

Materialgesetzentwicklung zur FEM-Simulation des Werkstoffverhaltens von Formgedächtnislegierungen in der Medizintechnik

Dieter Kardas¹, Wilhelm Rust¹, Ansgar Polley³, Tilman Fabian²

Diplomarbeit an der FH Hannover¹ in einer Kooperation zwischen dem
Zentrum für Biomedizintechnik² der Leibniz Universität Hannover
und der CADFEM GmbH³, im August 2006

Summary

Optimum positioning when operationally implanting the Cochlea-Implant (CI) cannot be reached to date, due to the complicated geometrical shape of the cochlea. A deeper insertion could be achieved by assembling the implant with shape memory alloys (SMA). In order to evaluate this concept, the FEM simulation of a CI insertion into the cochlea was carried out. For this simulation a material law for FEM simulation was developed as a preliminary step, which is able to illustrate the thermo-mechanical effects of SMA.

Bei der operativen Insertion eines Cochlea-Implantats (CIs) in die Gehörschnecke (Cochlea) kann wegen der komplexen geometrischen Form der Cochlea bis dato keine optimale, tiefe Implantatpositionierung erreicht werden. Eine tiefere Einbringung könnte durch die Bestückung des Implantats mit Formgedächtnislegierungen (FGL) zu realisieren sein. Um diese Vorstellung zu bewerten, wurde in dieser Arbeit die FEM-Simulation einer CI-Insertion in die Cochlea durchgeführt. Für diese Simulation wurde als Vorarbeit ein Materialgesetz zur FEM-Simulation entwickelt, welches in der Lage ist, die thermomechanischen Effekte von FGL abzubilden.

Keywords

Formgedächtnis, Formgedächtnislegierung, FGL, ANSYS, Materialgesetz, FEM, Shape Memory Alloy, SMA

1. Formgedächtnis

Materialien mit Formgedächtnis weisen ein sehr ausgeprägtes thermomechanisches Verhalten auf. Die dabei herausstechende Eigenschaft ist ein Vorgang, der als thermischer Memory-Effekt, Formgedächtnis-Effekt (FG-Effekt) und Einwegeffekt bekannt ist. Dabei kehrt ein plastisch verformter Körper durch reine Zufuhr von Wärmeenergie in seine Ursprungsform zurück. Auch nach einer Abkühlung bleibt diese Form erhalten (vgl. Fig. 1).

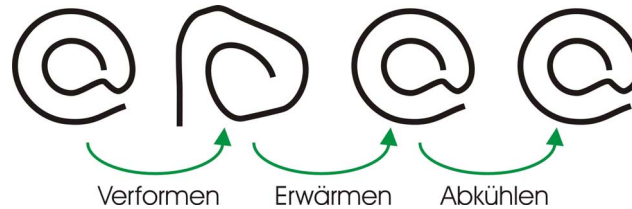


Fig. 1: FG-Effekt

Formgedächtnismaterialien finden nicht nur in der high-tech-Forschung Anwendungen sondern auch bei alltäglichen Gebrauchsgegenständen. Neben Anwendungen im Automobilbau, der Luft- und Raumfahrttechnik, findet Nitinol aber vorwiegend in der Medizintechnik seinen Einsatz. Grund dafür ist die hohe Biokompatibilität, der hohe Korrosionswiderstand und vor allem das thermische Formverhalten. Damit können scheinbar unlösbare oder nur schwer lösbare Probleme sehr einfach behoben werden.

Das Formgedächtnis wird durch die mikroskopischen Vorgänge im Nitinol hervorgerufen. Im Gefüge tritt durch mechanische und thermische Beanspruchung eine rein diffusionslose austenitisch-martensitische Phasenumwandlung statt. Dies ist bis zu einer kritischen Temperatur, die zwischen 100 und 300 °C liegt und einer Dehnung von max. 8% gewährleistet [1]. Wird einer dieser Werte überschritten, ist die hervorgerufene Verformung nicht mehr rein reversibel. Die Besonderheit bei den Phasenumwandlungen ist die Erhaltung der Nachbarschaftsverhältnisse der Atome.

In der folgenden Abbildung ist das Spannungs-Dehnungs-Temperatur-Verhalten schematisch dargestellt.

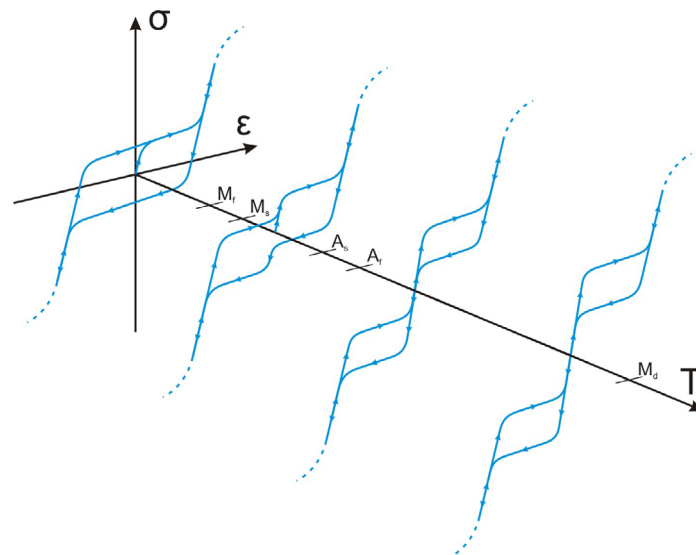


Fig. 2: Schematische Darstellung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens von FGL in Abhängigkeit von der Temperatur

1.1 Pseudoplastizität

Bei einer Belastung unterhalb des Spannungsplateaus ist die Verformung rein elastisch. Im Niedertemperaturbereich wird dabei das sog. verzwilligte Martensit reversibel verzerrt. Ab der Überschreitung des Plateaus klappen die Martensitzellen in eine ausgerichtete Form in Richtung des Spannungsfeldes um [2]. Dieser Vorgang wird auch als Entzwilligen bezeichnet. Augenscheinlich tritt

hier gewöhnliches Fließen ein. Durch die möglichen Orientierungsvarianten die durch die Zwillingsstruktur des Martensits möglich sind, werden Verspannungen für eine Materialverfestigung, die im Normalfall über Gleitungen im Gefüge abgebaut werden, unterdrückt. Sind alle Zellen ausgerichtet, ist eine neue Gitterstruktur vorhanden (i. d. R. bei max. 8% Dehnung) – der spannungsinduzierte Martensit (SIM). Bei einer weiteren Spannungserhöhung wird dieses neu entstandene Gefüge elastisch-reversibel verformt. Somit ist ein zweiter elastischer Bereich vorhanden. Bei einer Entlastung kommt es aber nicht zu einem Rückumklappen der Zellen in die Zwillingsstruktur. Somit bleibt eine plastische Verformung (vgl. Fig. 3).

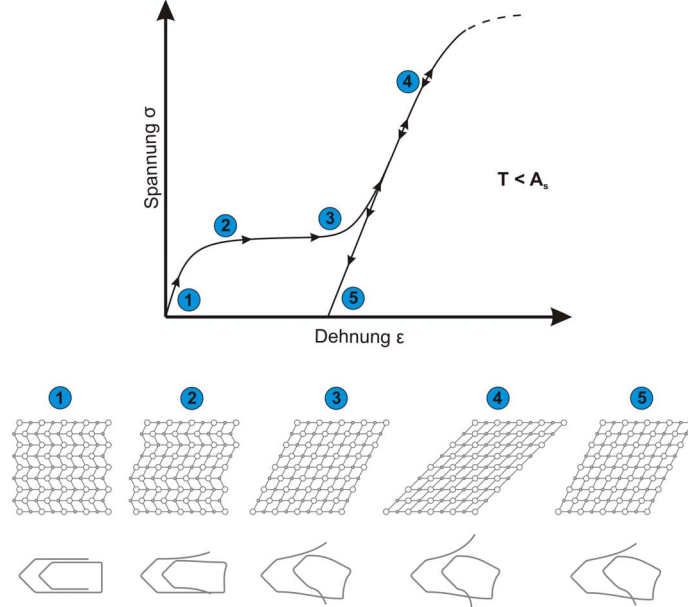


Fig. 3: Mikro- und makroskopische Vorgänge bei Pseudoplastizität

1.2 Thermischer Memory-Effekt

Ein sehr außergewöhnliches Verhalten ist der Vorgang des thermischen Memory-Effekts. Die zuvor beschriebene pseudoplastische Deformation kann dabei über eine Temperaturerhöhung über A_f (Austenit-Finish-Temperatur) vollständig aufgehoben werden.

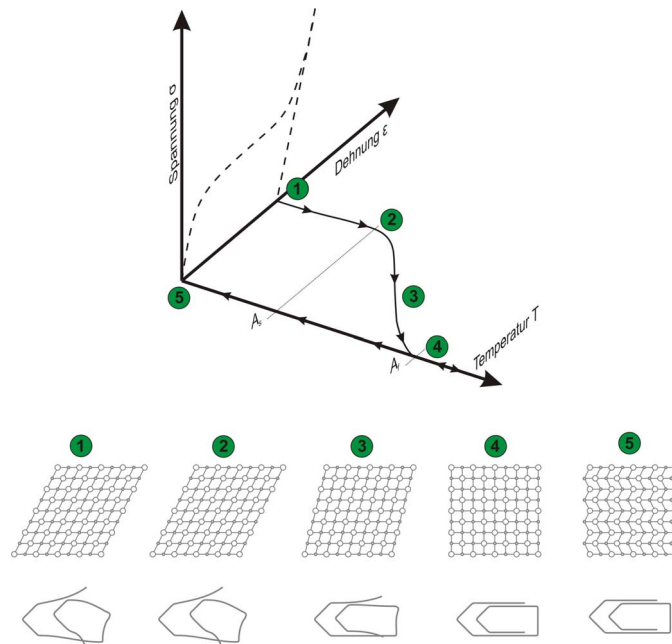


Fig. 4: Mikro- und makroskopische Vorgänge beim thermischen Memory-Effekt

Im Gefüge lässt sich dieses Verhalten durch die Umwandlung des ausgerichteten Martensits in Austenit erklären. Wegen der Ähnlichkeit des Austenitgefüges und des verzwilligten Martensits, das vor der mechanischen Belastung vorhanden war, nimmt das verformte Material seinen Ursprungszustand wieder ein. Erst nach einer Abkühlung bilden sich wieder Martensitzwillinge [1]. Dieser Effekt wird wegen seiner temperaturgesteuerten Fähigkeit, sich nur an eine bestimmte Form zu erinnern, auch als Einwegeffekt bezeichnet. Die beschriebene Rückverformung beginnt bei der Temperatur A_s (Austenit-Start-Temperatur) und ist bei A_f abgeschlossen (vgl. Fig. 4).

1.3 Zweiweg-Effekt

Mit spezieller Vorbehandlung einer Nickel-Titan-Legierung kann neben dem vorgestellten Einwegeffekt auch ein Zweiwegeffekt hervorgerufen werden. Das Material kann sich dabei an eine Form in der Hochtemperaturphase und an eine weitere in der Niedertemperaturphase "erinnern" (vgl. Fig. 5). Möglich ist dies nur, wenn das Gefüge bei dem Abkühlen daran gehindert wird, eine verzwilligte Form anzunehmen. Stattdessen muss sich ein ausgerichteter Martensit einstellen. Erreicht wird dies über gezielte Auf-/Einbringungen von äußeren oder inneren Kräften (Eigenstressungen), die das Martensitgefüge daran hindern, die verzwilligte Struktur anzunehmen.

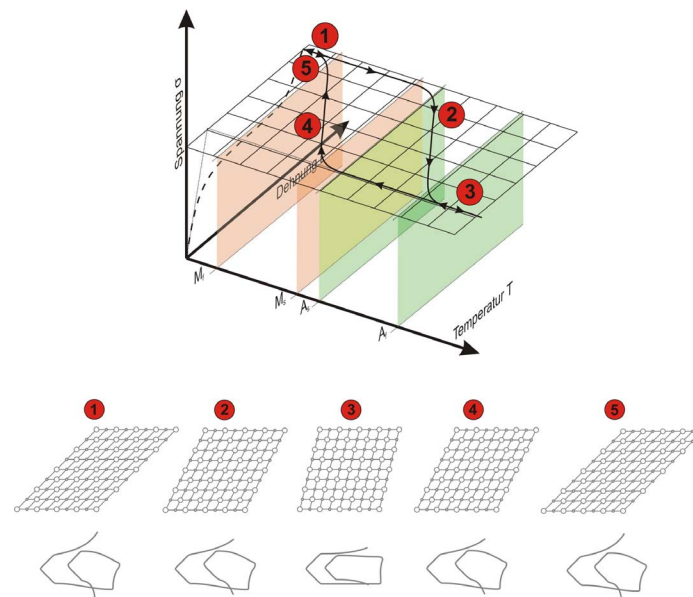


Fig. 5: Mikro- und makroskopische Vorgänge beim Zweiwegeffekt

1.4 Pseudoelastizität

In der Hochtemperaturphase ist im Material ein pseudoelastisches Verhalten zu beobachten, das auch unter dem Namen Superelastizität bekannt ist. Bei der Aufbringung einer mechanischen Last wandelt sich das vorhandene Austenitgefüge nach Überschreiten des Spannungsplateaus in verzwilligtes Martensit um, welches dann entzwillingt (ausgerichtet) wird [1]. Bis jetzt ist ein Verhalten zu beobachten, das dem pseudoplastischen Verhalten ähnlich ist. Wird die Last aber jetzt abgesenkt, entsteht wieder ein Austenitgefüge, womit wieder ein spannungs- und dehnungsfreier Zustand vorliegt. Die Umwandlungsspannungen von Austenit nach Martensit und Martensit nach Austenit, liegen dabei auf einem unterschiedlichen Niveau. Dadurch kommt es bei einer Belastungs-Entlastungs-Folge zu einer Hysterese im Spannungs-Dehnungs-Diagramm (vgl. Fig. 6). Legierungen mit pseudoelastischem Materialverhalten können ohne zu plastifizieren bis zu 10-mal stärker gedehnt werden als herkömmlicher Federstahl. Die elastischen Dehnungen können dabei bis zu 10% (in speziellen Legierungssystemen sogar 25%) betragen [1].

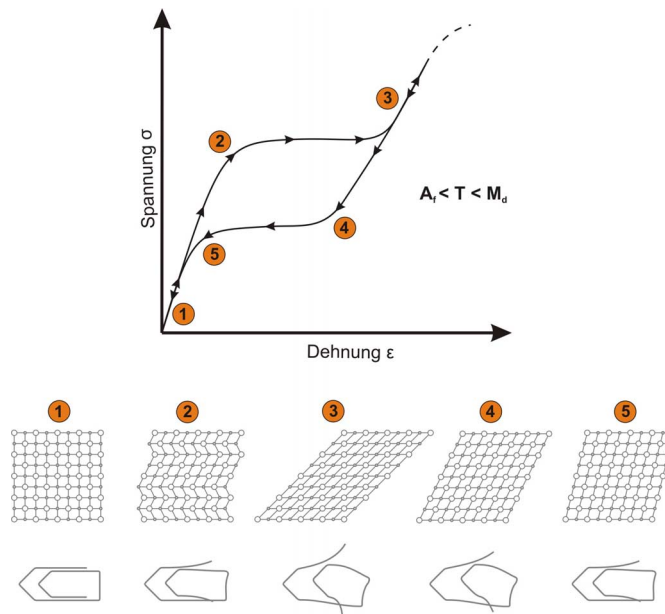


Fig. 6: Mikro- und makroskopische Vorgänge bei Pseudoelastizität

2. FGL-Materialgesetz für räumlichen Spannungszustand

Für die Materialgesetzentwicklung zur FEM-Simulation des Werkstoffverhaltens von Formgedächtnislegierungen werden in dem mathematischen Modell folgende drei Punkte berücksichtigt:

- Abbildbarkeit der Pseudoplastizität, Pseudoelastizität und deren Zwischenstadien
- Abbildbarkeit des spannungsinduzierten Martensits
- Temperatursteuerung zum Hervorrufen des Ein- und Zweiwegereffekts

2.1 Pseudoplastizität, Pseudoelastizität, Zwischenstadien

Das entwickelte FGL-Materialgesetz baut auf dem mathematischen Modell einer bilinearen kinematischen Verfestigung auf. Die Verschiebung des Fließzylinders, die bei diesem Verfestigungstyp durch den Backstress $\underline{\alpha}$ beschrieben wird, wird für das FGL-Modell um einen Offset $\underline{\sigma}_{off}$ erweitert, der die Fließkurven im Zugbereich in den positiven, im Druckbereich in den negativen Bereich versetzt. Um einen für die Numerik schwierigen Sprung zu vermeiden, nimmt der Verlauf der Offsetfunktion hier einen tanh-Verlauf an.

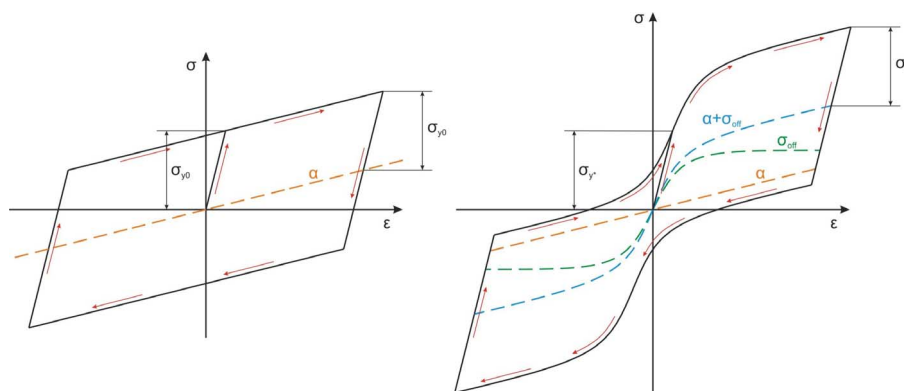


Fig. 7: Bilineare kinematische Verfestigung (links) und FGL-Modell (rechts)

Die Fließfunktion nimmt somit folgende Form an

$$F = \sigma_{eq} \left(\underline{\sigma} - \left(\underline{\alpha} + \underline{\sigma}_{off} \right) \right) - \sigma_{y*} = 0$$

Bei einer Veränderung der Amplitudenspannung $\sigma_{y,*}$ entsteht hier ein Aufweiten/Zusammenziehen der Hysteresekurve (vgl. Fig. 8).

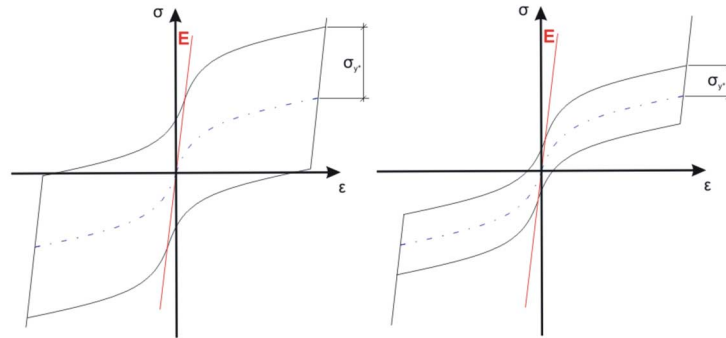


Fig. 8: Auswirkung einer Veränderung der Amplitudenspannung

Die für das FGL-Materialgesetz neu eingebrachte Offsetfunktion berechnet sich über

$$\underline{\sigma}_{off} = \underline{V} \cdot \frac{\underline{\varepsilon}_{pl}}{\underline{\varepsilon}_{eqv}(\underline{\varepsilon}_{pl})} \cdot \tanh(d \cdot \underline{\varepsilon}_{eqv}(\underline{\varepsilon}_{pl})) \cdot \sigma_m$$

Dabei bedeutet $\underline{\varepsilon}_{eqv}$ die äquivalente plastische Dehnung und die Matrix \underline{V} trägt der Verwendung der Ingenieurnotation für die Dehnungen Rechnung.

Durch diese Form wird das Spannungs-Dehnungs-Verhalten im Mehrdimensionalen nur von der äquivalenten plastischen Dehnung bestimmt, sodass Fallunterscheidungen unnötig werden.

Über die veränderbaren Parameter σ_m und d , die in die Offsetfunktion eingebracht wurden, wird das oben gezeigte Aufreißen der Hysteresekurve im Spannungs-Dehnungs-Diagramm (vgl. Fig. 2) gewährleistet, womit die Abbildbarkeit der Pseudoplastizität, Pseudoelastizität und deren Zwischenstadien möglich wird. Die Mittenspannung σ_m steuert dabei das Niveau des Spannungswertes, dem sich die Offsetspannung mit größer werdender plastischer Dehnung asymptotisch nähern soll. Wird dieser Wert auf 0 gesetzt, liegt rein pseudoplastisches Materialverhalten vor. Ist der Wert größer als die Amplitudenspannung $\sigma_{y,*}$ befindet sich das Material im pseudoelastischen Bereich (vgl. Fig. 9).

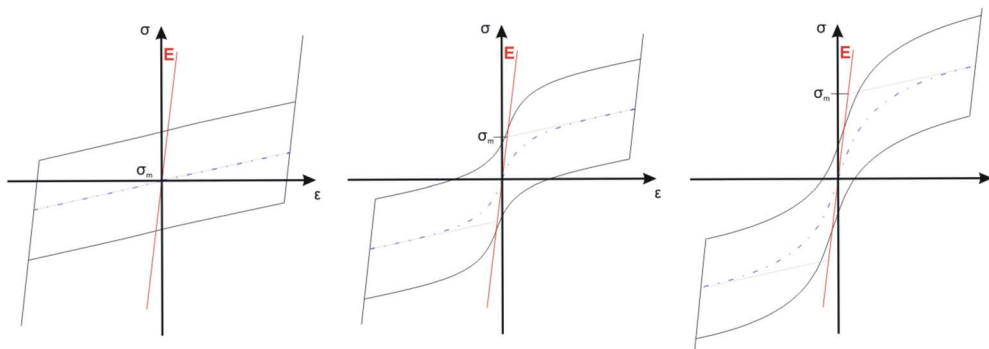


Fig. 9: Auswirkung einer Veränderung der Mittenspannung. Links: Pseudoplastischer Bereich. Rechts: Pseudoelastischer Bereich

Der Parameter d , der als Argument in die tanh-Funktion eingebracht wurde, ist als Faktor der Tangentensteigung der tanh-Funktion im Ursprungspunkt zu sehen. Mit größer werdendem d kann im pseudoelastischen Bereich nach Entlasten, oder bei dem Einwegeffekt nach Aufheizen ein nahezu spannungs- und dehnungsfreier Zustand erreicht werden. Die Auswirkungen einer Veränderung des Steigungsfaktors d sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

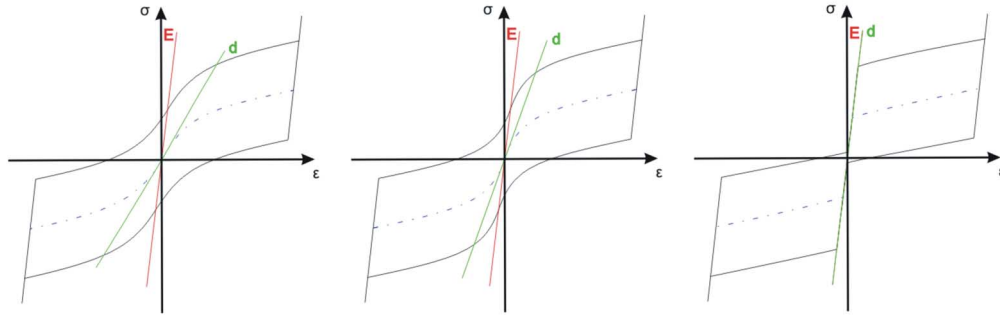


Fig. 10: Auswirkung einer Veränderung des Steigungsfaktors der tanh-Funktion

Für die iterative Bestimmung der aktuellen Spannungen und plastischen Dehnungen wird neben der Fließfunktion F die Spannungsgleichung \underline{H} aufgestellt. Mit assoziierter Plastizität ergibt sich diese Gleichung zu

$$\underline{H} = \underline{\sigma}_* + \underline{V} \cdot \underline{C} \cdot \left(\underline{\varepsilon}_{pl,n-1} + \lambda \frac{\partial F}{\partial \underline{\sigma}_*} \right) + \underline{V} \cdot \frac{\underline{\varepsilon}_{pl,n-1} + \lambda \frac{\partial F}{\partial \underline{\sigma}_*}}{\underline{\varepsilon}_{eqv} \left(\underline{\varepsilon}_{pl,n-1}, \lambda \frac{\partial F}{\partial \underline{\sigma}_*} \right)} \cdot \tanh \left(d \cdot \underline{\varepsilon}_{eqv} \left(\underline{\varepsilon}_{pl,n-1}, \lambda \frac{\partial F}{\partial \underline{\sigma}_*} \right) \right) \cdot \underline{\sigma}_m - \underline{\sigma}_{tr} + \underline{D} \cdot \lambda \frac{\partial F}{\partial \underline{\sigma}_*} = 0$$

Sie ergibt sich aus der Veränderung der Summe aus Spannungen, Backstresses und Offsetspannung mit dem plastischen Multiplikator λ , der über die assoziierte Fließregel direkt die Entwicklung der plastischen Dehnungen steuert. Für das Newton-Verfahren ist sie so umgeformt, dass die rechte Seite 0 ergibt. Der hier auftretende Spannungsvektor $\underline{\sigma}_*$ berechnet sich über

$$\underline{\sigma}_* = \underline{\sigma} - (\underline{\alpha} + \underline{\sigma}_{off})$$

Es stehen nun sieben Gleichungen mit den sechs Spannungskomponenten und dem plastischen Multiplikator zur Verfügung, die mit einem Newton-Verfahren gelöst werden.

2.2 Spannungsinduzierter Martensit

Um den spannungsinduzierten Martensit in dem FGL-Materialgesetz nachbilden zu können, wird eine plastische Dehngrenze ε_{dg} eingebracht.

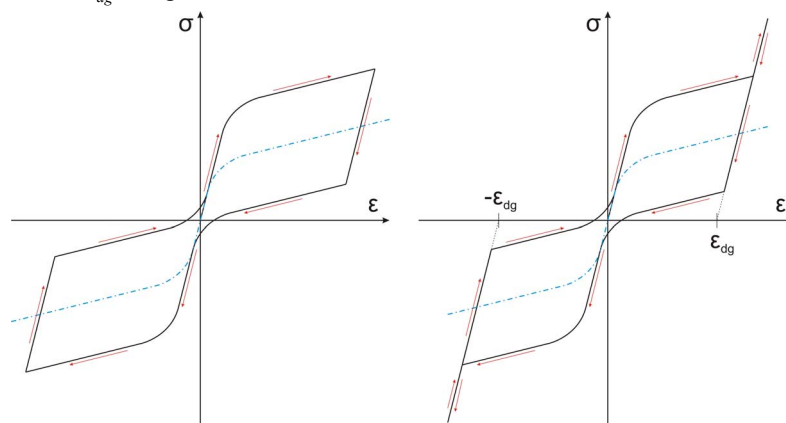


Fig. 11: FGL-Modell ohne (links) und mit (rechts) eingebauter plastischer Dehngrenze

Sollte sich nach der iterativen Bestimmung der Spannungen und plastischen Dehnungen herausstellen, dass die Dehngrenze überschritten wurde, wird die äquivalente plastische Dehnung zurück auf den Wert der plastischen Dehngrenze gesetzt (vgl. Fig. 11).

2.3 Temperatursteuerung

Für das Hervorrufen des thermischen Memory-Effekts ist es nötig, eine Temperaturabhängigkeit für die Eingabeparameter in das Materialgesetz einzubringen. Die in ANSYS standardmäßig vorhandene APDL-Funktion namens TBTEMP bietet dies für bereits vorhandene und selbst programmierte nichtlineare Materialgesetze an. Damit besteht die Möglichkeit, den Formgedächtniseffekt mit der Eingabe von einem Parametersatz (Temperatur 1) für den pseudoplastischen Bereich und einen weiteren Parametersatz (Temperatur 2) für den pseudoelastischen Bereich in ANSYS zu simulieren. Eine lineare Interpolation der temperaturabhängigen Parameter führt dann beim Erhitzen zu einem weichen Übergang in den pseudoelastischen Bereich, womit allmählich der thermische Memory-Effekt hervorgerufen wird (vgl. Fig. 12).

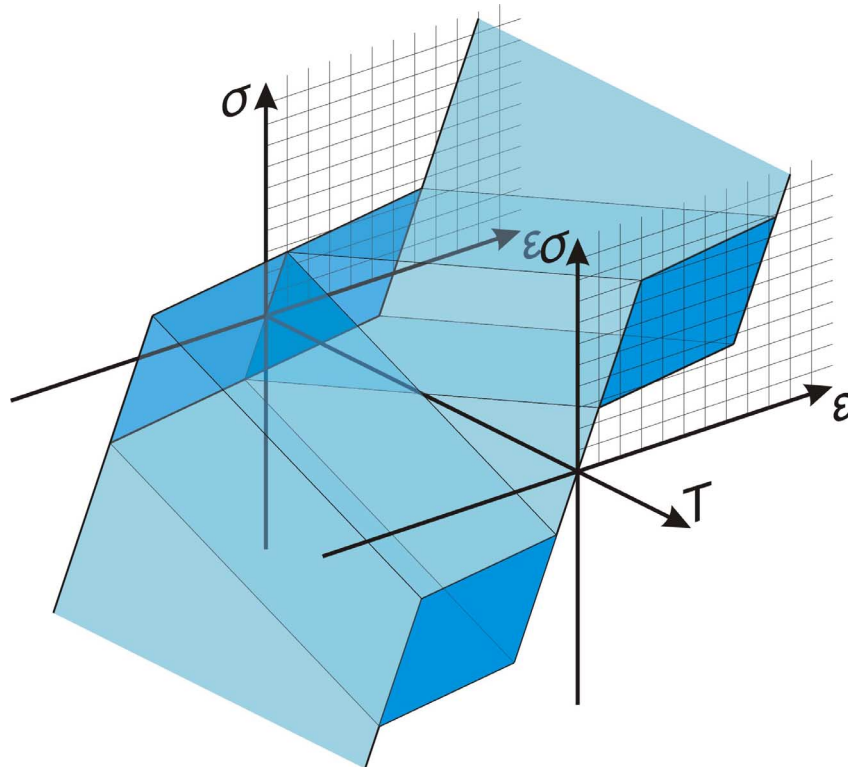


Fig. 12: Lineare Interpolation zwischen zwei eingegebenen Spannungs-Dehnungs-Diagrammen

3. Abbildbare Materialphänomene

Die im Folgenden aufgeführten Simulationsergebnisse sollen am Beispiel einer Nitinol-Büroklammer zeigen, welche Phänomene mit dem entwickelten Materialgesetz abbildbar sind.

3.1 Pseudoplastizität und thermischer Memory-Effekt

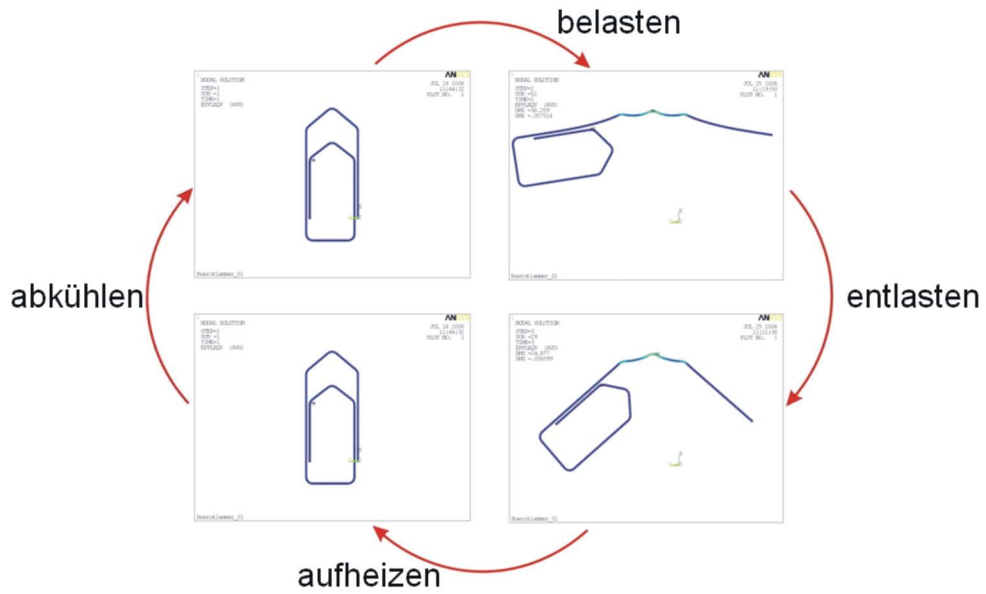


Fig. 13: Pseudoplastizität und thermischer Memory-Effekt

3.2 Pseudoelastizität

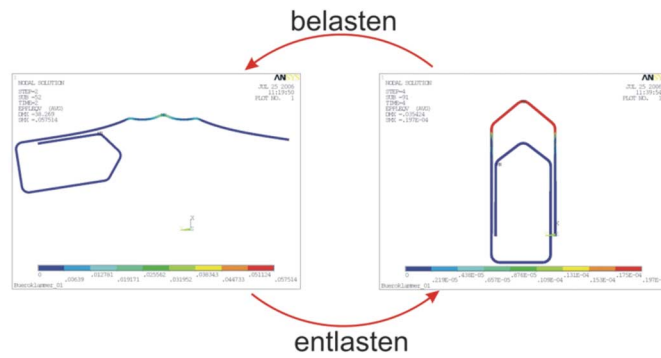


Fig. 14: Pseudoelastizität

3.3 Zweivegeeffekt

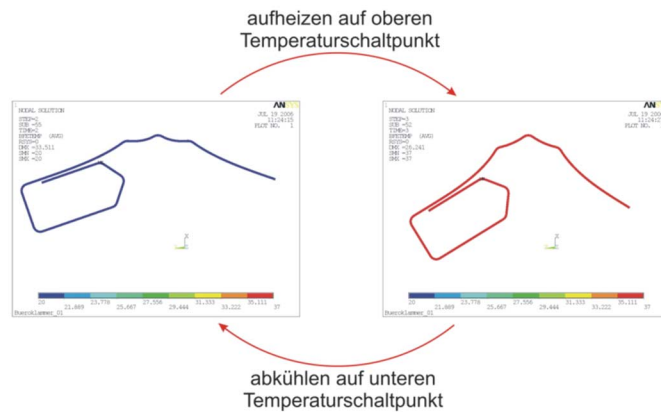


Fig. 15: Zweivegeeffekt

4. Medizintechnische Forschung an Cochlea-Implantaten

Cochlea-Implantate (CI) sind Neuroimplantate für hörgeschädigte oder taube Menschen (vgl. Fig. 16). Sie werden seit den 80er Jahren erfolgreich eingesetzt, wenn die Gehörkette unterbrochen oder ausgefallen ist. Die verlorene Sinneswahrnehmung kann damit wieder (oder zum ersten Mal) geweckt werden.

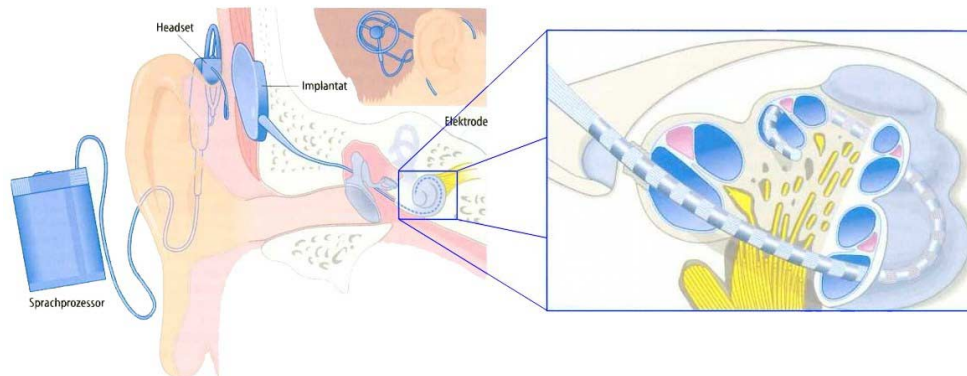


Fig. 16: Cochlea-Implantat. Links: Implantatbestandteile. Rechts: CI-Insertion in die Gehörsehnecke (Cochlea) [3]

Eine bisher ungelöste Problematik ist die Verkantung eines herkömmlichen Implantats in der Cochlea (Gehörsehnecke) während der Insertion. Dadurch kann eine optimale tiefe Insertion nicht erreicht werden. Patienten mit CI haben daher ein höherfrequentes Hörvermögen als Menschen mit gesundem Gehör. Ein Formgedächtnis-Cochlea-Implantat (FG-CI) könnte die Lösung des Problems sein. Das FG-CI muss dazu vor der Insertion pseudoplastisch verformt werden. Während der Insertion kommt es durch die Erwärmung auf Körpertemperatur zu der Formrückstellung des Implantats in die Ursprungsform. Um dieser Idee nachzugehen wurden Implantationssimulationen gestartet. Dafür wurde das entwickelte FGL-Materialgesetz herangezogen. Auf der folgenden Seite (Fig. 17) ist das Ergebnis einer Implantationssimulation für ein CI mit einer Windung aufgezeigt. Die dargestellte Verformung geschieht dabei rein temperaturgesteuert.

4. Schlussbetrachtung

Das entwickelte FGL-Materialgesetz, das das Werkstoffverhalten von Formgedächtnislegierungen abbildet, stellt eine Erweiterung der bisher in Simulationssoftware standardmäßig vorhandenen FGL-Materialgesetze dar. Mit diesem Stoffgesetz werden nicht nur einzelne Effekte des komplexen Werkstoffverhaltens abgebildet, sondern alle bekannten thermomechanischen Phänomene abgedeckt. Diese sind die Pseudoplastizität, Pseudoelastizität, und Zwischenstadien (Pseudoplastizität/-elastizität). Des Weiteren lassen sich durch eine Temperaturabhängigkeit der thermische Memory-Effekt (Einwegeffekt), der Zweiwegeffekt und die unterschiedlichen Phasenumwandlungstemperaturen abbilden. In Beispielsimulationen konnte gezeigt werden, dass das Materialgesetz für unterschiedliche Problemstellungen universell anwendbar ist. So wurde das Materialgesetz verwendet, um eine Modellsimulation einer CI-Insertion durchzuführen, bei der der thermische Memory-Effekt abgebildet werden musste.

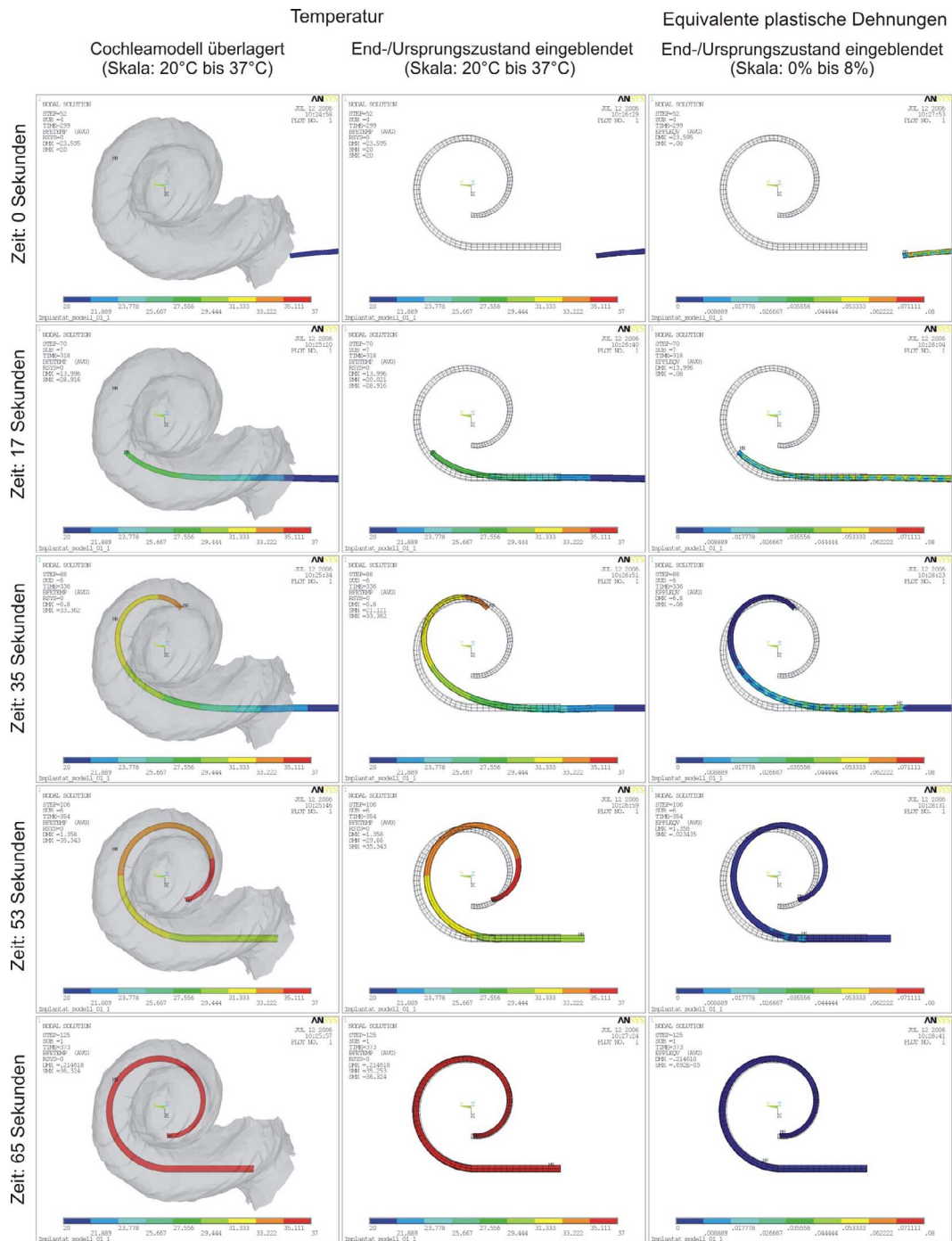


Fig. 17: Ergebnis der Implantationssimulation eines FG-CIs mit einer Windung

5. References

- [1] Gumpel, P.: Formgedächtnislegierungen – Einsatzmöglichkeiten in Maschinenbau, Medizintechnik und Aktuatorik. Expert Verlag, Renningen, 2004. ISBN: 3-8169-2293-7.
- [2] Helm, D.: Formgedächtnislegierungen – Experimentelle Untersuchung, phänomenologische Modellierung und numerische Simulation der thermomechanischen Materialeigenschaften. Institut für Mechanik, Universität Gesamthochschule Kassel, 2001. ISBN: 3-89792-064-6.
- [3] Fabian, T.: Cochlea: Neuroimplantate für besseres Hören. VDI, Technik und Leben, Ausgabe 3/2005.