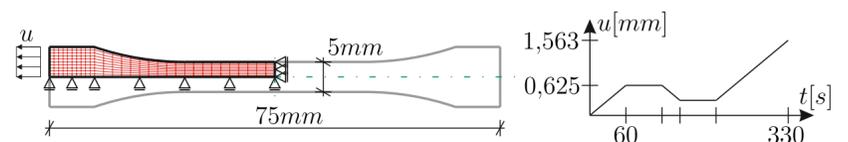
$$\begin{bmatrix} \Delta \epsilon(t_{n+1}) \\ \epsilon(t_n) \\ \sigma(t_n) \\ \Delta t_{n+1} \end{bmatrix} \rightarrow \sigma(t_{n+1})$$

Informationen x eine Lösung z liefert. Hierbei können aufgrund der inkrementellen Berechnung im Eingang Informationen der zuvor ausgewerteten Zeitschritte verwendet werden – beispielsweise die Verzerrungen $\epsilon(t_n)$. Die Spannungen $\sigma(t_{n+1})$ bilden den Ausgang des Netzes. Die Gewichte w sind die Freiheitsgrade des Netzes und werden im Laufe des Trainings bestimmt. Dabei werden die Versuchsdaten zum Trainieren des Netzes genutzt, um es anschließend in numerischen Simulationen anwenden zu können. Auch makroskopische Eigenschaften wie das Alter der Druckflüssigkeit können hierbei ohne großen Mehraufwand verarbeitet werden. Jedoch ist eine physikalische Interpretierbarkeit der Gewichte nicht gegeben und das Netz arbeitet rein datenbasiert. Eine Validierung der Ergebnisse und Plausibilitätstests sind daher entscheidend.



4. Numerisches Beispiel

Bei einer numerischen Simulation eines Knochenstabes aus dem vorliegenden Kunststoff nach DIN EN ISO 527-2 mittels Scheibenelementen wird nun zum einen das Johnson-Cook-Modell als klassisches phänomenologisches Materialmodell und zum anderen ein künstliches neuronales Netz als Materialmodell eingesetzt.



Beide Modelle zeigen zu Beginn sehr ähnliche Ergebnisse. Das implementierte Johnson-Cook-Modell ist jedoch nur in der Lage elastoplastisches Verhalten darzustellen, während das neuronale Netz auch Relaxation und Entfestigung abbildet. Eine versuchsgestützte Validierung dieses Verlaufes müsste hierbei noch erfolgen.

