Schlussbericht des Vorhabens

NUWERAM

gefördert durch das

BMWi der Deutschen Bundesregierung

aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages.

Zuwendungsempfänger: Förderkennzeichen: Laufzeit des Vorhabens: 01.08.2018 - 31.08.2020 Erstellungsdatum:

Novicos GmbH 0324262C 23.04.2021

Projektleiter:

Dr.-Ing. Olgierd Zaleski

Ulgiered Zuleski

Gefördert durch:



Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 0324262C gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.



1.	Kurzda	arstellung	4
1.1.	Aufg	abenstellung	4
1.2	Vorau	ssetzungen zur Auftragsdurchführung	5
1.3	Planu	ng und Ablauf des Auftrags	6
1.4	Wisse	nschaftliche und technische Projektbasis	7
1.5	Zusan	nmenarbeit mit anderen Stellen	8
2.	Eingeł	nende Darstellung	9
3.	Testm	odell FEM	9
3.1.	Spe	zifikation des Testmodells FEM	9
3.2.	Erst	e Ergebnisse für Simulationen von n Schlägen	12
3.3.	Ana	lyseergebnisse für modizierte Systemgeometrieen	15
3.4.	Ana	lyseergebnisse für Änderung von Materialparametern.	19
3.5.	Zusa	ammenfassung der Ergebnisse	23
4.	Analys	se und Auswahl der Materialmodelle	24
4.1.	Forn	nulierungen der Materialmodelle	24
4.2.	Mod	elle mit Verformungsgeschwindigkeit	25
	4.2.1.	Materialmodell PLASTIC_KINEMATIC	26
	4.2.2.	Materialmodell PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY	28
	4.2.3.	Materialmodell PLASTICITY_WITH_DAMAGE	29
	4.2.4.	Materialmodell JOHNSON_COOK	30
	4.2.5.	Materialmodell DAMAGE_1	32
4.3.	Mod	elle mit Berücksichtigung des Materialversagens	33
	4.3.1.	Materialmodell PLASTICITY_WITH_DAMAGE	36
	4.3.2.	Generalisierter inkrementeller stresszustandsabhäng	iger
	Schade	ensmodell MOdel GISSMO	
	4.3.3.	Materialmodell Johnson-Cook	43
4.4.	Ana	lyseergebnisse für starren Hammer	45
4.5.	Anal	lyseergebnisse für die lokale Hammerversteifung	48
4.6.	Zusa	ammenfassung	50



5.	Fortge	schrittene FEM-Modelle	52
5.1.	Besc	chreibung der Modelle	52
5.2.	Simu	ulationsergebnisse	54
5.3.	Zusa	ammenfassung	61
6.	Messte	echnische Untersuchungen	62
6.1. Mate	Theo erialunto	oretischer Hintergrund der messtechnischen ersuchungen	62
6.2.	Vers	chleißmessung	68
	6.2.1. Belastu	Lastkraft mit Kraft: 3Hz ± 45kN - 2 Proben Anzahl ungszyklen zum Versagen: 42 697/36 901	70
	6.2.2.	Lastkraft mit Kraft: 3Hz ±47.5kN - 2 Proben	71
	Anzahl	Belastungszyklen zum Versagen: 17 715/22 924	71
	6.2.3.	Lastkraft mit Kraft: 3Hz ±50kN - 2 Proben	72
	Anzahl	Belastungszyklen zum Versagen: 7 270/8 617	72
	6.2.4.	Lastkraft mit Kraft: 3Hz ±55kN - 1 Probe	74
	Anzahl	Belastungszyklen zum Versagen: 1 106	74
	6.2.5.	Lastkraft mit Kraft: 3Hz ±60kN - 1 Probe	75
	Anzahl	Belastungszyklen zum Versagen: 239	75
	6.2.6.	Zusammenfassung	76
6.3.	Aufp	ralltests	78
7.	Validie	erung der Materialparameter	85
7.1.	Bere	eich des elastischen Materialverhaltens	85
7.3.	Lebe	ensdauer	
7.4.	Mate	erialabtrag	92
7.5.	Zusa	ammenfassung	93
8.	Multikı	ritelliere Optimierung	94
9.	Zusam	menfassung	99
10.	Litera	turverzeichnis	101
11.	Anhar	ng – Erfolgskontrollbericht	102
11.1	. Erge	ebnisse und Erfahrungen	102
11.2	2. Erfin	dungen / Schutzrechte	103



11.3.	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten	103
11.4.	Wissenschaftliche Erkentnisse	104
11.5.	Kosten und Zeitplanung	104



1. Kurzdarstellung

1.1. Aufgabenstellung

Das hier beschriebene Forschungsvorhaben "Numerische Werkzeuge zur Verschleißvorhersage und multikriterieller Optimierung von Rammhämmern" (NUWERAM) war Teil des Verbundvorhabens "Untersuchung primärer Maßnahmen zur Minderung der Unterwasser-Schallabstrahlung bei der Rammung von Gründungspfählen" (SILENT HAMMER).

Für die Gründung von Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) werden gerammte Verankerungspfähle verwendet, wie sie weltweit bereits seit vielen Jahrzehnten erfolgreich für verschiedenste Arten von Offshore-Konstruktionen eingesetzt werden. Aus der impulshaften Anregung des Pfahls durch den Rammvorgang resultiert ein Schalleintrag im Meereswasser, der die marine Umwelt belastet. Zur Reduktion des Unterwasserschalls werden derzeit verschiedene Verfahren eingesetzt. Besonders wirksam sind die primären Maßnahmen, die darauf abzielen, die Schallabstrahlung direkt an der Quelle zu minimieren, z.B. durch Verringerung der Schlagenergie. Im Rahmen des Verbundvorhabens standen sie im Fokus der Projektarbeit.

Das Teilvorhaben der Novicos GmbH befasste sich mit numerischen Verfahren, die neu- bzw. Weiterentwickelt wurden, die eine effiziente Untersuchung der ausgewählten Eigenschaften von Rammhämmern unter Berücksichtigung der zahlreichen Wechselwirkungen zu ermöglichen. Ausgehend von Ergebnissen der akustischen Optimierung von Impulshämmern, die beim Projektpartner TU Hamburg erfolgte, sollte Novicos deren Anpassung an den Hammerentwurf unterstützen, die Lebensdauer der entwickelten Produkte und die Rammbarkeit von Pfählen zu mindest erhalten. Die Aufteilung der Optimierungsaufgabe in einen ersten Schritt, die Optimierung der akustischen Eigenschaften, und den zweiten Schritt, der in der Sicherstellung des gewünschten Verschleißverhaltens und der Rammbarkeit bestand, erfolgt bewusst, um die Komplexität der insgesamt sehr anspruchsvollen Optimierungsaufgabe auf ein beherrschbares Niveau zu reduzieren. Um die Lebensdauer zu überprüfen beziehungsweise zu untersuchen, mussten von Novicos Materialmodelle ausgewählt werden, die die Festigkeit, Materialermüdung und den Verschleiß beschreiben und



quantifizieren. Bei allen vorgesehenen Arbeiten spielte stets die Gewährleistung des schnellen Datenaustausches zwischen großen Teilmodellen des Gesamtsystems Rammhammer auch eine wichtige Rolle und zählte zu den Projektaufgaben. Insgesamt war die Entwicklung eines numerischen Werkzeugs angestrebt, dass im industriellen Umfeld verwendet werden kann, um verschleißstabile, energieeffiziente Impulswerkzeuge verbessern bzw. schneller entwickeln zu können. Dies erfolgte am praxis- und umweltrelevanten Beispiel des Rammhammers.

1.2 Voraussetzungen zur Auftragsdurchführung

Die Novicos GmbH besaß bereits vor Beginn des Vorhabens SilentHammer langjährige Erfahrungen sowohl in der Anwendung als auch in der Entwicklung von numerischen Verfahren zur Simulation von anspruchsvollen und häufig multiphysikalischen Vorgängen. Novicos bewies in vielen Industrieprojekten, in Stande zu sein, rechnergestützte Lösungen erfolgreich umzusetzen, die in der Regel auf Basis der neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse und häufig unter Einbeziehung modernster numerischer Lösungen entstanden sind.

So beschäftigte sich Novicos bereits in früheren Projekten mit der mathematischen Beschreibung von Verschleißvorgängen in Fahrzeugpressen, und zwar im Auftrag von der Volkswagen AG und der Firma Christian Karl Siebenwurst GmbH. Obwohl es in beiden Projekten um Erarbeitung von konkreten konstruktiven Modifikationen zur Behebung von auftretenden Problemen ging, konnte Novicos sich nicht nur in die Problematik des Werkzeugverschleißes einarbeiten sondern auch die besten mathematischen Verfahren zur Erfassung solcher Vorgänge in numerischen Modellen kennenlernen. Diese Erfahrungen und das damals angeeig-nete wissen stellen eine gute Basis dar, von der aus die im Rahmen des hier beantragten Projektes gestellte Aufgabe in Angriff genommen wird.

Der zweite große Themengebiet, mit dem sich Novicos befassen wird, die multikriterielle Optimierung begleitet die Novicos-Projekte seit vielen Jahren, wenngleich jeweils in einem anderen technischen Kontext. Als Beispiele können Projekte genannt werden, bei denen unter Anwendung von multikritellieren Optimierungsalgorithmen Gehäuse von Pkw-Getrieben so verbessert werden könnten,



dass bestimmte unerwünschte Schallemissionen sich reduzieren ließen. Die erarbeiteten Lösungen wurden von den Auftraggebern, Volkswagen AG, Adam Opel GmbH, Daimler AG, übernommen und zur Modifikationen der eigenen Antriebe eingesetzt. Weitere Erfahrungen konnten bei der Konstruktion von emissionsarmen Öfen in Flug-zeugküchen, Gestaltung von besonders wirksamen Aufsätzen mit optimierten Helmholtz-Resonatoren auf Lärmschutzwänden entlang der Schnellstraßen oder Konstruktion von hochkomplexen Sonaranlagen gesammelt werden.

Das Unternehmen verfügt über eigene Entwicklungsumgebungen, Systeme zur Durchführung von diversen technischen Messungen und leistungsstarke Großrechner. Neben der Erfahrung und Wissen der Mitarbeiter wird die Nutzung der erforderlichen Ressourcen durch Novicos gesichert.

Alle Novicos-Mitarbeiter haben einen Hochschulabschluss, viele sind promoviert. Auch der hohe Ausbildungsstand der Mitarbeiter unterstreicht die Befähigung von Novicos zur Ausführung der hier gestellten Aufgabe. Bei Novicos wurde eine Projektgruppe eingerichtet, die aus gut geeigneten Ingenieuren und Programmierern bestand. Sie bekamen sowohl die erforderlichen Software-Lizenzen als auch die benötigten Compiler, Entwicklungsumgebungen und Rechnerleistung zu ihrer ausschließlichen Verfügung.

1.3 Planung und Ablauf des Auftrags

Aufgrund der Ziele und Voraussetzungen des Gesamtvorhabens war es sinnvoll, die Novicos-Aktivitäten in die folgenden Arbeitspaketen einzuordnen.

- Auswahl von Konstruktionsparametern und der geeigneten Zielgrößen der Optimie-rung (AP 1),
- Festlegung von geeigneten Material- und Verschleißmodellen (AP 1),
- Definition des Entwurfsraums für alle nachfolgenden Analysen (AP 1),
- Schaffung einer effizienten Basis f
 ür ein numerisches Werkzeug zur Auslegung und Optimierung von Impulsh
 ämmern (AP 2),



- Aufnahme und Bearbeitung von Ergebnissen der akustischen Optimierung (AP 2),
- Erarbeitung und programmtechnische Umsetzung des Verfahrens zur numerischen Verschleißvorhersage (AP 3),
- Einbindung der numerischen Verschleißuntersuchung in das gesamte Simulations-werkezug (AP 3),
- Anwendung des numerischen Werkezugs zur Optimierung von Komponenten eines Rammhammers (AP 3),
- Überprüfung der numerischen Ergebnisse unter Berücksichtigung von Daten aus dem echten Offshore-Betrieb (AP 6),
- Umsetzung von programmtechnischen Ma
 ßnahmen zur effizienten Verarbeitung gro
 ßer Datenmengen im Rahmen der Optimierung von Impulsh
 ämmern (AP 6).

1.4 Wissenschaftliche und technische Projektbasis

Zum Zeitpunkt des Projektstarts gab es keine Verfahren, die eine Vorhersage der multiphysikalischen Eigenschaften von Rammhämmern wie Lebensdauer und Verschleiß unter hochem Schlagartigen Energieeintrag ermöglichten. Es waren einige wenige rein wissenschaftliche Veröffentlichungen bekannt, die jedoch immer noch sehr aufwendig, kompliziert und nicht schnell z.t. nur die Betrachtungen von Teilaspekten der im Projekt SilentHammer gestellten Aufgabe erlaubten. Dies galt sowohl für die Erstellung der Berechnungsmodelle, insbesondere Definition der benötigten Materialmodelle, wie auch für die anschließende Ableitung der Ergebnisse. Diese Methoden waren somit wenn dann eher zur Nachberechnung der Konstruktion als zur Prognose im frühen Entwurfsstadium geeignet.

Ähnlich stellate sich die Ausgangslage im Falle der Verfahren der multikritellieren Optimierung dar. Zusammenfassend konnte festgehalten werden, dass die Theorie der Optimierungsansätze, die in dem hier beantragen Vorhaben prinzipiell gut geeignet warem, gut beschrieben und bekannt war. Gleichzeitig aber war die Wahl der hier auch



praktisch zum Ziel führenden Optimierungsstrategie eine nicht gelöste und äußerst anspruchsvolle Aufgabe.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Novicos arbeitete teilweise sehr eng mit den Verbundpartnern zusammen, die sich an gleichen Arbeitspaketen beteiligten. Insbesondere ist hierbei die gegenseitige Unterstützung von der TU Hamburg bei der Entwicklung und Implementierung der Optimierungsmethoden hervorzuheben. Auch der Austausch mit dem Projektpartner Menck war sehr intensiv und erfolgte auf mehreren Ebenen: bei der Einarbeitung in die für den ausgewählten Anwendungsfall spezifischen Abläufe und technischen Anforderungen, bei der Vorbereitung und teilweise auch bei der Durchführung von Messungen zur Validierung der entstandenen Materialmodelle als auch bei der Vorbereitung der Simulationsverfahren.



2. Eingehende Darstellung

Die folgenden Kapitel stellen detailliert den Verlauf der gesamten Projektarbeit bei Novicos dar. Zuerst wird die umfangreichste Aufgabe vorgestellt: der stufenweise Aufbau eines Simulationsmodells zur effizienten Berechnung von Hammer in einem realitätsnahen Gesamtmodell. Im Weiteren werden messtechnische Untersuchungen vorgestellt, die zur Ermittlung von Materialparametern erfolgten, für die in Wirklichkeit verwendeten Werkstoffe. Abschliessend wird die Arbeit an der Entwicklung und Implementierung von Optimierungsroutinen thematisiert.

3. Testmodell FEM

Die erste Phase der Arbeit bestand darin, ein vereinfachtes numerisches Modell zu erstellen und den Vorgang des wiederholten Schlagens auf den Amboss mit dem Hammer zu reproduzieren. Alle Modelle, bei denen der Hammerschlag modelliert wurde, wurden zunächst als axialsymmetrische Fälle erstellt.

3.1. Spezifikation des Testmodells FEM

Geometrie:

Das erste Modell wurde auf die Hammer-Amboss-Pfahl-Anordnung ohne zusätzliche Elemente dazwischen vereinfacht. Das getestete System ist in der folgenden Abbildung 1 dargestellt.

Werkstoffe:

In dieser Phase der Analyse wurde auch eine Vereinfachung bei der Definition von Materialmodellen eingeführt: Das hier verwendete elastische Modell und das bilineare (elastisch-plastische) Modell wurden später durch komlexere Materialmodelle ersetzt. Materialparameter im Testmodell sind in der folgenden Abbildung 2 aufgelistet.





Abbildung 1. Axialsymmetrisches Aufprallmodell: Die Hammer- und Ambossgeometrie wurden vollständig modelliert, während das Rohr auf mehrere Elementschichten vereinfacht und die verbleibende Rohrlänge durch ein Trägerelement mit Ersatzsteifigkeit ersetzt wurde. Eine solche Vereinfachung erforderte die Einführung zusätzlicher Masse in Form von Massenpunkten in die analysierte Struktur.



Abbildung 2. Dem Modell zugeordnete Werkstoffe mit ihren Parametern. Elastizitätsmodul E, Dichte RO, Querkontraktionszahl PR, Fließspannung SIGY, Tangentenmodul ETAN



Randbedingungen (BC):

Mit dem Testmodell wurde eine erste Analyse mit 120 Einzelschlägen (Läufen) vorbereitet. Im Modell wurde ebenfalls die Schwerkraft und die dynamische Entspannung berücksichtigt (Abbildung 3).



Abbildung 3. Randbedingungen im ersten FEM Testmodell



3.2. Erste Ergebnisse für Simulationen von n Schlägen

Das erste Ziel war die Überprüfung des Modells hinsichtlich der Entwicklung von Spannungen und Dehnungen im Modell für nachfolgende Lastzyklen. Folgende Größen wurden berücksichtigt: plastische Dehnungen, Stress nach von Mises und Tresca (Abbildung 4 und 5).





120			
	8.4	421	243

Abbildung 4. Results for the anvil, for selected load (impact) cycles







Abbildung 5. Ergebnisse für den Hammer für ausgewählte Lastzyklen (Hammer-Schläge)

Der Hammer und der Amboss wurden getrennt hinsichtlich der Verteilung und Spitzen von Spannungen sowie der Verformungen analysiert.

Neben der Spannungs- / Dehnungsverteilung wurde auch die Formveränderung des Kontaktflächenprofils ausgewertet (Abbildung 6 und 7).



Abbildung 6. Verformungsprofil der Hammerkontaktfläche für ausgewählte Schlagzyklen



Abbildung 7. Verformungsprofil der Ambosskontaktfläche für ausgewählte Aufprallzyklen



3.3. Analyseergebnisse für modizierte Systemgeometrieen

Im Weiteren wurde die parametrische Analyse durchgeführt und der Einfluss verschiedener Systemabmessungen auf die Analyseergebnisse abgebildet. Wesentlich im Rahmen der Analyse war die Reduzierung plastischer Verformungen beim Kontakt von Bauteilen bei zyklischen Kollisionen. Es war generell möglich, dieses Ziel auf zwei Wegen zu erreichen: durch die Änderung der Geometrie der Kontaktflächen oder durch die Änderung der Werkstoffeigenschaften. In einem ersten Schritt wurde der Einfluss der Geometrie auf die Analyseergebnisse bei unveränderten Materialparameter überprüft Abbildung 8).



Abbildung 8. Modifikationen der Schlagflächengeometrie des Hammers

Wie bei den ersten Auswertungen der numerischen Ergebnisse wurden die hier erzielten Größen hinsichtlich der Verformungsausbreitung und der Spannungen analysiert (Abbildung 9 und 10).

		All components		
Original flat end	R1 18 400mm	R2 10 315mm	R3 2 715mm	
	Von N	lises stress		
				Effective Stress (v-m) 3.000e+02 2.750e+02 2.2500e+02 2.2500e+02 1.750e+02 1.500e+02 1.250e+02 1.250e+02 1.000e+02 5.000e+01 2.500e+01 2.500e+01
Max 433	Max 434	Max 435	Max 440	0.000e+00 _





Abbildung 9. Verteilungen der von Mises-Spannung für ausgewählte Zyklen in Kontaktbereichen









Abbildung 10. Verteilungen der von Mises-Spannung im Amboss für ausgewählte Zyklen

Die Stoßwelle im Material wurde ebenfalls ausgewertet. Die Spannungen in ausgewählten Elementen in der Hammerstruktur sind in der folgenden Abbildung 11 und 12 dargestellt.



Abbildung 11. Analyse zur Ausbreitung einer elastischen Welle im Hammer





Abbildung 12. Analyse zur Ausbreitung einer elastischen Welle im Amboss



3.4. Analyseergebnisse für Änderung von Materialparametern

Wie bereits erwähnt, kann die Verteilung von Spannungen und Verformungen im Material auf zwei Arten geändert werden. Die erste Methode wurde im vorherigen Abschnitt erörtert - Geometriemodifikationen. In diesem Abschnitt wurden die Auswirkungen auf die numerischen Ergebnisse analysiert, wenn Änderung der Steifigkeit (Materialparameter) der kollidierenden Komponenten vorgenommen werden. Sie wurden durch stuffenweise Veränderung des Elastizitätsmoduls im Simulationsmodell umgesetzt. In den Folgenden Abbildungen 13 und 14 werden die dabei erzielten Ergebnisse veranschaulicht.







Abbildung 13. Verteilungen der von Mises-Spannung für ausgewählte Zyklen in Kontaktbereichen







Abbildung 14. Verteilungen der von Mises-Spannung im Amboss für ausgewählte Zyklen

Die Stoßwelle im Inneren des Gesamtsystems wurden ebenfalls ausgewertet. Die Verläufe von Spannungen in ausgewählten Elementen der Hammerstruktur werden in den Abbildungen 15 und 16 gezeigt.





Abbildung 15. Analyse der Ausbreitung einer elastischen Welle im Hammer



Amboss:





3.5. Zusammenfassung der Ergebnisse

Der Zweck der bisher erläuterten Analysen bestand darin, eine Methodik zu entwickeln, die eine mehrfache (zyklische) Wiederholung des Stoß- / Aufpralltests ermöglicht, während die Ausbreitung von Spannungen und Verformungen in den einzelnen Elementen des Gesamtsystems möglich wird. Die Ergebnisse zeigen, dass dies auch für ein vereinfachtes achsensymmetrisches Modell gelang. In den nächsten Schritten der Projektarbeit wurde diese Methodik weiterentwickelt und das Modell um zusätzliche Komponenten und detailliertere Materialmodelle ergänzt, die die Abbildung der Verstärkungsmechanismen im Materials sowie die Entwicklung von Schäden / Fehlern im Material ermöglichten.

Die Anzahl der Aufprallzyklen wurde für diese Testmodelle auf 120 begrenzt, sie kann aber ohne weitere Anpassungen höher angesetzt warden. In den folgenden Arbeitsphasen wurden generell 1000 Zyklen simuliert. Diese starke Erhöhung der berechneten Belastungszyklen ist möglich, da die im Projekt entwickelte Modellierung sich durch eine sehr hohe Effizienz auszeichnet.

Zusätzliche Analysen der Empfindlichkeit des Modells gegenüber Änderungen der Geometrie und der Steifigkeit der Kontaktkomponenten zeigten überzeugend, dass es möglich war, die Lebensdauer (Anzahl der Zyklen bis zum Ausfall) des analysierten Systems zu beeinflussen.



4. Analyse und Auswahl der Materialmodelle

In weiteren Schritt des Modellaufbaus wurden die Berechnungen an einem vereinfachten Modell unter Verwendung verschiedener Materialmodelle und unter Berücksichtigung verschiedener Schadensphänomene durchgeführt. Auch andere Phänomene wie Dehnungsratenverstärkung, Thermoplastizität wurden im Laufe der Projektarbeit in das Simulationsmodell integriert.

4.1. Formulierungen der Materialmodelle

In der Theorie sind mehrere Modelle bekannt, mit denen Materialschäden und versagen modelliert werden können. Einige von ihnen können verwendet werden, um eine einfache Schädigung zu modellieren, für die hauptsächlich durch die plastischen Verformung werursacht wird:

- Mat_Piecewise_Linear_Plasticity (MAT_024),
- Mat_Simplified_Johnson_Cook (MAT_098),
- Mat_Plastic_Kinematic (MAT_003), etc.

Gleichzeitig sind einige dieser Modelle ausgefeilter, und zwar so, dass Schadensformulierungen und Versagenskriterien inkludiert warden können:

- Mat_Johnson_ Cook (MAT_015),
- Mat_Plasticity_With_Damage (MAT_081),
- Mat_Damage 1 (MAT_104).

Schädigungen können aber auch über eine eigenständige Modelleigenschaft modelliert warden. Z.B. in dem hier verwendeten Programm LS-Dyna bietet sich dafür die Karte Mat_Add_Erosion.

Für viele der potentiell anwendbaren Materialmodelle sind drei Optionen zur Berücksichtigung von Dehnungsrateneffekten verfügbar:

 Die Verformungsgeschwindigkeit kann unter Verwendung des Cowper- und Symonds-Modells berücksichtigt werden, das die Streckgrenze mit dem Faktor skaliert:



$$1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C}\right)^{1/\epsilon}$$

wo $\dot{\varepsilon}$ der Verformungsgeschwindigkeit entspricht: $\dot{\varepsilon} = \sqrt{\dot{\varepsilon}_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij}}$

Wenn die viskoplastische Option aktiv ist, VP = 1.0, und wenn SIGY postiv ist, wird die dynamische Fließspannung aus der Summe der statischen Spannung berechnet, $\sigma_y^s(\varepsilon_{eff}^p)$ die typischerweise durch eine Lastkurven-ID gegeben ist und die anfängliche Fließspannung SIGY, multipliziert mit dem Cowper-Symonds-Zinsterm wie folgt ermittelt:

$$\sigma_y(\varepsilon_{\rm eff}^p, \dot{\varepsilon}_{\rm eff}^p) = \sigma_y^s(\varepsilon_{\rm eff}^p) + {\rm SIGY} \times \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{\rm eff}^p}{C}\right)^{1/p}$$

wo die plastische Dehnungsrate verwendet wird. Mit diesem letzteren Ansatz können ähnliche Ergebnisse zwischen diesem Modell und dem Materialmodell erzielt werden: *MAT_ANISOTROPIC_VIS-COPLASTIC. Wenn SIGY = 0, wird stattdessen die folgende Gleichung verwendet, wobei die statische Spannung, $\sigma_y^s(\varepsilon_{eff}^p)$ durch eine Lastkurve definiert werden muss:

$$\sigma_y(\varepsilon_{\rm eff}^p, \dot{\varepsilon}_{\rm eff}^p) = \sigma_y^s(\varepsilon_{\rm eff}^p) \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{\rm eff}^p}{C}\right)^{1/p}\right]$$

Diese letztere Gleichung wird immer verwendet, wenn die viskoplastische Option deaktiviert ist.

- Noch allgemeiner ist der Ansatz, in dem eine Lastkurve (LCSR) zur Skalierung der Streckgrenze eingegeben wird. In dieser Kurve ist der Skalierungsfaktor gegenüber der Dehnungsrate definiert.
- Wenn f
 ür verschiedene Dehnungsraten unterschiedliche Spannungs-Dehnungs-Kurven bereitgestellt werden k
 önnen, kann die Referenz auf eine Tabelle (LCSS) verwendet werden. Dann wird die Tabelleneingabe in *DEFINE_TABLE erwartet.

4.2. Modelle mit Verformungsgeschwindigkeit

Ein Vergleich der Ergebnisse für Materialmodelle wurde unter Berücksichtigung der Verfestigung des Materials durchgeführt. Die Anfangsgeschwindigkeit des Hammers



wurde im Vergleich zu den ersten Modelle um ein Virlfaches erhöht, um große plastische Verformungen in einem einzigen Lauf zu erhalten und die dann entstehnden Schäden analysiert.

4.2.1. Materialmodell PLASTIC_KINEMATIC

Cowper-Symonds-Parameter in der Viskoplastizitätsformulierung zur Modellierung der Schlaggeschwindigkeit, die in das Materialmodell aufgenommen wurden (Abbildung 17).



Abbildung 17. Vergleich von Materialparametern und Beschreibung der Verfestigung.

Das Referenzmodell war das Modell der ersten Projektphase ohne locale Werkstoffverfestigung (Abbildung 18).





Abbildung 18. Vergleich der Ergebnisse: Spannungen und Verformungen im Amboss.

Signifikanter Einfluss dieser Parameter auf die Ergebnisse der numerischen Analyse war deutlich erkennbar.



4.2.2. Materialmodell PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY

Cowper-Symonds-Parameter in der Viskoplastizitätsformulierung zur Modellierung der Schlaggeschwindigkeit, die in das Materialmodell aufgenommen wurden. Hier wird eine etwas andere Formulierung der Gleichung im Materialmodell berücksichtigt (Abbildung 19 und 20).

Comparison of following materials: PLASTIC_KIN	EMATIC and PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY					
1 MID RO E PR SIGY ETAN BETA 1 7.860e-009 1.950e-005 0.2660000 430.00000 1060.0000 0.0 2 SRC SRP PS VP 40.000000 5.0000000 0.0 1.0	1 MID RQ E PR SKGY ETAN FAIL (k 7.860e-009 1.950e+005 0.2660000 430.00000 1060.0000 1.000e+021 2 C P LCSS LCSR VP LCE 40.000000 5.0000000 0 0 1.0 0					
MAT_003_v2	MAT_024_v1					
Strain rate is accounted for using the Cowper and Symonds model which scales the yield stress with the factor:	If the viscoplastic option is active, VP = 1.0, and if SIGY is > 0 then the dynamic yield stress is computed from the sum of the static stress, $\sigma_y^{e_y}(e_{eff}^p)$, which is typical-ly given by a load curve ID, and the initial yield stress, SIGY, multiplied by the Cowper-Symonds rate term as follows:					
$1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C}\right)^{1/p}$	$\sigma_{y}(\varepsilon_{\text{eff}}^{p}, \dot{\varepsilon}_{\text{eff}}^{p}) = \sigma_{y}^{s}(\varepsilon_{\text{eff}}^{p}) + \text{SIGY} \times \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{\text{eff}}^{p}}{C}\right)^{1/p}$					







Case	MAT_0	24_v1 [PIECEWISE_LINEA	R_PLASTICITY]	Effective Stress (v=n) 4.000e+62 3.647+42
Mises [400MPa]				3.33×45, 3.46×45, 3.46×45, 3.33×45, 1.33×45, 1.33×42, 1.33×42, 3.33×44, 3.3
	913	758	590	Bfective Plantic Binain 2.000e-01 1.833e-01
Plast.Str. [20%]				1.467-001 1.333-001 1.333-001 1.000-001 8.333-003 8.467-002 1.335-002 1.345-002 1.345-002 1.667-002
	8.3	12.7	12.7	Tresca (max shear stress) 2,000e+92 1,833e+92
Tresca [200MPa]				1.447+492 1.550+492 1.550+492 1.690+492 8.533+491 8.687+491 8.530+491 8.530+491 8.530+491 8.530+493 8.530+493 8.547+491 8.550+493
	526	437	306	

Abbildung 20. Vergleich der Ergebnisse: Spannungen und Verformungen im Amboss.

4.2.3. Materialmodell PLASTICITY_WITH_DAMAGE

Cowper-Symonds-Parameter in der Viskoplastizitätsformulierung zur Modellierung der Schlaggeschwindigkeit, die in das Materialmodell aufgenommen wurden. Die gleiche Formulierung der Gleichung wird für beide Materialmodelle verwendet (Abbildung 21 und 22).

	Com	parison	of follo	owing	nateria	ls: PIEC	EWISE	LINE	١R	PLAST	ICITY ar	nd PLAS	TICITY	WITH	DAMA	GE
											RO	E	PR	SIGY	ETAN	EPPE
										19	7.860e-009	1.950e+005	0.2660000	430.00000	1060.0000	1.000e+012
1	MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	FAIL	TDEL	2	2	P	LCSS •	LCSR •	EPPER	VP	LCDM •
	k	7.860e-009	1.950e+005	0.2660000	430.00000	1060.0000	1.000e+021	0.0		40.000000	5.0000000	0	0	1.000e+014	1.0000000	0
2	<u>c</u>	P	LCSS •	LCSR •	VP	LCF			3	EPS1	EPS2	EPS3	EPS4	EPS5	EPS6	EPS7
	40.000000	5.0000000	0	0	1.0 ~	0				0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
									4	ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	ES6	<u>ES7</u>
										0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1			Ν	ИАТ_02	4_v1							MA	T_081_\	/1		
H	the viso	oplastic	option	is active	e, VP = 1	.0, and	if SIGY is	; > 0 th	en	the dyn	amic yie	ld stres	s is com	puted fr	om the	sum of
	the static stress, $\sigma_y^{s}(\varepsilon_{eff}^{p})$, which is typical-ly given by a load curve ID, and the initial yield stress, SIGY, multiplied by the															
						Cowper	-Symon	ds rate	te	rm as fo	llows:					
	$\sigma_y(\varepsilon_{\text{eff}}^p, \dot{\varepsilon}_{\text{eff}}^p) = \sigma_y^s(\varepsilon_{\text{eff}}^p) + \text{SIGY} \times \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{\text{eff}}^p}{C}\right)^{1/p}$															





Case	MAT_0	24_v1 [PIECEWISE_LINEAF	PLASTICITY]	Effective Messes (s-eth) 4-(dife=12)
Mises [400MPa]				5.336453 3.465463 3.465463 3.635463 3.636464 3.636464 3.636464 3.338464 3.338464 3.338464 3.338464
	913	758	590	Effective Plants: Aman 2.60%-01 1.83%-01
Plast.Str. [20%]				6.407/001 - 6.406/01 - 6.406/01 - 6.407/041 - 6.407/041 - 6.407/041 - 6.407/041 - 6.407/041 - 6.407/041 -
	8.3	12.7	12.7	54420 (File (File) (File) 2.000x=72 1.855x=92
Tresca [200MPa]				1.001-000 J 1.000-000 J 1.001-000 J 1.001-000 J 1.001-000 J 8.001-000 J 5.000-000 J 1.000-000 J 1.000-000 J
	526	437	306	
Case	MAT	081 v1 [PLASTICITY WITH	1 DAMAGE]	Effective Stress (r-rt) A desta-Str
Case Mises [400MPa]		081_v1 [PLASTICITY_WITH	1_DAMAGE]	Environ Escala pera America J. Marveca J. Statesta J. Statesta J. Statesta V. Statesta V. Statesta V. Statesta V. Statesta V. Statesta J. Statesta V. Statesta V. Statesta J. Statesta
Case Mises [400MPa]	MAT_ 913	081_v1 [PLASTICITY_WITH	1_DAMAGE]	Elizated Banas (net) 3.64%-942 3.84%-942 4.84%-942 4.84%-942 3.86%-94%-94%-94%-94%-94%-94%-94%-94%-94%-94
Case Mises [400MPa] Plast.Str. [20%]	913 913	081_v1 [PLASTICITY_WITH 758	H_DAMAGE]	Effects & Bank - P4 Address Addres Address Address Address Address Address Ad
Case Mises [400MPa] Plast.Str. [20%]	MAT_ 913 8.3	081_v1 [PLASTICITY_WITH 758 12.7	H_DAMAGE] 590 12.7	Effects 6 80-10-04 3.847-923 3.847-923 3.847-923 3.847-923 3.847-923 3.847-92 3.847-92 3.828-92 3.829-92 3
Case Mises [400MPa] Plast.Str. [20%] Tresca [200MPa]	MAT_ 913 913 8.3 8.3	081_v1 [PLASTICITY_WITH 758 12.7	H_DAMAGE] 590 12.7	Result State ord 348/942 348

Abbildung 22. Vergleich der Ergebnisse: Spannungen und Verformungen im Amboss.

4.2.4. Materialmodell JOHNSON_COOK

Das Johnson-Cook-Modell stellte sich als eines der am besten konstruierten Materialmodelle, das verschiedene Effekte der lokalen Verfestigung auch unter Berücksichtigung der lokalen Temperaturveränderungen berücksichtigt. Es macht zudem möglich, das sogenannte Kriterium von Cowper-Symonds in das Modell einzubeziehen (Abbildung 23 und 24).





Abbildung 23. Vergleich von Materialparametern und Beschreibung der Verfestigung.



Abbildung 24. Vergleich der Ergebnisse: Spannungen und Verformungen im Amboss.



4.2.5. Materialmodell DAMAGE_1

Zur Modellierung des Materialversagens wird ein Modell nach Cowper-Symonds eingesetzt. Dafür sind mehrere numerische Implementierungen verfügbar, die im Folgenden gegenüber gestellt warden (Abbildung 25 und 26).

			Varia	nt witł	nout e	rosion	[MAT	104]:		
	1	MID	RO	E	PR	SIGY	LCSS	LCDS •		
		þ 8	7.860e-009	1.950e+005	0.2660000	430.00000	0	0		
	2	01	<u>C1</u>	02	<u>C2</u>	EPSD	Sor ESPR	DC	FLAG	
		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5000000	0	~
	3	<u>VK</u>	<u>VM</u>	<u>R00 OR F</u>	R45 OR G	<u>R90 OR H</u>	L	M	N	
		205.00000	0.2000000	0.0	0.0	0.0	1.5000000	1.5000000	1.500000	
	4	AOPT •			MACE					
		0.0	0	0	1 ~					
	5	XP	YP	ZP	<u>A1</u>	<u>A2</u>	<u>A3</u>	_		
		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
	6	<u>V1</u>	<u>V2</u>	<u>V3</u>	<u>D1</u>	<u>D2</u>	<u>D3</u>	BETA		
		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
Strain rate is accounted for	u	sing the	Cowpe	er and S	ymonds	5	To cor	nvert th	ese co	nstants, set the viscoelastic
model which scales the	y	ield stre	ess with	the fac	tor:		const	ants, V _k	and V	$\prime_{ m m}$, to the following values:
1 +						V_k V_m	$\sigma = \sigma \left(\frac{1}{C}\right)^{\frac{1}{p}}$ $\sigma = \frac{1}{p}$			

Abbildung 25. Vergleich von Materialparametern und Beschreibung der Verfestigung.





Abbildung 26. Vergleich der Ergebnisse: Spannungen und Verformungen im Amboss.

4.3. Modelle mit Berücksichtigung des Materialversagens

In der weiteren Phase der Modellverfeinerung wurden die Materialmodelle in das bisherige Systemmodell integriert und getestet, die, Materialschädigung wegen der Materialermüdung beschreiben.

Ein elasto-visko-plastisches Material mit einer beliebigen Spannungs-Dehnungs-Kurve und einer beliebigen Abhängigkeit der Dehnungsrate konnte definiert werden. Schäden wurden berücksichtigt, bevor ein Bruch auftritt. Es konnte auch ein Versagen definiert werden, das auf einer effektiven plastischen Verformung oder einer minimalen Zeitschrittgröße basiert.



Verfügbare Einstellungen enthalten:

- ORTHO
- ORTHO_RCDC
- ORTHO_RCDC1980
- STOCHASTIC

Das Einbeziehen von ORTHO ermöglicht die Einbeziehung eines orthotropen Schadensmodells. Für die ersten numerischen Tests wurde ein Modell einer einfachen Aluminiumplatten eingesetzt. Es konnte beobachtet warden, dass richtungsabhängige Schäden sich ausbildeten, nachdem eine definierte Versagensdehnung unter Spannung erreicht wurde. Sie entwickelten sic him Modell weiter, bis eine Zugbruchdehnung in einer der beiden orthogonalen Richtungen erreicht wurde. Nachdem an allen Integrationspunkten ein Bruch festgestellt wurde, wurde das beschädigte Element im Gesamtmodell gelöscht. Die Option ORTHO_RCDC ruft das von Wilkins entwickelte Schadensmodell auf [Wilkins et al. 1977]. Die Option ORTHO_RCDC1980 ruft ein Schadensmodell auf, das auf Stammin-Varianten basiert, wie sie von Wilkins entwickelt wurden [Wilkins et al. 1980]. Eine nichtlokale Formulierung, die zusätzlichen Speicher erfordert, wurde verwendet, wenn eine charakteristische Länge definiert war.

Im Projekt wurde ein elasto-visko-plastisches Materialmodell (Mat_Plasticity_With_Damage - MPD) verwendet, um den Verformungsprozess der Hammer- und Envil-Strukturen möglichst realitätsnah zu simulieren. Das Modell verwendet zwei Kurven: effektive Spannung (ES) vs. effektive plastische Dehnung (EPS) und Beschädigung (DAM) vs. EPS (Abbildung 27).





Abbildung 27. Die nicht-lineare Versagenskurve.

Die Implementierung der nichtlinearen Versagenskurve eröffnete die Möglichkeit, einen plötzlichen Verlust der Materialkontinuität auszulassen. Dadurch konnten die Simulationsergebnisse nochmal verbessert werden. Es wurde bei der Modellierung (EPFS) plastische Versagensdehnung eine effektive als Erosionskriterium angewendet, wobei eine Materialerweichung unter Verwendung einer nichtlinearen Schadenskurve definiert wurde. Der erste Punkt der Kurve stellt die Versagensdehnung (EFPS) dar, be idem der Schaden gleich 0 ist. Nach dem Überschreiten des EPFS beginnt das Erweichen. Daher mussten folgende Punkte mit größeren Werten von EPS und DAM definiert werden, bis die Bruchdehnung (DAM) erreicht ist = 1) (Abbildung 28).

1	MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	EPPE	TDEL
	þ9	7.860e-009	1.950e+005	0.2660000	430.00000	1060.0000	0.0900000	1.000e-012
2	<u>c</u>	<u>P</u>	LCSS •	LCSR •	EPPER	<u>v</u> e	LCDM •	NUMINT
	40.000000	5.0000000	8	0	0.5000000	.0	14	0
3	EPS1	EPS2	EPS3	EPS4	EPS5	EPS6	EPS7	EPS8
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	ES6	ES7	ES8
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Abbildung 28. Implementierte Materialkarte mit Zellen für beschädigte Materialparameter: PLASTICITY_WITH_DAMAGE

EPPF - Plastische Verformung, fs, bei der die Materialerweichung beginnt (logritmisch).

EPPFR - Plastische Dehnung, bei der das Material reißt (logrithmisch).


4.3.1. Materialmodell PLASTICITY_WITH_DAMAGE

Alle Materialdaten in Bezug auf die Dehnungsrate und den Materialschaden waren in der frühen Projektphase Literaturdaten - es handelte sich nicht um Materialdaten für die zu modellierenden Hammer- und Ambossmaterialien, die erst in den letzten Projektmonaten experimentell ermittelt werden konnten (Abbildung 29 und 30).

1	MID	RO	5	PD	SICY	FTAN	EDDE	TDEI	
Γ.	he	7.860e-009	1.950e+005	0.2660000	430.00000	1060.0000	0.0900000	1.000e-012	
2	C	P	LCSS	LCSR •	EPPER	VP		NUMINT	²
	40.000000	5.0000000	8	0	0.5000000	0.0	14	0	380 63 62 63
3	EPS1	EPS2	EPS3	EPS4	EPS5	EPS6	EPS7	EPS8	Effective plants on an (v) + Lik Official Appanet Bick by Lik Andron
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
4	ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	ES6	ES7	ES8	z ** /
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Read and the second sec
									62 63 62 63 62 63 63 66 66 66 66 66 66 66 66 66 66 66
Material card MAT_081 with damage								Cures of ES-EPS and DAM-EPS	
	Point no. Effective plastic strain						Damage		
		[%]							[-]
		1 0.00							0.00
	2 1.00)			0.40	
	3 4			4.00	4.00			0.80	
	4 20.00			00			0.99		
	5 40.00						1.00		

Abbildung 29. Materialparameter und Punkte der im Materialmodell verwendeten DAM-EPS-Kurve.





Abbildung 30. Vergleich der Ergebnisse: Spannungen und Verformungen im Amboss.

Eine Analyse der Ausbreitung von Schäden / Materialzerstörung wurde ebenfalls durchgeführt. Die erzielten Ergebnisse warden in den folgenden Abbildungen 31 und 32 gezeigt.





Abbildung 31. Plastische Dehnung und Schadensentwicklung für Material PLASTICITY_WITH_DAMAGE PLASTICITY_WITH_DAMAGE



Abbildung 32. Vergleich der plastischen Dehnungsentwicklung zwischen Modellen ohne Schadensparameter und mit Schadensparametern.



4.3.2.Generalisierter inkrementeller s Schadensmodell MOdel GISSMO

stresszustandsabhängiger

Der Materialschaden wurde mitmodelliert, um die Materialschädigung durch Errosion in die Gesamtmodellierung miteinzubeziehen. Es handelte sich um eine zusätzliche Zerstörungsparameterkarte.

GISSMO + : PLASTIC_KINEMATIC (MAT_003) PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (MAT_024)

Das Versagensmodell GISSMO ist verfügbar im Gesamtmodell als Ergänzung der Karte *ADD_EROSION*. Solches Materialmodell wurde bereits auf die Effizienz in früheren Systemmodellen überprüft (Abbildung 33 und 34).





Failure strain depending on



Abbildung 33. Beschreibung der Parameter zur Schadensmodellierung in der Karte ADD_EROSION.





Abbildung 34. Beschreibung der modellierten Materialkarten.

Die mit der umfangreichen Materiallmodellierung erzielten Ergebnisse sind in den folgenden Abbildungen 35, 36 und 37 zu sehen.



Abbildung 35. Zusammenfassung der Ergebnisse für verschiedene Materialien mit Schadensparametern für den Hammer







Abbildung 36. Schäden und Ausbreitung plastischer Verformungen im Kontaktbereich für GISSMO-Schäden und MAT_PLASTIC_KINEMATIC.



Abbildung 37. Vergleich der Ergebnisunterschiede für kinematisches Kunststoffmaterial mit und ohne Fehlerparameter.



4.3.3. Materialmodell Johnson-Cook

Das letzte der bewerteten und verwendeten Materialmodelle im Zusammenhang mit der Einführung von Materialschaden- und -versagensparametern ist das Johnson Cook-Materialmodell. Eine kurze Beschreibung für dieses Modell enthält die folgende Abbildung 38.

Johnson and Cook express the flow stress as: $\sigma_y = \left(A + B\bar{\varepsilon}^{p^n}\right)(1 + c\ln\dot{\varepsilon}^*)$ Where, A, B, C, N, and M = input constants $\bar{\varepsilon}^p$ = effective plastic strain $\dot{\varepsilon}^* = \begin{cases} \frac{\dot{\overline{\varepsilon}}}{EPS0} & \text{for VP.EQ.0} & (\text{normalized effective total strain-rate}) \\ \frac{\dot{\overline{\varepsilon}}^p}{EPS0} & \text{for VP.EQ.1} & (\text{normalized effective plastic strain rate}) \end{cases}$ $T^* = \text{homologous temperature} = \frac{T - T_{\text{room}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}}$ The quantity $T - T_{\text{room}}$ is stored as extra history variable 5. $\Delta T = \frac{1}{\rho C_p} \int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon_p^n$ EROD **Erosion Flag:** EQ.0.0: default, element erosion allowed. NE.0.0: element does not erode; deviatoric stresses set to zero when element fails. The strain at fracture is given by: $e^f = \max([D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*][1 + D_4 \ln \epsilon^*][1 + D_5 T^*], \text{EFMIN})$ where σ^* is the ratio of pressure divided by effective stress Fracture occurs when the damage parameter $D = \sum \frac{\Delta \overline{\epsilon}^p}{f}$ reaches the value of 1. D is stored as extra history variable 4 in shell elements and extra history variable 6 in solid elements. D1-D5 Failure parameters, see equations below. A negative input of D3 will be taken as its absolute value.



A choice of three spall models is offered to represent material splitting, racking, and failure under tensile loads.					
S	pall type:				
	EQ.0.0: default set to "2.0",				
	EQ.1.0: Tensile pressure is limited by PC, i.e., p is always \geq PC,				
	EQ.2.0: σmax ≥ -PC triggers shell element deletion and tensile stresses to be reset to zero in solid elements:Only com- pressive stresses are subsequently allowed in solids,				
	EQ.3.0: p < PC triggers shell element deletion and pressure to be reset to zero in solid elements:Tensile pressure is subsequently disallowed in solids.				

In diesem Fall wurden die Ergebnisse im Hinblick auf die Überprüfung der Materialschadensparameter analysiert. Die Ergebnisse für dieses Materialmodell wurden mit den früheren Ergebnissen für das PLASTICITY_WITH_DAMAGE-Modell verglichen (Abbildung 38).



Abbildung 38. Vergleich von Schäden und plastischer Dehnung.



4.4. Analyseergebnisse für starren Hammer

Eine Reihe von Analysen wurde auch für ein System durchgeführt, bei dem der Hammer al seine starre Struktur modelliert wurde. Eine solche Annahme ermöglichte es, die Anzahl der Faktoren, die das Endergebnis beeinflussen, zu begrenzen und sich auf ein einzelnes Teil zu konzentrieren - in diesem Fall den Amboss und den Zustand der Verformung und Spannung in seiner Struktur (Abbildungen 39 und 40.



Abbildung 39. Ambossprofilverformung - für verschiedene Materialien und Eigenschaften.





Abbildung 40. Verformung des Ambossmittelpunkts für ausgewählte Läufe.

Die auf diese Weise durchgeführte Analyse ermöglichte es, die Modelldetails auf der Ambosskontaktfläche in nachfolgenden Aufprallzyklen zu reduzieren. Die ermittelten Verschiebungskurven von Punkten auf der Ambossoberfläche zeigten, dass mit zunehmender Anzahl von Zyklen das Material sich verstärkte und die Verschiebungen nahmen ab und zwar entlang einer quasi-logarithmischen Änderung (Abbildung 41 und 42).



Abbildung 41. Vergleich der Ergebnisse für zwei Varianten: verformbarer Hammer und starrer Hammer. Ambossverformung für verformbaren und starren Hammer





Abbildung 42. Einfluss der Hammersteifigkeit auf die Ergebnisse - Verformung der Ambossaufprallfläche



4.5. Analyseergebnisse für die lokale Hammerversteifung

Fortsetzung der Untersuchung des Einflusses von Materialparametern auf das Endergebnis befasste sich ebenfalls mit der Modellierung der lokalen Verstärkung des Materials am Kontakt- / Aufprallpunkt. Diese lokale Änderung der Eigenschaften kann z.B. durch Wärmebehandlung erreicht werden.

*MAT_PLASTIC_KINEMATIC_(TITLE) (003) _ (2) TITLE PK MID 1 7.860e-09 1.950e+05 0.266 SRC 40.00 5.00 1.0 *MAT_PLASTIC_KINEMATIC_(TITLE) (003) (2) TITLE Hard MID 9
 E
 PR
 SIGY
 ETAN
 BET/

 7.860e-09
 2.350e+05
 0.2660000
 530.00000
 1060.0000
 0.0
 SRC 40.0000 0.0 1.0 5.0000000 *MAT_ELASTIC_(TITLE) (001) (1) Model 1: ТПІЕ 2.350e+05 0.2660000 530.00000 Elast MID 3 NOT USED Model 2:
 RO
 E
 PR
 DA

 7.860e-09
 1.950e+05
 0.2660000
 0.0
 2.950e+05 0.2660000 930.00000

Das modifizierte Modell wird auf der Abbildung 43 erläutert.

Abbildung 43. Materialparameter für ausgewählte Komponenten mit steiferem Material für das Hammerende. Das Modell wurde für zwei verschiedene Materialsteifigkeiten berechnet.

Die Ergebnisse wurden auf den Einfluss der lokalen Änderung der Steifheit auf die Verteilung von Spannungen und Verformungen im Material analysiert (folgende Abbildungen44, 45 und 46).





Abbildung 44. Verteilungen der von Mises Spannungen im Material und im Kontaktbereich.



Abbildung 45. Verteilungen der plastischen Dehnungsspannungen im Material im Kontaktbereich.





Abbildung 46. Ambossprofilverformung für 3 verschiedene Steifigkeiten.

Die obigen Ergebnisse zeigen einen positiven Effekt der aufgebrachten Materialverstärkung auf die Verringerung von Verformungen in der Hammerstruktur. Die Modifikation der Kontaktfläche erhöhte das Spannungsniveau in der gehärteten Materialschicht, verringerte jedoch die Ansammlung von plastischen Verformungen. Andererseits nahm die Verformung des Ambosses zu, die im Kontaktbereich eine geringere Steifheit aufweist. Dies war insgesamt ein plausibles Simulationsergebnis.

4.6. Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde eine mehrstufige Analyse durchgeführt. Die Arbeit begann mit der Erstellung eines Modells, das eine mehrfache / zyklische Schleife der Analyse ermöglicht, wodurch es möglich wurde, die Entwicklung von Spannungen und Verformungen im Material in nachfolgenden Aufprallzyklen zu beobachten.

Als nächstes wurde das Modell analysiert, um die Parameter herauszuarbeiten, die den Verlauf von Materialänderungen während der zyklischen Belastung beeinflussen. Diese Faktoren sind: die Geometrie der Kontaktflächen und die Steifigkeit der einzelnen Komponenten, sowohl globale als auch lokale Änderungen der Materialparameter.

Unter Berücksichtigung dieser Schlussfolgerungen wurde die in einer weiteren Untersuchungsreihe geprüft, welches Materialmodell auszuwählen war. Das ausgewählte Materialmodell sollte möglichst viele Materialparameter beschreiben, nicht nur hinsichtlich des linearelastischen Verhaltens, sondern auch im plastischen Bereich. Dabei sollten auch die Parameter für die Verstärkung des Materials, die



Parameter für die Beschädigung / Schwächung des Materials sowie das Versagen selbst berücksichtigt werden.

Das verwendete Berechnungsprogramm LS-Dyna bietet mehrere alternative Materialmodelle, die alle diese Parameter berücksichtigen. Die final ausgewählten Materialmodelle wurden ergänzt um weitere von Novicos programmierte Karten.

In diesem Kapitel wurden die entsprechenden Materialmodelle ausgewählt. Die durchgeführten Tests bestätigten den Einfluss zusätzlicher Materialparameter im Bereich der Verstärkung und Beschädigung von Kunststoffmaterialien auf die Endergebnisse - das Materialverhalten.



5. Fortgeschrittene FEM-Modelle

Die nächste Phase der Arbeit konzentrierte sich auf komplexere Geometrie. Basierend auf CAD-Modellen wurden zwei achsensymmetrische Anwendungsfälle im Rechner abgebildet.

5.1. Beschreibung der Modelle

In der nächsten Arbeitsphase wurde die Analyse für Modelle mit erweiterter Geometrie basierend auf der technischen Dokumentation durchgeführt. Die Beschreibung der Modelle finden Sie unten.

Geometrie:

Das System wurde um zusätzliche Zwischenadapter zwischen Amboss und Pfahl erweitert. Zusätzlich gibt es einen signifikanten Unterschied in der Geometrie des Ambosses und des Hammers (Abbildung 47).



Abbildung 47. Querschnittsansichte neuer Systemmodelle, CAD-Modelle.

Bei diesen Modellen wurde die Schwerkraft aufgegeben, die durch Balkenelemente ersetzt wurde, die den Amboss gegen den Pfahl drückten - um zu verhindern, dass er



sich nach dem Aufprall nach oben bewegt (eliminieren Sie den Effekt des elastischen Rückpralls) (Abbildung 48).



Abbildung 48. Neue Aufprallmodelle - FE-Achsensymmetriemodelle.

Randbedingungen und Werkstoffe:

Die Analyse für diese Systeme wurde auch im Hinblick auf die Überprüfung der Materialmodelle und der Randbedingungen durchgeführt (Abbildung 49).



Abbildung 49. In dieser Arbeitsphase getestete FEM-Modellkonfigurationen und Materialmodelle.



5.2. Simulationsergebnisse

Die Zusammenfassung der Ergebnisse ist unten dargestellt. Es wurden verschiedene Varianten analysiert: auch unter Berücksichtigung von Temperatur- und Schadensparametern. Die Berechnungen wurden auch für eine größere Anzahl von Lastzyklen durchgeführt: sogar bis zu 1000 Zyklen (Abbildungen 50, 51 und 52).







Abbildung 50. Zusammenfassung der Ergebnisse: Spannung Tresca und von Mises und plastische Verformung für Modell 1 - bis zu 500 Zyklen.









Abbildung 51. Zusammenfassung der Ergebnisse für Modell 2 mit zusätzlichen Ergebnissen für Temperatur und Beschädigung. Möglich dank der Erweiterung des Materialmodells um zusätzliche Materialparameter - bis zu 900 Zyklen.







Run 700					
Max	417	240	14	21.11	0.7
Run 900			9		
Max	349	200	16.8	21.4	0.8
	Effective Stress (v-m)	Tresca (max shear stress)	Effective Plastic Strain	Temperature	History Variable#6
Scale	2.500e+012 2.292e+02 2.083e+02 1.875e+02 1.667e+02 1.458e+02 1.250e+02 8.333e+01 6.250e+01 4.167e+01 2.083e+01 0.000e+00	1.200e+02 1.100e+02 1.000e+02 9.000e+01 8.000e+01 5.000e+01 4.000e+01 3.000e+01 1.000e+01 1.000e+01 0.000e+01 1.000e+01 1.000e+01 1.000e+01 0.000e+00	2.000e-02 1.833e-02 1.667e-02 1.500e-02 1.333e-02 1.167e-02 8.333e-03 6.667e-03 5.000e-03 3.333e-03 1.667e-03 0.000e+00	2.010e+01 2.009e+01 2.008e+01 2.007e+01 2.007e+01 2.005e+01 2.005e+01 2.005e+01 2.003e+01 2.003e+01 2.002e+01 2.001e+01 2.000e+01	2.000e-01 1.833e-01 1.667e-01 1.500e-01 1.333e-01 1.167e-01 1.000e-01 8.333e-02 6.667e-02 5.000e-02 1.667e-02 0.000e+00

Abbildung 52. Zusammenfassung der Ergebnisse für Modell 3 - bis zu 900 Zyklen.

Schließlich wurden die Ergebnisse der obigen Berechnungen untereinander verglichen (Abbildung 53).



Abbildung 53. Ergebnisvergleich für verschiedene Materialparameter mit zusätzlichen Materialparametern, die Einfluss auf das endgültige Materialverhalten haben

5.3. Zusammenfassung

Dieses Kapitel ist eine Erweiterung der bisher durchgeführten Arbeiten / Forschungen. Die Materialmodelle, Modellannahmen und BCs aus dem vereinfachten Modell (Kapitel 1) wurden durch die erweiterten / detaillierten Modelle ergänzt.

Ein wichtiger Effekt ist die Festigung des Materials bei 10% plastischer Dehnung (Schlussfolgerung basierend auf Forschung - Modell 3).

Die in diesem Kapitel der Arbeit durchgeführten Analysen bestätigen den Einfluss von Materialparametern außerhalb des elastischen Bereichs auf die Endergebnisse

Diese Ergebnisse bestätigen die Notwendigkeit zusätzlicher experimenteller Studien, um Informationen über das plastische Verhalten des Materials / Verformungsverstärkung, Beschädigung und Materialparameter in Bezug auf das Ermüdungsverhalten des Materials bereitzustellen.



6. Messtechnische Untersuchungen

Zur Auswahl der Materialparameter wurden zusätzliche experimentelle Tests durchgeführt. Es wurden zwei Arten von Tests durchgeführt: Ermüdungstests an Sanduhrproben und Schlagversuche an Platten.

6.1. Theoretischer Hintergrund der messtechnischen Materialuntersuchungen Die bisher durchgeführten numerischen Tests haben gezeigt, dass zusätzliche experimentelle Tests durchgeführt werden müssen, um die Materialparameter hinsichtlich der plastischen Verformung und des Materialschadens / Verschleißprozesses zu bestimmen

Nachstehend wurde eine kurze Beschreibung und Einführung in die oben genannten Probleme im Zusammenhang mit der Verschleißermüdung des Materials erstellt, um die Essenz dieses Phänomens besser zu beleuchten.

Ermüdung

Die folgende Abbildung zeigt das typische Lebensdauerdiagramm, das nach Angaben der Autoren durch drei oder vier Stufen gekennzeichnet ist. Diese vier Stufen können wie folgt charakterisiert warden (Abbildung 54):

- Endliche Ermüdungslebensdauer, die sich vom Bereich niedriger Ermüdung (LCF) bis zum Bereich hoher Ermüdung (HCF) erstreckt. Die tödlichen Risse treten am häufigsten an der Oberfläche auf.
- II. Herkömmliche HCF-Ermüdungsgrenze. Es ist durch irgendeine Form der Lokalisierungsschwelle f
 ür zyklische Dehnungen gekennzeichnet. Sie entspricht der PSB-Schwelle f
 ür duktile Einzelmetalle
- III. Bereich der endlichen Lebensdauer bei sehr hoher Zyklusermüdung (VHCF). Mughrabi schlägt vor, zwei Klassen metallischer Werkstoffe zu unterscheiden: Werkstoffe des Typs I sind reine duktile einphasige Metalle, die keine äußeren inneren Defekte enthalten; Typ II-Materialien enthalten interne Defekte wie nichtmetallische Einschlüsse / Dispersoide. Bei Materialien des Typs II entstehen Risse durch innere Defekte und führen zum sogenannten



Fischaugenbruch. Im Gegensatz dazu findet bei Materialien des Typs I eine Rissinitiierung an der Oberfläche statt, da sich sehr kleine, aber irreversible mikrostrukturelle Änderungen über eine sehr große Anzahl von Lasten ansammeln. Dieser Bereich liegt unter der PSB-Schwelle

 IV. VHCF-Ermüdungsgrenze. Das Vorhandensein einer Ermüdungsgrenze im Zusammenhang mit Stadium IV wird noch diskutiert. Einige Autoren (siehe z. B. Bathias und Paris, 2004) schlagen eine kontinuierlich abnehmende Stresslebensdauer-Reaktion vor und ziehen es vor, eine Ermüdungsfestigkeit einzuführen, die mit einer bestimmten Anzahl von Zyklen verbunden ist, anstatt eine Ermüdungsgrenze. Andere (siehe z. B. Mughrabi, 2002) schlagen das Vorhandensein einer Ermüdungsgrenze unterhalb der Irreversibilitätsschwelle vor, die durch nicht schädlichen Schlupf oder vernachlässigbare Schlupf-Irreversibilität und unendliche Ermüdungslebensdauer gekennzeichnet ist.



Abbildung 54. Schematische Darstellung der vorgeschlagenen Formen einer mehrstufigen S-N-Kurve. (a) nach Nishijiama und Kanazawa (1999).

Verschleiß

IMPACT, OR PERCUSSIVE, WEAR wurde definiert als "der Verschleiß einer festen Oberfläche, der durch Perkussion verursacht wird, was eine wiederholte Exposition gegenüber dynamischem Kontakt durch einen anderen Körper ist. Schlagverschleiß



ist eng mit erosivem Verschleiß verbunden. Der Hauptunterschied besteht darin, dass die Körper beim Aufprallverschleiß dazu neigen, groß zu sein und an einer genau definierten Stelle auf kontrollierte Weise Kontakt aufzunehmen, während bei der Erosion die erodierenden Partikel klein sind und zufällig mit der Zieloberfläche interagieren (Abbildung 55).



Abbildung 55. Versagen biem Verschleiß durch Stöße.

Verformung währen Stoßbelastung

In Körpern, die einer wiederholten Impulsbelastung ausgesetzt sind, wurden charakteristische unterirdische Zonen für eine Vielzahl von Materialien unter verschiedenen Testbedingungen (sowohl bei normaler als auch bei zusammengesetzter Einwirkung) beobachtet. Im Allgemeinen sind drei unterirdische Bereiche zu sehen, wie in Abbildung 55 rechts gezeigt. Das erste, am weitesten von Kontaktfläche entfernte, besteht aus ungestörtem Grundmaterial. der Die Verformungszone, der Zwischenbereich, besteht aus plastisch verformtem Grundmaterial. Die Verformung reicht von Null an der Grenzfläche zur Zone 1 bis zu einem Maximum an der Grenzfläche zum dritten Bereich, der weißen Schicht. Die



weiße Schicht, die die Kontaktfläche enthält, ist normalerweise homogen und fein strukturiert.

Ein anderes System unter der Oberfläche entsteht, wenn eine spröde oder nicht verformende Matrix einem wiederholten Aufprall ausgesetzt wird. Es bildet sich immer noch eine weiße Schicht, aber das Grundmaterial neigt dazu, unverformt zu bleiben (Abbildung 55 links).

Mechanismen des Materialabtrags

Die Mechanismen, mit denen Material durch wiederholte Stöße von einer Oberfläche entfernt werden kann, umfassen Folgendes (Abbildung 56):

- Oxidativer Abbau: mildes Verschleißregime, bei dem Kontaktkörper durch Oxidfilme getrennt sind, wodurch der Kontakt von Metall zu Metall verringert wird
- Adhesion: ein strengeres Verschleißregime, das durch Materialverschmierung und -übertragung gekennzeichnet ist
- Abrasion: ebenso schwere Einkörper- oder Zweikörpermoden führen zur Bildung von Pflugnuten
- Oberflächenermüdung: wieder ein stärkerer Verschleiß, der zur Bildung von Rissen unter der Oberfläche und anschließender Delaminierung oder Abplatzung des Oberflächenmaterials führt
- Plastische Verformung: dies führt zwar nicht zu einer tatsächlichen Materialentfernung, führt jedoch zu einer Verschiebung des Materials aus dem Kontaktbereich durch "Pilzbildung".





Abbildung 56. Schematische Darstellungen der verschiedenen Mechanismen des Aufprallverschleißes

Plastische Verformung

Während der Massenverlust beim Aufprallverschleiß hauptsächlich auf Verschleißteile zurückzuführen ist, die aus den unterirdischen Zonen entstehen, tritt Verschleiß auch infolge plastischer Verformung und anschließender "Pilzbildung" der aufprallenden Körper auf, was zur Bildung von Vorder- und Hinterkanten führt.



Einfluss auf Verschleiß

Die größten Einflüsse auf normale und zusammengesetzte Aufprallverschleißfehler sind Kontaktspannung und Gleitgeschwindigkeit. Die Größe von beiden beeinflusst direkt die Bildung der unterirdischen Zonen in den aufprallenden Körpern. Bei geringen Stoßspannungen gibt es Hinweise auf lokale Brüche und Verformungen. Bei deutlich höheren Spannungen tritt eine größere Verformung auf und es bildet sich eine ausgeprägte Verformungszone. Die Verschleißraten nehmen mit zunehmender



Kontaktspannung zu, wie in Abb. Unten gezeigt. Die Daten sind eher als Änderung der Probenhöhe als als Massenverlust aufgetragen, da die Stoßspannung durch Ändern der Kontaktfläche variiert wurde und daher die Proben mit größerem Durchmesser mehr Masse verloren hätten (Abbildung 57).



Abbildung 57. Versagen biem Verschleiß durch Stöße.



6.2. Verschleißmessung

Ermüdungstests wurden im Bereich der geringen Zyklusfestigkeit an Sanduhrproben durchgeführt (Abbildung 58).



Abbildung 58. Sanduhrproben für Ermüdungstests.

Die Probe wurde in die Backen einer Instron-Testmaschine montiert und mit einer sich zyklisch ändernden Last konstanter Amplitude belastet (Abbildung 59 und 60). Die Tests wurden für die folgenden Lastwerte durchgeführt: $\pm 45kN$, $\pm 47.5kN$, $\pm 50kN$, $\pm 55kN$ oraz $\pm 60kN$.





Abbildung 59. Eine Probe in den Backen der Testmaschine.



Abbildung 60. Diagramm zur Änderung der zyklischen Belastungen bei konstanter Spannungs- / Kraftamplitude



Abbildung 61. Eine mikroskopische Aufnahme zeigt den Unterschied in der Oberflächenqualität der Proben a) der gelieferten Probe mit einer Annäherung an die Schadensstelle während des ersten Ermüdungstests - zusätzliches Schleifen der Probenoberfläche war erforderlich, um diese Mikrokerben zu beseitigen, b) die Probe nach zusätzlichem Schleifen mit geglätteter Oberfläche.



6.2.1. Lastkraft mit Kraft: 3Hz ± 45kN - 2 Proben Anzahl Belastungszyklen zum Versagen: 42 697/36 901

Wir beginnen die Analyse der Ergebnisse mit den kleinsten Lastwerten (der höchsten Festigkeit, die in Lastzyklen berechnet wird). Es wurden nur ausgewählte Lastzyklen aufgezeichnet. Daher war zu diesem Zeitpunkt die geeignete Auswahl der Probenahme (Datenaufzeichnung) wichtig (Abbildung 62).



Abbildung 62. Änderung der zyklischen Last mit konstanter Amplitude für zyklische, symmetrische Last \pm 45 kN

Proben nach den Tests:



Abbildung 63. Proben nach dem Testen - Brechen mit einer Last von ± 45 kN.

Das Ergebnis des Tests ist hauptsächlich die zyklische Dehnungskurve der Sanduhrprobe. Unten (Abbildung 64) sind sie in Form einer Verformung-Last-Kurve dargestellt.





Abbildung 64. Zyklische Dehnungskurve für eine Last von \pm 45 kN (begrenzt auf den ausgewählten Zyklus - rechts).

6.2.2. Lastkraft mit Kraft: 3Hz ±47.5kN - 2 Proben Anzahl Belastungszyklen zum Versagen: 17 715/22 924

Repräsentativer Verlauf der Belastung:



Abbildung 65. Änderung der zyklischen Last mit konstanter Amplitude für zyklische, symmetrische Last ± 47,5 kN

Proben nach den Tests:



Abbildung 66. Proben nach dem Testen - Brechen mit einer Last von ± 47,5 kN.


Das Ergebnis des Tests ist hauptsächlich die zyklische Dehnungskurve der Sanduhrprobe. Unten (Abbildung 67) sind sie in Form einer Verformungs-Last-Kurve dargestellt.



Abbildung 67. Zyklische Dehnungskurve für eine Last von \pm 47,5 kN (begrenzt auf den ausgewählten Zyklus - rechts).

6.2.3. Lastkraft mit Kraft: 3Hz ±50kN - 2 Proben Anzahl Belastungszyklen zum Versagen: 7 270/8 617

Repräsentativer Verlauf der Belastung:



Abbildung 68. Änderung der zyklischen Last mit konstanter Amplitude für zyklische, symmetrische Last ± 50 kN.



Proben nach den Tests:



Abbildung 69. Proben nach dem Testen - Brechen mit einer Last von ± 50 kN.

Das Ergebnis des Tests ist hauptsächlich die zyklische Dehnungskurve der Sanduhrprobe. Unten (Abbildung 70) sind sie in Form einer Verformungs-Last-Kurve dargestellt.



Abbildung 70. Zyklische Dehnungskurve für eine Last von \pm 50 kN (begrenzt auf den ausgewählten Zyklus - rechts).



6.2.4. Lastkraft mit Kraft: 3Hz ±55kN - 1 Probe Anzahl Belastungszyklen zum Versagen: 1 106



Repräsentativer Verlauf der Belastung:

Abbildung 71. Änderung der zyklischen Last mit konstanter Amplitude für zyklische, symmetrische Last ± 55 kN.

Proben nach den Tests:



Abbildung 72. Probe nach dem Testen - Brechen mit einer Last von ± 55 kN.

Das Ergebnis des Tests ist hauptsächlich die zyklische Dehnungskurve der Sanduhrprobe. Unten (Abbildung 73) sind sie in Form einer Positions-Last-Kurve dargestellt.



Abbildung 73. Zyklische Dehnungskurve für eine Last von \pm 55 kN (begrenzt auf den ausgewählten Zyklus - rechts).



6.2.5. Lastkraft mit Kraft: 3Hz ±60kN - 1 Probe Anzahl Belastungszyklen zum Versagen: 239

Repräsentativer Verlauf der Belastung:



Abbildung 74. Änderung der zyklischen Last mit konstanter Amplitude für zyklische, symmetrische Last ± 60 kN. Die Dauerfestigkeit unter dieser Last war so gering, dass nur der letzte Zyklus des Laufs verfolgt werden konnte (Stichprobenfehler).

Probe nach den Tests:



Abbildung 75. Probe nach dem Testen - Brechen unter einer Last von \pm 60 kN. Ein interessantes Problem bei diesem Test ist die Änderung der Farbe der Probe im Bruchbereich - dies weist auf einen starken Temperaturanstieg im Material hin.

Das Ergebnis des Tests ist hauptsächlich die zyklische Dehnungskurve der Sanduhrprobe. Unten (Abbildung 76) sind sie in Form einer Positions-Last-Kurve dargestellt.



Abbildung 76. Zyklische Dehnungskurve für eine Last von ± 60 kN (letzter Zyklus).



6.2.6.Zusammenfassung

Die erste Stufe der experimentellen Tests bestand darin, die Dauerfestigkeit des Hammermaterials zu bestimmen. Sanduhrproben wurden einer zyklischen Belastung mit konstanter Amplitude ausgesetzt, die bilateral (symmetrisch) war. Die Tests wurden für die folgenden Lastwerte durchgeführt: \pm 60 kN, \pm 55 kN, \pm 50 kN, \pm 47,5 kN und \pm 45 kN. Eine solche Auswahl von Werten für unser Material ermöglicht es uns, unsere Ergebnisse in Bezug auf die Festigkeit bei niedrigen Zyklen zu klassifizieren, die in der folgenden Abbildung 77 grafisch dargestellt ist.



Abbildung 77. Vereinfachtes Wöhler-Ermüdungsdiagramm und vollständiges Wöhler-Diagramm im Koordinatensystem Nennspannung - Anzahl der Zyklen bis zum Versage**n**

Die Proben nach dem Test mit sichtbarem Ermüdungsabfall sind in der folgenden Abbildung 78 dargestellt:



Abbildung 78. Geometrie der Probekörper von der linken Seite ausgehend: \pm 45 kN, \pm 47,5 kN, \pm 50 kN, \pm 55 kN, \pm 60 kN und einer Probe nach einachsiger Zugfestigkeit.



Dann wurden die	Ergebnisse	zusammengefasst	(Tabelle [·]	1 unten).
-----------------	------------	-----------------	-----------------------	-----------

Load range	No	Number of samples	Fatigue cycles	Average value	Comments
3Hz/±60kN	F6	1	239	239	-
3Hz/±55kN	F5	1	1 106	1 106	-
3Hz/±50kN	F7	1	8 617	7042.5	-
	F10	2	7 270	7943.5	-
	F8	3	6 520	-	Sample before grinding
2H-/+47 5KN	F1	1	16 896	10010	-
3HZ/±47.3KN	F2	2	22 924	19910	-
211-/.45LN	F3	1	36 901	20700	-
3HZ/±45KN	F4	2	42 697	39799	-
Uniaxial tensile	F9	1	-	-	-

Tabelle 1. Zusammenfassung der Ergebnisse für Sanduhrproben.

Daten aus der Tabelle in Form eines Diagramms Anzahl der Zyklen [N] - Spannungen [σ] sind wie folgt (Abbildung 79):



Abbildung 79. Anzahl der Zyklen zu Versagens-Spannungs-Plots (Wöhler), die auf der Grundlage der Ergebnisse experimenteller Tests erstellt wurden.



6.3. Aufpralltests

Aufpralltests, die darin bestehen, wiederholt einen Stahlindenter an derselben Stelle auf der Oberfläche der Prüfplatte zu treffen. Die Testplatten sind in der folgenden Abbildung 80 dargestellt.



Abbildung 80. Materialproben für Aufpralltests

Während der Vorbereitung dieser Studien basierte die verfügbare Literatur auf dem Thema. Das Schema des Prüfstands war wie in der folgenden Abbildung 81 gezeigt.



Abbildung 81. Skizze des Prüfstands für Niederschlagskollisionen mit Blick auf das Messfeld (im vorliegenden Fall betrug die gemessene Aufprallenergie 22,97 J.

Die Maschine wurde so vorbereitet, dass die Aufprallkraft reibungslos geändert und die Parameter (Abmessungen) des Schlägers / Eindringkörpers geändert werden konnten. Die Analyse wurde durchgeführt, um den Einfluss der Aufprallenergie und der Abmessungen des Eindringkörpers, in diesem Fall einer Lagerkugel, auf die endgültige Verformung der Messplatte zu überprüfen.



Wir beginnen unsere Überlegungen mit der Untersuchung der Aufprallenergie für eine Dimension des Eindringkörpers, bei der es sich um eine Lagerkugel mit einem Durchmesser von 5,3 mm handelt. Die Tests wurden für eine unterschiedliche Anzahl von Wiederholungen des Aufpralls durchgeführt: von 1 bis 10. Die Änderung der Ballparameter wurde ebenfalls analysiert (Tabelle 2).

Φ5.3mm/No.	Impact energy [J]	hit repetitions
P2	64.4	1 : 3
P3	22.3	1÷3
P4	22.3	5
P6	22.3	10
P9	7	1
P8	11.6	1÷3
P11	11.6	5
P13	11.6	10
Φ23.8mm/No.		
P10	11.6	1
P14	11.6	5

Tabelle 2. Probenneschriftungen, Belastungsbereich und Anzahl der Wiederholungen

Um die Arbeit zu beschleunigen, wurde eine Probe verwendet, um eine kleine Anzahl von Treffern zu analysieren, wie im Beispiel von Probe P2 gezeigt (Abbildung 82). Dieser Ansatz wurde für die Anzahl der Wiederholungen 1 ÷ 3 verwendet.



Abbildung 82. Schema der Durchführung des Tests für eine kleine Anzahl von Wiederholungen am Beispiel von Probe P2 - immer von der Mitte (1 Treffer), dann von der oberen rechten Ecke (2 Treffer) und im Uhrzeigersinn gestartet. Oft wurde der Versuch für 3 Treffer wiederholt.



Die Testergebnisse sind verformte Platten im Aufprallbereich und zeichnen das Messsignal von der Maschine auf. Eine Liste der ausgewählten Ergebnisse ist in der folgenden Abbildung 83 dargestellt.



Abbildung 83. Liste ausgewählter Proben nach durchgeführten Tests.

Beispielhafte Messungen werden für einen 5,3-mm-Ballschlag mit einer Energie von 11,6 J für die folgenden Proben vorgestellt: P8 (1 × 3 Treffer), P11 (5 Treffer) und P13 (10 Treffer) (Abbildung 84).





Abbildung 84. Aufgezeichneter zeitlicher Kraftverlauf (ohne Skalierung) für die Proben P8, P11 und P13 - Aufprall mit einer 5,3-mm-Kugel mit einer Energie von 11,6 J.

Beispielhafte Messungen werden für einen 5,3-mm-Ballschlag mit einer Energie von 11,6 J für die folgenden Proben vorgestellt: P8 (1 × 3 Treffer), P11 (5 Treffer) und P13 (10 Treffer) (Abbildung 85).





Abbildung 85. Messung des Durchmessers (links) und der Tiefe des Kraters mit der Verformungskarte (rechts) - Messungen sowohl am Rand des Kraters als auch an der Ebene außerhalb des Kraters. Messungen für Probe P8 - Treffer in der oberen Reihe 1, in der unteren Reihe 3 mit einer 5,3-mm-Kugel mit einer Energie von 11,6 J.

Darüber hinaus ist es auch möglich, ein 2D-Profil des Kraters zu erhalten, wie im Beispiel der Messung der Probe P11 gezeigt (Abbildung 86 und 87).





Abbildung 86. Messung des Durchmessers (Foto oben links) und der Kratertiefe mit einer Karte der Verformung (Foto oben rechts) und der Form des Kraters (Foto unten) - Messungen sowohl an der Kraterkante als auch an der Ebene außerhalb des Kraters. Messungen für Probe P11 - 5 Treffer mit einer 5,3 mm Kugel mit einer Energie von 11,6 J.





Abbildung 87. Messung des Durchmessers (links) und der Tiefe des Kraters mit der Verformungskarte (rechts) - Messungen sowohl am Rand des Kraters als auch an der Ebene außerhalb des Kraters. Messungen für die Probe P13 - 10 Treffer mit einer 5,3 mm Kugel mit einer Energie von 11,6 J.

Die Zusammenfassung ist in der folgenden Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3. Kraterdurchmessermessung

hit repetitions	Crater diameter [µm]
1	3354.45
3	3549.80
5	3838.27
10	4050.24

Grafische Interpretation der Daten aus der Tabelle 3 enthält die Abbildung 88.



Abbildung 88. Die Änderung des Kraterdurchmessers in Abhängigkeit von der Anzahl der Treffer und der Trendlinie für diese Werte zeigt deutlich, dass der Trend nicht linear ist - was das Ergebnis der Verstärkung der Materialverformung unter dem Einfluss von Stößen ist



7. Validierung der Materialparameter

Basierend auf den im vorherigen Kapitel beschriebenen Materialdaten wurden die Materialparameter für die Simulationmaterialmodelle ermittelt. Das folgende Kapitel beschreibt den Prozess der Validierung von Materialparametern anhand von Messungen.

7.1. Bereich des elastischen Materialverhaltens

Die grundlegenden Materialdaten für den elastischen und linearen Bereich werden vom Hersteller bereitgestellt. Wie der Name schon sagt, eignen sie sich zur Modellierung der Hammerarbeit im elastischen Bereich:

Materialkennwerte:

Schlaghaube (GS-34CrNiMo6, Rauheit Schlagfläche Ra = 25):

Werkstückkennwerte in 100mm Tiefe/	' Material data	in depth of 100 mm:
GS34CrNiMo6 vergütet auf/ annealed	to:	·
Streckgrenze/ Yield strenght	R _{p0.2}	min. 600 N/mm²
Zugfestigkeit/ Tensile strength	Rm	750-900 N/mm²
Bruchdehnung/ Elongation break	A5 (Lo=5do)	min. 16%
Kerbschlagarbeit/ Notched bar work	Av (ISOV)	min. 35 J

Schlagplatte (GS-34CrNiMo6, Rauheit Schlagfläche Ra = 12.5):

Werkstückkennwerte in 100mm Tiefe /Material data in depth of 100mm GS-34CrNiMo6 vergütet auf /annealed to Streckgrenze $R_{p0,2}$ /Yield strength min. 600 N/mm² Zugfestigkeit R_m /U.T.S. 750-900 N/mm² Bruchdehnung A_5 (l_0 =5d₀) /Elongation at break min. 16% Kerbschlagarbeit A_v /Notch bar work (ISO-V) min. 50 J Übergangstemperatur /Transition temperature (27J ISO-V) -20°C

7.2. Bereich des plastischen Materialverhaltens

Die Daten für das plastische Verhalten des Materials wurden anhand des einachsigen Spannungstests validiert. Probe für diese Tests - es ist eine Sanduhrprobe aus



Ermüdungstests. Das numerische Modell mit Randbedingungen (BS) ist unten dargestellt.

Die Materialeigenschaften des Kunststoffbereichs können aus einem einfachen Zugversuch ermittelt werden. In unserer Forschung beziehen wir uns auf einen einzelnen Sanduhr-Test, der für Ermüdungstests vorgesehen ist, und nicht auf einen einachsigen Zugtest (Abbildung 89 und 90).



Abbildung 89. Technische Zeichnung und das FEM-Modell mit BCs



Abbildung 90. Spezifikation des FEM-Models



Das Ergebnis dieses Tests ist eine Auftragung der Kraft gegen die Verschiebung, die an der Fixierungsstelle der Probe gemessen wurde - eine analoge Messung zu den experimentellen Tests für den Zugtest (Abbildung 91).



Abbildung 91. Kraft gegen Verschiebung für Test und FEM - konzentriert sich auf das plastische Verhalten.





Abbildung 92. Die Form der Probe nach dem Test. Das FEM-Modell hat kein Fehlerkriterium - keinen Probenbruch.

Dies ist jedoch nicht die empfohlene Form der Probe für einachsige Zugversuche (Abbildung 92). Die geeignete Form der Probe mit den Abmessungen ist unten dargestellt (Abbildung 93).



Abbildung 93. Empfohlene Form / Abmessungen des Zugprüfmusters.

Der an einer Sanduhrprobe durchgeführte Zugversuch (für Ermüdungstests) zielte nur darauf ab, die ungefähre Festigkeit des Materials zu bestimmen - und damit den Bereich der Ermüdungsbelastungen genauer auszuwählen.



Aufgrund des Fehlens von Materialdaten für den Kunststoffbereich (nur ungefähre Parameter verfügbar: Streckgrenze und Zugfestigkeit) wurde jedoch zu Demonstrationszwecken beschlossen, diesen Einzeltest für die Ermüdungsprobe zu verwenden.

7.3. Lebensdauer

Ermüdungstests werden verwendet, um die Parameter für Materialschäden und versagen auszuwählen. Diese Tests sind jedoch zeitaufwändig, da sie eine Analyse der Ermüdungsschäden an den Proben erfordern. Die Analyse dauert mehrere Tage für eine Anzahl von Zyklen (Abbildung unten) von mehr als 1000 für eine Probe. Das FEM-Modell der Stichprobe ist das gleiche wie im vorherigen Abschnitt (Abbildung 76).



Abbildung 94. Zyklischer Lastzustand.

Die Materialdaten werden nachfolgend beschrieben.

ر Material <u>properties</u>: –

Plasticit	ty_With_Damage	(081)					
MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	EPPF	TDEL
6	7.860e-09	1.950e+05	0.2660000	600.00000	1060.0000	0.1500000	1.000e-12
C	P	LCSS •	LCSR •	EPPFR	<u>VP</u>	LCDM •	NUMINT
0.0	0.0	8	0	0.4000000	0.0	3	0

Cowper-Symonds-Parameter in der Viskoplastizitätsformulierung für Rateneffekte wurden aus dem Materialmodell entfernt, um einen Einfluss dieser Parameter auf die



Ergebnisse zu vermeiden (hauptsächlich aufgrund unterschiedlicher Belastungshäufigkeit).

Dieses Materialmodell verwendet zwei Kurven: effektive Spannung vs. effektive plastische Dehnung (EPS) und Beschädigung (DAM (ES)) vs. EPS (Abbildung 95 und 96).



Abbildung 95. Im FE-Modell verwendete Kurven.



Abbildung 96. Die nicht-lineare Versagenskurve.

Die Implementierung der nichtlinearen Schadenskurve führt zu der Möglichkeit, einen plötzlichen Verlust der Materialkontinuität auszulassen, und somit können die Ergebnisse verbessert werden. Daher wurde bei der Modellierung eine effektive plastische Versagensdehnung (EPFS) als Erosionskriterium angewendet, wobei jedoch eine Erweichung unter Verwendung einer nichtlinearen Schadenskurve definiert wurde. Der erste Punkt der Kurve stellt die Versagensdehnung (EFPS) dar und der Schaden ist gleich 0. Nach dem Überschreiten des EPFS beginnt das



Erweichen. Daher müssen nachfolgende Punkte mit größeren Werten von EPS und DAM definiert werden, bis die Bruchdehnung erreicht ist (DAM = 1).

EPPF - Plastische Verformung, fs, bei der die Materialerweichung beginnt (logritmisch).

EPPFR - Plastische Dehnung, bei der das Material reißt (logrithmisch).

Die Ergebnisse der Ermüdungsprüfungen in grafischer Form unter Berücksichtigung möglicher Abweichungen vom Durchschnittswert sind in der folgenden Abbildung 97 dargestellt.



Abbildung 97. Zusammenfassung der Testergebnisse unter Berücksichtigung möglicher Dispersion (Größe). Für eine so begrenzte Anzahl von Tests können wir einen Unterschied von 10% gegenüber dem Durchschnittswert für einen bestimmten Lastwert annehmen.

Die Schadensparameter des Materials sind entscheidend für die Lebensdauer des Modells und für die Art und Weise, wie die Probe beschädigt wird: die Form der Probe nach dem Brechen (Abbildung 98).





Abbildung 98. Verschiedene Formen der Beschädigung von Sanduhrproben - für verschiedene Parameter der Materialbeschädigung.

Numerische Tests sollten wie Ermüdungstests durchgeführt werden: für dieselben Lastbereiche [Die Tests wurden für die folgenden Lastwerte durchgeführt: \pm 60 kN, \pm 55 kN, \pm 50 kN, \pm 47,5 kN und \pm 45 kN.]. Durch richtig ausgewählte Schadensparameter kann bei einer definierten Belastung die gleiche Lebensdauer erreicht werden wie bei Materialprüfungen.

7.4. Materialabtrag

Der letzte von uns vorgeschlagene Test dient zur Überprüfung des Verschleißprozesses im Material unter dem Einfluss der Stoßbelastung. Der Überprüfungsprozess ist der gleiche wie in den vorherigen Fällen: Wiederholen Sie in FEM die experimentellen Tests des Balls, der auf die Plattenoberfläche trifft (Abbildung 99 und 100).



Abbildung 99. Das numerische Forschungssystem wurde auf einen Ball und eine Platte vereinfacht, aber man sollte daran denken, dem Ball Aufprallenergie zu geben, analog zu der in den Tests verwendeten.





Abbildung 100. Querschnittsansichten der Verschleißschäden in den hochfesten Stählen nach Stößen.

Mit diesem einfachen Test können wir den Aufprallverschleißprozess in einem Material analysieren. Dies hilft uns auch bei der Überprüfung der Materialschäden und der Härtungsparameter.

7.5. Zusammenfassung

Das obige Kapitel beschreibt den Prozess der Validierung von Materialparametern auf der Grundlage spezifischer Materialprüfungen. Die von uns beschriebenen Tests ermöglichen es, die vollständige Grundspezifikation des getesteten Materials zu bestimmen.

Es sollte beachtet werden, dass für eine vollständige Validierung Materialtests in einem breiteren Umfang durchgeführt werden müssen: Es müssen mehr Proben getestet werden.

Der Forschungsumfang umfasst folgende Tests:

- Zugversuch,
- Ermüdungstest,
- Schlagprüfung.

Es sind die grundlegenden Tests, die erforderlich sind, um die Materialdaten zu erhalten, die in FEM-Analysen definiert werden müssen, um das Phänomen des Schlaghammertests korrekt zu beschreiben.



8. Multikritelliere Optimierung

Die in MATLAB vorhandenen Optimierungsroutinen aus der Optimization-Toolbox wurden an Zielfunktionen unterschiedlicher Ordnungen getestet. Dazu wurden lineare und quadratische Antwortflächen verwendet und es wurde eine Antwortfläche verwendet die auf der Basis von Stützstellen aus einem FEM-Ergebnis berechnet wurde. Die Optimization-Toolbox bietet dabei einen wesentlich höheren Funktionsumfang als die in Matlab vorhandenen Standardroutinen und ließ sich daher für den Abgleich der im Projekt verwendeten Optimierungsroutinen verwenden. Auch hier erfolgte eine Optimierung mit einem gradientenbasierten Verfahren an einer Antwortfläche auf Basis von Stützstellen aus einer FEM-Berechnung.

Um die FEM-Modelle des Gesamtsystems um Optimierungsverfahren zu erweitern wurden seitens Novicos ein Verfahren zur Polynominterpolation für relativ einfache Zielfunktionen und das heuristische Verfahren der Partikelschwarmoptimierung ausgewählt und in Matlab implementiert. Beide Verfahren wurden anhand von mathematischen Zielfunktionen getestet. Dazu sind in Abbildung 101 zwei mit der Polynominterpolation erzeugte Antwortflächen abgebildet.



Abbildung101: Mit der Polynominterpolation bestimmte Antwortflächen.

Nach dem finden einer geeigneten Antwortfläche kann in sehr kurzer Zeit das Minimum darauf gefunden werden. Dazu kann die Fläche fein abgetastet werden, dass Minimum analytisch aus den Koeffizienten der resultierenden Polynome bestimmt werden, oder die implementierte Partikelschwarmoptimierung verwendet werden. Die



Partikelschwarmoptimierung läuft aufgrund der sehr kurzen Auswertungszeit der nun analytisch vorhandenen Zielfunktion sehr schnell ins Ziel. Die Zeit für die Antwortflächeninterpolation selber ist im Vergleich z.B. zur heuristischen Verfahren sehr kurz, da nur eine begrenzte, kleine Anzahl an Zielfunktionsauswertungen benötigt wird. Im Falle einer Ebenen zwei dimensionalen Zielfunktion waren dies Beispielsweise drei. Im Kontrast dazu benötigte ein heuristisches Optimierungsverfahren schon für einen einzelnen Iterationsschritt deutlich mehr als drei, meist eher 15 Funktionsauswertungen. Ein Nachteil dieses Verfahrens war jedoch, dass komplexe Antwortflächen mit einer hohen Anzahl an lokalen Minima sich nicht ohne weiteres abbilden lassen. Angewendet werden kann die Antwortflächeninterpolation jedoch auch als ein schnelles Verfahren um eine grobe Abschätzung der Komplexität der Zielfunktion zu erhalten. Dazu lässt sich das Residuum aus interpolierten Funktionswerten und den berechneten tatsächlichen Werten der Zielfunktion nutzen.

8.1 Partikelschwarmoptimierung

Für aufwendigere Zielfunktionen wurde ein Algorithmus zum Durchführen einer Partikelschwarmoptimierung implementiert. Der Algorithmus basierte auf dem Aktualisieren einer Verteilung an Partikeln. Dazu wurde für jedes Partikel eine sich aus mehreren Komponenten zusammensetzende Geschwindigkeit berechnet. Dies ist in Abbildung 102 dargestellt. Einfluss hatten die global beste Position des gesamten Partikelschwarms im gesamten Verlauf der Optimierung, die beste Position des einzelnen Partikels selber, eine Zufallskomponente, die beste Position der benachbarten Partikel, sowie eine Trägheitskomponente, die mit steigender Anzahl an Iterationsschritten zunahm. Alle dieser Größen liessen sich für die Durchführung einer Optimierung frei Gewichten, was einen deutlichen Einfluss auf die Geschwindigkeit der Optimierung und die Genauigkeit des Ergebnisses hatte.





Abbildung 102: Geschwindigkeitskomponenten eines Partikels in der Partikelschwarmoptimierung

Neben der Grundform der Partikelschwarmoptimierung wurde zusätzlich ein Informationsaustausch von benachbarten Partikeln berücksichtigt. Der Algorithmus wurde zudem hinsichtlich geeigneter Parameterkombinationen an einer Reihe mathematischer Testfunktionen untersucht. Darunter fielen lineare, quadratische und kubische Zielfunktionen. Aber auch hoch komplexe Zielfunktionen wie die in Abbildung 102 dargestellte Rosenbrockfunktion oder die 5D Rastrigin-Funktion, von der der Verlauf in zwei Dimensionen in Abbildung 104 dargestellt ist, wurden für die Bewertung des Verfahren ausgewählt. Auch im Falle der 5D-Rastrigin Zielfunktion konnte das Minimum mit der Partikelschwarmoptimierung gefunden werden. Dabei war jedoch eine hohe Anzahl von etwa 500 Funktionsauswertungen nötig.

Ein Vorteil der Partikelschwarmoptimierung war damit die Anwendbarkeit auf beliebige Zielfunktionen, wobei auch diskrete Variablen in die Optimierung mit einbezogen werden konnten. Zudem konnte auch ein globales Minimum mit dieser Methode gefunden werden ohne, dass sich ein Startpunkt in der Nähe des globalen Optimums befinden musste. Ein Nachteil bestand, wie bereits erwähnt, in diesem Fall in einer hohen Anzahl an Funktionsauswertungen.





Abbildung 103: Minimumsuche auf der Rosenbrockfunktion, Partikelverteilung nach 10 (links) und 50 (rechts) Iterationsschritten.



Abbildung 104: 2D Darstellung der 5D Rastrigin-Funktion.

Es wurden zudem Variationen der Einflussparameter der Partikelschwarmoptimierung durchgeführt. Die Iterationsgeschwindigkeit und Lösungsgenauigkeit waren dabei stark abhängig von der Wahl der Gewichtung der einzelnen 3 Einflüsse auf die Bewegung eines Partikels in Zusammenhang mit dem zu optimierenden Zielfunktion. Ein Beispiel zur Parametervariation ist in Abbildung 105 zu sehen. Dargestellt ist das Residuum in Abhängigkeit der Anzahl der Iterationsschritte. Hier wurde die Gewichtung der Geschwindigkeit der einzelnen Partikel hin zum global besten Partikel variiert. Als Zielfunktion diente die Rosenbrockfunktion. Dabei war zu erkennen, dass sich ab einem bestimmten Anteil zur Gesamtgeschwindigkeit die Konvergenzgeschwindigkeit erhöht und dann in bei weiterer Erhöhung des Anteils in etwa auf dem gleichen Niveau bleibt. Bei noch stärkerer Erhöhung nahm die



Konvergenzgeschwindigkeit wieder ab. Dies zeigte, dass es optimale Parametersätze für die Optimierung gibt. Diese optimalen Parametersätze waren jedoch immer von den Eigenschaften der Zielfunktion abhängig. Ein mögliches geeignetes Vorgehen war somit die Antwortflächeninterpolation zur Abschätzung der Komplexität der Zielfunktion zu verwenden und anschließend die Partikelschwarmoptimierung mit geeigneten Parametern für die abschließende Optimierung zu verwenden.



Abbildung 105: Konvergenzverhalten der PSO in Abhängigkeit der Partikelgeschwindigkeit hin zum global besten Partikel (Suche des Minimums auf der Rosenbrockfunktion)

Die Schnittstelle zu den Optimierungsroutinen wurde so aufgebaut, dass eine beliebige Zielfunktion mit einer beliebigen Anzahl an Parametern verwendet werden kann.



9. Zusammenfassung

Im Rahmen der Projektarbeit wurde die Anwendbarkeit der numerischen Verfahren für die effiziente Berechnung der Schläge eines Rammhammers beim Aufstellen von Gründungsstrukturen der Offshore-Konstruktionen sichergestellt.

Angesichts der großen Energien und der hohen Vielzahl von Schlägen, die für den modellierten Vorgang charakteristisch sind, war die behandelte Simulationsaufgabe sehr anspruchsvoll. Hinzu kammen die Arbeiten an der Entwicklung, Überprüfung und Implementierung von Materialmodellen, die notwednig waren, um die Verformungen und den Materialabtrag an den einzelnen Elementen des betrachteten Gesamtsystems numerisch abzubilden. Der Modellaufbau erfolgte stuffenweise. Die einzelnen Aufgaben der jeweiligen Modellaufbaustufen betrafen zuerst die physikalisch richtige Abbildung des aus mehreren Schlägen bestehenden Vorgangs und dann abwechselnd entweder die Sicherstellung der kurzen Rechenzeiten oder die Erweiterung der verwendeten Materiallmodelle. Die Modellentwicklung erfolgte von Stufe zur Stufe nicht linear. An vielen Stellen waren Anpassungen erforderlich, sodass Schleifen in den bis dahin getroffenen Modelleinstellungen wegen der vorgenommenen Modellerweiterungen zu berücksichtigen waren. Insgesamt konnte eine recht effiziente Modellierung erarbeitet warden, mit der testweise bis zu 1000 Schläge mit vetretbarem numerischen Aufwand simuliert warden konnten. Die dabei berechnete Veränderung ovn Werkstoffeigenschaften, insbesondere an den Kontaktstellen, als auch Materialabtrag konnten plausibel abgebildet warden.

In den letzten Monaten der projektlaufzeit konnten mit der Unterstützung des Projektpartners MENCK messtechnische Untersuchungen für die im modellierten System verwendete Werkstoffe durchgeführt warden. Die dort ermittelten Parameter konnten an den entsprechenden Stellen der Materialkarten eingegeben werden.

Schließlich efolgten im project Arbeiten an der Auswahl und Implementierung von Routinen der multikritellieren Optimierung, die bei den Simulationen des Rammvorgangs verwendet werden konnten. Ausgewählt und implementiert wurde das Verfahren nach der Partikelschwarm-Methode. Es wurden Testanwendungen



durchgeführt, in denen lokale Anpassungen der geometrischen Details des Gesamtsystems behandelt wurden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass es in dem hier beschriebenem Projekt gelang eine solche numerische Modellierung zu entwickeln, die im industriellen Alltag zur prognosesicheren Vorhersage der aus mehreren Schlägen bestehenden Vorgänge verwendet werden kann. Sie ist numerisch effizient und beinhaltet eine sehr umfangreiche Materialmodellierung zur Abbildung der komlexen Vorgänge in den Einzelelementen des Gesamtsystems benötigt wird. Im Bedarfsfall kann die erarbeitete Modellierung um eine angepasste multikritelliere Optimierung erweitert werden.



10. Literaturverzeichnis

Wilkins et al. (1977): Wilkins ML, Streit RD.: Calculation of elastic plastic flow. Lawrence Livermore Laboratory, University of California, Livermore, CA, UCRL 7322, 1977.

Wilkins et al. (1980): Wilkins ML, Streit RD, Reaugh JE.: Cumulative-strain-damage model of ductile fracture: simulation and prediction of engineering fracture tests, Tech. rep. UCRL-53058, Lawrence Livermore Laboratory, University of California, Livermore, CA 94550, 1980.

Nishijima und Kanazawa (1999): Stepwise S-N curve and fish-eye failure in gigacycle fatigue in *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* (FFEMS), July 1999, Volume22, Issue7, Seiten 601-607, Wiley.



11. Anhang – Erfolgskontrollbericht

11.1. Ergebnisse und Erfahrungen

Im Rahmen der Projektarbeit wurde die Anwendbarkeit der numerischen Verfahren für die effiziente Berechnung der Schläge eines Rammhammers beim Aufstellen von Gründungsstrukturen der Offshore-Konstruktionen sichergestellt.

Angesichts der großen Energien und der hohen Vielzahl von Schlägen, die für den modellierten Vorgang charakteristisch sind, war die behandelte Simulationsaufgabe sehr anspruchsvoll. Hinzu kammen die Arbeiten an der Entwicklung, Überprüfung und Implementierung von Materialmodellen, die notwednig waren, um die Verformungen und den Materialabtrag an den einzelnen Elementen des betrachteten Gesamtsystems numerisch abzubilden. Der Modellaufbau erfolgte stuffenweise. Die einzelnen Aufgaben der jeweiligen Modellaufbaustufen betrafen zuerst die physikalisch richtige Abbildung des aus mehreren Schlägen bestehenden Vorgangs und dann abwechselnd entweder die Sicherstellung der kurzen Rechenzeiten oder die Erweiterung der verwendeten Materiallmodelle. Die Modellentwicklung erfolgte von Stufe zur Stufe nicht linear. An vielen Stellen waren Anpassungen erforderlich, sodass den bis dahin getroffenen Modelleinstellungen Schleifen in wegen der vorgenommenen Modellerweiterungen zu berücksichtigen waren. Insgesamt konnte eine recht effiziente Modellierung erarbeitet warden, mit der testweise bis zu 1000 Schläge mit vetretbarem numerischen Aufwand simuliert warden konnten. Die dabei berechnete Veränderung ovn Werkstoffeigenschaften, insbesondere an den Kontaktstellen, als auch Materialabtrag konnten plausibel abgebildet warden.

In den letzten Monaten der Projektlaufzeit konnten mit der Unterstützung des Projektpartners MENCK messtechnische Untersuchungen für die im modellierten System verwendete Werkstoffe durchgeführt warden. Die dort ermittelten Parameter konnten an den entsprechenden Stellen der Materialkarten eingegeben werden.

Schließlich efolgten im project Arbeiten an der Auswahl und Implementierung von Routinen der multikritellieren Optimierung, die bei den Simulationen des



Rammvorgangs verwendet werden konnten. Ausgewählt und implementiert wurde das Verfahren nach der Partikelschwarm-Methode. Es wurden Testanwendungen durchgeführt, in denen lokale Anpassungen der geometrischen Details des Gesamtsystems behandelt wurden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass es in dem hier beschriebenem Projekt gelang eine solche numerische Modellierung zu entwickeln, die im industriellen Alltag zur prognosesicheren Vorhersage der aus mehreren Schlägen bestehenden Vorgänge verwendet werden kann. Sie ist numerisch effizient und beinhaltet eine sehr umfangreiche Materialmodellierung zur Abbildung der komlexen Vorgänge in den Einzelelementen des Gesamtsystems benötigt wird. Im Bedarfsfall kann die erarbeitete Modellierung um eine angepasste multikritelliere Optimierung erweitert werden.

11.2. Erfindungen / Schutzrechte

Im Rahmen des Projektes haben keine Anmeldungen von Erfindungen, Patenten oder Schutzrechten seitens der Novicos GmbH stattgefunden.

11.3. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Die wirtschaftliche Nutzung der im Rahmen des beantragten Projektes erarbeiteten numerischen Methoden konnte Corona-Bedingt leider direkt nach dem Projektabschluss erfolgen. Insbesondere sollten die Verschleißsimulation im Zusammenhang mit den bisherigen Dienstleistungen von Novicos gezielt eingesetzt werden. Das Ziel dieser internen Verwertung war und bleibt es, Kundenwünsche noch besser zu erfüllen und eine Differenzierung zu potentiellen Wettbewerbern zu stärken. Novicos wird daher zum späteren Zeitpunkt, wahrscheinlich in der zweiten Jahreshälfte 2021, einige Unternehmen, die Produkte und Dienstleistungen für die Verschleißproblematik ansprechen. Es ist mit großer Wahrscheinlichkeit davon auszugehen, dass sie Interesse an der Anwendung des im Rahmen des Projektes entwickelten Tools haben werden. Diese Zuversicht ist darin begründet, dass die



Bewertung des Verschleißverhaltens insbesondere bei impulsartiger Anregung in diesen Unternehmen ein immer wiederkehrendes und immer noch nicht zufriedenstellend gelöstes technisches Problem ist. Mit der Referenz der gelungenen Anwendung der im Projekt entwickelten Simulationstechnik auf einen Impulshammer ist Novicos in der Lage, weitere Dienstleistungsaufträge akquirieren zu können.

Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass neben der numerischen Verschleißvorhersage auch ein auf Anwendungen dieser Art weiterentwickeltes, effizientes Verfahren zur multikritellieren Optimierung erarbeitet wurde. Diese spezielle Optimierung unterstützt im Zusammenhang mit der Verschleißanalyse und eventuell auch bei anderen technischen Aufgaben eine stabile Nachfrage nach den Novicos-Dienstleistungen in dem neuen Geschäftssegment.

Am Anschluss an dieses Projekt wird Novicos sich weiterhin auf die Zusammenarbeit mit den Projektpartner konzentrieren und die Anwendung der Simulationsmodelle nach Bedarf betreuen.

11.4. Wissenschaftliche Erkentnisse

Für weitere Anschlussprojekte im Bereich der Forschung und die wissenschaftliche Verwertung bzw. Weiterentwicklung werden die Erkenntnisse dieses Projektes sowie die Simulationsergebnisse veröffentlicht.

11.5. Kosten und Zeitplanung

Die Gesamtkosten des Projektes wurden seitens der Novicos GmbH eingehalten. Durch Wunsch der Projektpartner wurde das Projekt allerdings kostenneutral verlängert. Die Novicos GmbH hat sich aufgrund des erfolgreichen und produktiven Projektabschlusses dieser Verlängerung angeschlossen.

