

Produkt- beschreibung Version 19

Ingenieurgesellschaft für
technische Software mbH



© **INTES GmbH**, Mai 2022 (Rev. 19.01)

Die Worte in *grüner* Farbe sind im Index am Ende dieses Dokuments berücksichtigt.

Das Finite-Elemente-Modell (nur Volumenelemente, >30M Knoten) eines Motorkühlmoduls für dynamische Antwortberechnungen auf der Frontseite erscheint mit freundlicher Genehmigung der Valeo Thermal Systems, La Verrière, Frankreich.

Abaqus ist ein eingetragenes Warenzeichen der Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA.
 Adams ist ein eingetragenes Warenzeichen der MSC Software Corporation, Santa Ana, USA.
 ADSTEFAN ist ein eingetragenes Warenzeichen der Hitachi Industry Control & Solutions, Ltd., Ibaraki, Japan.
 CATIA ist ein eingetragenes Warenzeichen der DASSAULT SYSTEMS, and in Canada, IBM is the registered user under No. RU 81167.
 COMREL ist ein eingetragenes Warenzeichen der RCP GmbH, München, Deutschland.
 AVL Excite ist ein eingetragenes Warenzeichen der AVL List GmbH, Graz, Österreich.
 HyperMesh, HyperView, H3D and MotionSolve sind eingetragene Warenzeichen der Altair Engineering Inc., Big Beaver, USA.
 I-DEAS ist ein eingetragenes Warenzeichen der SIEMENS PLM Software Inc., Plano, USA.
 MEDINA und CAE-Datenschiene sind eingetragene Warenzeichen der T-Systems ITS GmbH, Stuttgart, Deutschland.
 MATLAB ist ein eingetragenes Warenzeichen der The Mathworks Inc., Natick, MA, USA.
 MpCCI ist ein eingetragenes Warenzeichen der FhG SCAI, St. Augustin, Deutschland.
 Nastran ist ein eingetragenes Warenzeichen der National Aeronautics and Space Administration (NASA).
 NX ist ein eingetragenes Warenzeichen der Siemens PLM Software.
 MSC Patran ist ein eingetragenes Warenzeichen der MSC Software Corporation, Santa Ana, USA.
PERMAS ist ein eingetragenes Warenzeichen der **INTES** Ingenieurgesellschaft für technische Software mbH, Stuttgart, Deutschland.
 Simdrive 3D ist ein eingetragenes Warenzeichen der CONTECS Engineering Services GmbH, Berlin, Germany
 SIMPACK ist ein eingetragenes Warenzeichen der Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA.
 STAR CD ist ein eingetragenes Warenzeichen der Computational Dynamics Ltd., London, England.
 VAO ist ein eingetragenes Warenzeichen der CDH AG, Ingolstadt, Deutschland.
 Virtual.Lab ist ein eingetragenes Warenzeichen der LMS International, Leuven, Belgien.
VisPER ist ein eingetragenes Warenzeichen der **INTES** Ingenieurgesellschaft für technische Software mbH, Stuttgart, Deutschland.
 Die Verwendung weiterer Produktnamen erlaubt nicht den Schluss, dass diese nicht geschützt seien. Allerdings war dieser Schutz bis zur Herausgabe dieser Veröffentlichung nicht bekannt.

Adresse: **INTES GmbH**
Breitwiesenstr. 28
D-70565 Stuttgart

Telefon: **+49 711 784 99 - 0**
 Fax: **+49 711 784 99 - 10**

E-mail: **info@intes.de**
 WWW: **<http://www.intes.de>**

Inhalt

	Seite		
INTES	5		
Firmenprofil	5		
Dienstleistungen	5		
PERMAS	7		
Überblick	7		
Einführung zu PERMAS	7		
Nutzen von PERMAS	8		
Was ist neu in PERMAS Version 19	9		
Was ist neu in VisPER Version 19	13		
Basisfunktionen	15		
Verfügbare VisPER-Module	15		
Verfügbare PERMAS-Module	15		
Leistungsaspekte	16		
Parallelisierung	17		
Einsatzgebiete	18		
Zuverlässigkeit	18		
Qualitätssicherung	18		
Anwendungen	21		
Karosserieberechnung	21		
Motorberechnung	24		
Bauteilverbindungen	27		
Bremsenquietschen	29		
Rotierende Systeme	31		
Berechnung von Werkzeugmaschinen	32		
Aktiv geregelte Systeme	36		
Robustes Optimum	37		
Experimentelle Modal-Analyse	39		
VisPER	41		
Zur Vorgeschichte von VisPER	41		
VisPER – Eine kurze Einführung	41		
VisPER-BAS – Basismodul	42		
VisPER-TOP – Topologie-Optimierung	46		
VisPER-OPT – Entwurfsoptimierung	47		
Design Wizard	49		
VisPER-FS – Fluid-Struktur-Kopplung	49		
VisPER-CA – Kontaktanalyse	52		
Teilstrukturen	53		
Schweißpunktauswertung	54		
VisPER-PCGen – PERMAS Komponenten-Generator	55		
PERMAS Basisfunktionen	57		
Teilstrukturtechnik	57		
Submodell-Technik	57		
Variantenanalyse	58		
Zyklische Symmetrie	59		
Flächen- und Linienbeschreibung	60		
Automatisierte Bauteilkopplung	60		
Automatisierte Schweißpunktmodellierung	61		
Lokale Koordinatensysteme	62		
Kinematische Zwangsbedingungen	62		
		Behandlung von Singularitäten	64
		Elementbibliothek	64
		Standard-Balkenquerschnitte	66
		Entwurfselemente für die Optimierung	66
		SPR Spannungen und Fehlerindikator	66
		Materialeigenschaften	67
		Sets	67
		Mathematische Funktionen	68
		Lasten	68
		Verifikation von Modellen	69
		Schnittstellen	70
		Matrizenmodelle	72
		Kombination von Ergebnissen	73
		Transformation von Ergebnissen	73
		Vergleich von Ergebnissen	73
		XY-Ergebnisdaten	74
		Schnittkräfte	74
		Maßeinheiten	74
		Restart	75
		Offenes Softwaresystem	75
		Gekoppelte Analysen	75
		Kopplung zu CFD	75
		PERMAS Berechnungsmodule	77
		PERMAS-MQA – Modell Qualitätssicherung	77
		PERMAS Paket TM /Thermo-Mechanik	79
		PERMAS-LS – Lineare Statik	79
		PERMAS-CA – Kontaktanalyse	79
		PERMAS-CAX – Erweiterte Kontaktanalyse	83
		PERMAS-CAMG – Kontakt Mehrgitterverfahren	84
		PERMAS-CAU – Update der Kontaktgeometrie	85
		PERMAS-NLS – Nichtlineare Statik	87
		PERMAS-NLSMAT – Weitere Materialgesetze	90
		PERMAS-NLSA – Erweiterte nichtlineare Statik	91
		PERMAS-BA – Lineare Beulanalyse	92
		PERMAS-HT – Wärmeleitung	92
		PERMAS-NLHT – Nichtlineare Wärmeleitung	94
		PERMAS Paket VA /Vibro-Akustik	96
		PERMAS-DEV – Dynamik (Eigenwerte)	96
		PERMAS-DEVX – Erweiterte Eigenwertanalyse	97
		PERMAS-MLDR – Eigenwerte mit MLDR	98
		PERMAS-DRA – Dynamik (Response)	99
		PERMAS-DRX – Erweiterte Dynamik	103
		PERMAS-FS – Fluid-Struktur Akustik	103
		PERMAS-NLD – Nichtlineare Dynamik	105
		PERMAS-HBM – Harmonic Balance Methode	106
		PERMAS Paket DO /Design-Optimierung	108
		PERMAS-OPT – Entwurfsoptimierung	108
		PERMAS-TOPO – Layoutoptimierung	112
		PERMAS-AOS – Weitere Optimierungslöser	116
		PERMAS-RA – Zuverlässigkeitsanalyse	118
		PERMAS Spezialmodule	121

PERMAS-LIFE – Lebensdauerberechnung Basis	
121	
PERMAS-LA – Laminatanalyse	122
PERMAS-WLDS – Schweißpunktmodell	122
PERMAS-GINR – Generalisierter Inertia Relief	123
PERMAS-EMS – Elektro-/Magnetostatik	123
PERMAS-EMD – Elektrodynamik	124
PERMAS-XPU – GPU-Beschleuniger	125
Schnittstellen	127
Überblick	127
PERMAS-MEDI – MEDINA-Door	127
PERMAS-PAT – PATRAN-Door	127
PERMAS-ID – I-DEAS-Door	127
PERMAS-AD – ADAMS-Interface	128
PERMAS-EXCI – EXCITE-Interface	128
PERMAS-SIM – SIMPACK-Interface	128
PERMAS-HMS – MotionSolve-Interface	129
PERMAS-H3D – HYPERVIEW-Interface	129
PERMAS-VAO – VAO-Interface	129
PERMAS-VLAB – Virtual.Lab-Interface	129
PERMAS-ADS – ADSTEFAN-Interface	130
PERMAS-MAT – MATLAB-Interface	130
PERMAS-NAS – NASTRAN-Door	130
PERMAS-ABA – ABAQUS-Door	131
PERMAS-CCL – MpCCI-Kopplung	132
PERMAS-SIM3D – SIMDRIVE 3D-Interface	132
Weitere Schnittstellen	133
PERMAS for Education	135
Installation und mehr	137
Unterstützte Rechnersysteme	137
Lizensierung	137
Wartung und Portierung	137
Benutzerunterstützung	138
Zusätzliche Werkzeuge	138
Dokumentation	139
Schulung	140
Weiterentwicklung	140
Weitere Informationen	140
Index	141

INTES



Abbildung 1: INTES-Hauptsitz in Stuttgart

Firmenprofil

INTES wurde 1984 als FE-Technologie-Unternehmen gegründet. Kompetenz in allen Aspekten der Finite Elemente (FE) -Technologie bietet INTES seinen Kunden nicht nur über das High-End Softwaresystem PERMAS an. Auch in Dienstleistungen und einer bis ins Detail fundierten Beratung steht dem Kunden das gesamte Entwickler-Knowhow von INTES zur Verfügung. Arbeitsschwerpunkte bei INTES sind:

- Entwicklung und Vertrieb von VisPER und PERMAS für FE Pre- und Postprocessing und Berechnung,
- Entwicklung neuer und effizienter numerischer und grafischer Verfahren,
- Entwicklung von Softwarelösungen für neue Hardwarearchitekturen (wie Parallelrechner),
- Kopplungen zwischen PERMAS und VisPER zu anderen Softwaresystemen (wie Pre- und Postprozessoren und MKS-Systeme),
- Anwendungsberatung und Schulung,
- Durchführung von Berechnungsprojekten.

Die internationale Betreuung der PERMAS-Kunden wird in Frankreich durch INTES France und in Japan durch INTES Japan unterstützt. Außerdem haben verschiedene Partner die Benutzerunterstützung und den Vertrieb in anderen Ländern übernommen.

INTES will für seine Kunden ein kompetenter Partner in allen Belangen der Finite-Elemente-Methode sein. Die Zufriedenheit der Kunden mit Software und Service ist dabei oberstes Firmenziel.

„Making Realistic Simulations Practical“

Unterstreicht unseren Fokus auf Technologie und Innovation.

Dienstleistungen

INTES bietet seinen Kunden die folgenden Dienstleistungen an:

- Entwicklungen zu PERMAS and VisPER:
 - Schnittstellen zu anderen Softwarepaketen,
 - Neue Modellierungsprozesse,
 - Neue Funktionsmodule,
 - Neue Elemente,
 - Kundenspezifische Entwicklungen.
- Installation von PERMAS and VisPER auf neuen Hardware-Plattformen, sowie Beratung bezüglich der optimalen Hardwarekonfiguration,
- Software-Wartung,
- Schulungen zur FEM,
- FEM-Forschung und Entwicklung,
- Konfiguration und Installation nützlicher Zusatzsoftware,
- Engineering:
 - Modellierung mit VisPER, ANSA, MEDINA,
 - ...
 - Berechnung mit PERMAS,
- Einführung der FEM-Analyse im Unternehmen, laufende Beratung (Hotline) und projektbezogene Unterstützung.



Abbildung 2: Abriss der PERMAS-Geschichte

PERMAS

Überblick

Diese Produktbeschreibung dient der Vermittlung aller wesentlichen Fakten zu PERMAS und seiner Anwendung. Dazu gliedert sie sich in die folgenden sieben Teile:

- Die nachfolgende **Einführung** gibt einige Gründe für die Anwendung der FEM und ihren Nutzen durch den Einsatz von PERMAS. Der besondere **Nutzen**, der mit PERMAS verbunden ist, wird auf den Seiten 8 bis 18 dargestellt.
- Modulübergreifende **Anwendungen** sind auf den Seiten 21 bis 39 zusammengestellt.
- Die Möglichkeiten von **VisPER** sind auf den Seiten 41 bis 54 erläutert.
- Die keinem einzelnen Modul zugeordneten **Basisfunktionen** von PERMAS werden auf den Seiten 57 bis 75 vorgestellt.
- Die verfügbaren **Berechnungsmodule** werden auf den Seiten 77 bis 124 näher beschrieben.
- Die **Schnittstellen** sind auf den Seiten 127 bis 132 zusammengestellt.
- Weitere Informationen zur **Installation und anderen Aspekten** von PERMAS sind auf den Seiten 137 bis 140 dargestellt.

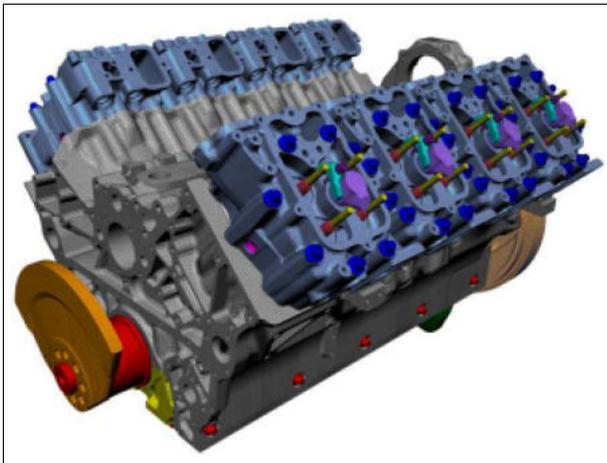


Abbildung 3: V8-Motors mit freudlicher Genehmigung der FPT Motorenforschung AG in Arbon, Schweiz.

Einführung zu PERMAS

PERMAS ist ein allgemein einsetzbares Softwaresystem für die Lösung komplexer Berechnungsaufgaben mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) und für die Optimierung der so berechneten Strukturen und Modelle. Es wurde von INTES entwickelt und steht Ingenieuren weltweit als Berechnungswerkzeug zur Verfügung.

PERMAS ermöglicht die Berechnung und Simulation technischer Vorgänge in vielen Anwendungsbereichen, wie: Steifigkeitsuntersuchung, Festigkeitsberechnung, Ermittlung von Eigenschwingungen, Simulation des dynamischen Verhaltens im Zeit- bzw. Frequenzbereich, Ermittlung von Temperatur-, Akustik-, und elektromagnetischen Feldern, Einsatz moderner Materialien wie faserverstärkter Verbundwerkstoffe.

PERMAS kann durch diese Analysen u.a. folgende Struktureigenschaften ermitteln: Verformungsverhalten, Spannungsverteilung, Materialbeanspruchung, Eigenschwingungsformen, Energieverteilung, Schallabstrahlung, Zeitverhalten bei dynamischen Belastungen, Rückkopplung auf angrenzende Bauteile.

Unabhängig von der Branche lassen sich damit schon während des Konstruktions- und Entwicklungsprozesses wertvolle Erkenntnisse gewinnen. Durch den frühzeitigen Einsatz der FEM wird ein hoher **Nutzen** erreicht:

- Sicheres Erfüllen der Kundenanforderungen.
- Reduzierung teurer Prototypen und Testreihen.
- Simulation von Extremsituationen.
- Kürzere Entwurfs- und Entwicklungszeiten.
- Entscheidende Hinweise zur Entwurfsoptimierung:
 - Topologie-Optimierung,
 - Dimensionsoptimierung,
 - Formoptimierung,
 - Parameterstudien durch Sampling.
- Erhöhung der Zuverlässigkeit.
- Ermittlung von Versagensursachen.
- Langfristige Qualitätsverbesserungen.

In einer Zeit, in der die Anforderungen an Entwicklungsdauer und -güte immer höher werden, wird die FE-Analyse immer mehr zu einem unverzichtbaren Werkzeug, das sich in der täglichen Praxis bewähren muss. Dies gilt umso mehr, als die Entwicklung

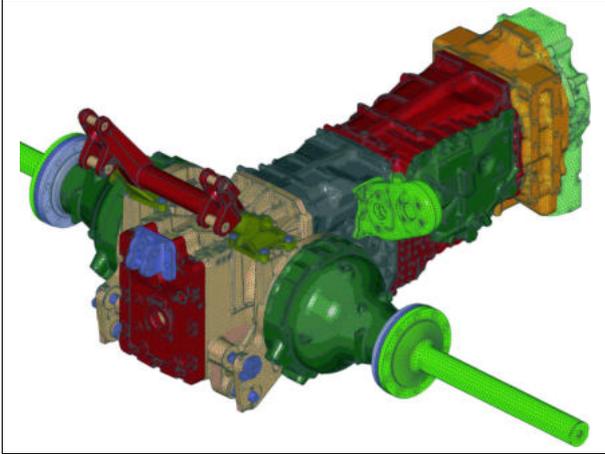


Abbildung 4: Modell eines Traktorgetriebes
ZF Friedrichshafen AG, Friedrichshafen.

komplexer Produkte zunehmend in verteilten Unternehmensstrukturen stattfindet und somit Wechselwirkungen einzelner Bauteile oft nur durch Simulation rechtzeitig zu erkennen sind. Der Auswahl des richtigen Werkzeugs kommt hier zentrale Bedeutung zu.

Nutzen von PERMAS

PERMAS ist ein international anerkanntes und weltweit eingesetztes FEM-Berechnungssystem. Mit INTES steht der Entwickler dieses Systems direkt in Deutschland zur Verfügung. Damit verbunden sind eine **individuelle Beratung und Benutzerunterstützung** sowie das notwendige Schulungsangebot. Dabei kann die Beratung neben programmspezifischen Anwendungsfragen auch prinzipielle Fragestellungen zur physikalischen Modellbildung umfassen.

Der mit PERMAS verbundene Nutzen kann mit den folgenden Punkten beschrieben werden:

- Als allgemeines FEM-Paket verfügt PERMAS über einen **mächtigen Funktionsumfang**, der ein breites Anwendungsspektrum abdeckt, das ausgehend von der Mechanik auch die Wärmeleitung, die Fluid-Struktur Akustik und die Elektrodynamik umfasst.
- Durch integrierte Optimierungsalgorithmen kann PERMAS nicht nur Berechnungen durchführen, sondern auch optimierte Bauteile ermitteln, die verschiedensten Bedingungen

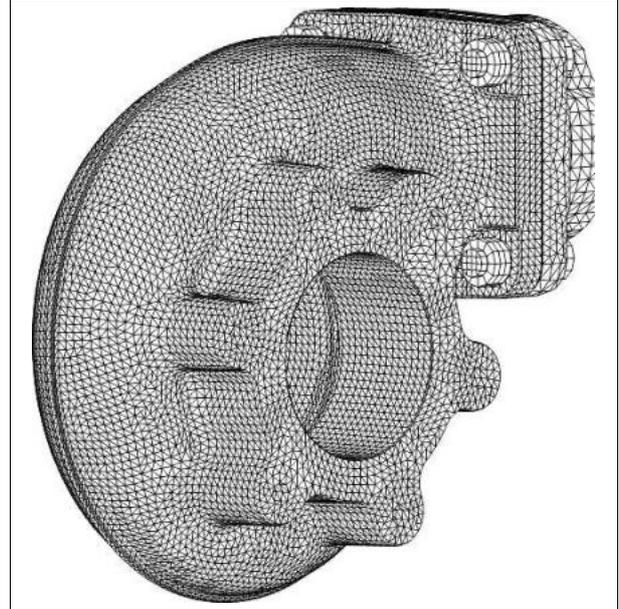


Abbildung 5: Turboladergehäuse
BorgWarner Turbo Systems Engineering GmbH,
Kirchheimbolanden.

genügen. Die Optimierungsmethoden umfassen Topologie-Optimierung, Dimensions- und Form-Optimierung sowie stochastische Berechnungsmethoden für unsichere Modellparameter.

- Die grafische Benutzerschnittstelle VisPER unterstützt den Anwender in der Verifikation seines Modells und bei der Auswertung seiner Berechnungsergebnisse. VisPER stellt außerdem grafische Modellierungshilfen zur Verfügung wie für die Erstellung von Fluid-Netzen und vor allem zum Aufbau von Optimierungsmodellen.
- PERMAS bietet durch effiziente Gleichungslöser und optimierte Speicherstrategien **höchste Rechenleistung** bei niedrigem Ressourcenverbrauch. Dabei findet eine ständige Anpassung an die leistungsfähigsten Rechenanlagen statt.
- Mit PERMAS liegt eine seit Jahren bewährte und ausgereifte Software vor, die in vielen Berechnungsabteilungen im Einsatz ist. Dabei wird vor allem die **Zuverlässigkeit der Software** geschätzt.

Diese Punkte finden sich nachfolgend näher ausgeführt.

PERMAS ist eine moderne Software mit zeitgemäßem Benutzerkomfort, die ständig weiterentwickelt wird. Ziel der PERMAS-Entwicklung ist es, in

engem Kontakt mit den Anwendern zukunftsweisende Funktionalitäten zu implementieren, ständig modernste Algorithmen bereitzustellen und damit eine Software anzubieten, die stets die Forderungen der Zukunft adressiert und umsetzt.

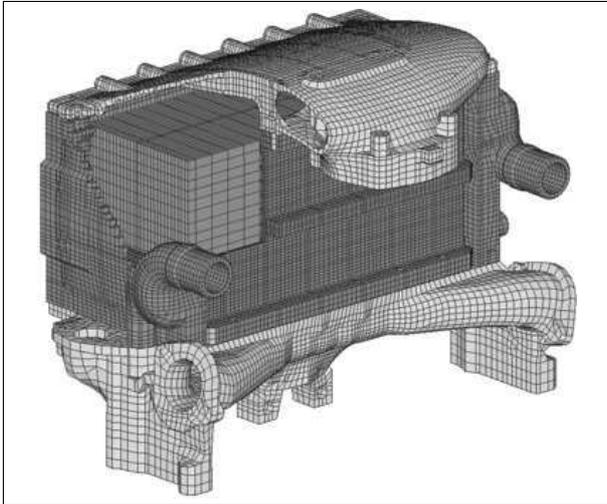


Abbildung 6: Ladeluftkühler
Behr GmbH & Co., Stuttgart.

Was ist neu in PERMAS Version 19

Die Version 19 von PERMAS ist das Ergebnis von etwa 24 Monaten Entwicklungsarbeit seit der Lieferung der Vorgängerversion 18. Um dem regelmäßigen Leser unserer PERMAS-Produktbeschreibung einen gewissen Überblick zu geben, sollen die wichtigsten Änderungen dieser neuen Version im Folgenden aufgelistet werden. Darüber hinaus steht natürlich eine Software Release Note zur Verfügung, welche die Änderungen vollständiger und detaillierter beschreibt.

Um das Pre- und Postprocessing für bestimmte PERMAS-Funktionalitäten entscheidend zu verbessern, wurde in den vergangenen Jahren unter hohem Aufwand mit *VisPER* (das steht für Visual PERMAS) ein entsprechendes Werkzeug entwickelt. Die Neuerungen in VisPER Version 19 werden im nächsten Kapitel vorgestellt (siehe Seite 13).

Neben der kommerziellen Software von PERMAS und VisPER, gibt erneut mit Version 19 auch eine neue PERMAS4EDU (PERMAS for Education) Edition der Software für Lern- und Trainingszwecke. Diese Edition ist weiterhin kostenfrei und erlaubt daher keinen kommerziellen Einsatz. Es gibt dafür eine Reihe von Modellbeschränkungen (siehe Seite 135), aber die meisten Berechnungsfunktionen können verwendet werden.



Die Rechenzeiten konnten mit PERMAS Version 19 weiterhin verkürzt werden:

- Eine neue Vorkonditionierungsoption (STARTVEC) verbessert die Laufzeiten für Eigenwertberechnungen. Die Option kann als Analogon der Kontaktstatusfiles gesehen werden.

Beispiel: Freiformoptimierung (statisch + dynamisch) eines Getriebegehäuses mit 2 Mio Knoten, 1.4 Mio Elemente, 20 Iterationen:

Preconditioning	Eigenwerte [s]	Gesamtzeit [s]
Without	27200	61269
With	9142	40856
Speedup	2.97	1.5

- Für die Frequenzganganalyse wurden Laufzeitverbesserungen über Verbesserungen des MLDR und der response Löser erreicht. Darüber hinaus wurden signifikante Laufzeitverbesserungen für nichtsymmetrische Systeme erreicht.
- Für Kontaktanalysen mit vielen Reibfreiheitsgraden erlaubt die neue CAFRICTION Option weitere Laufzeitreduktion. Die Option erlaubt es, das Kontaktproblem zunächst ohne Reibung zu lösen um damit Kontaktstatusfiles für den Folgelauflauf mit Reibung als Beschleunigung zu nutzen. Darüber hinaus stehen Kontaktsergebnisse zur Verifikation sehr schnell zur Verfügung, z.B. Motorberechnung:

CAFRICTION	Single run	USED
Pre-run (normal contact)	–	0:48
Final run (with friction)	18:32	6:23
Sum [hh:mm]	18:32	7:11

18 cores Intel Xeon E5-2697 @ 2.30GH / 251.82 GiByte

- Eine neue, voll gekoppelte Lösungsmethode (FC) ist für die Frequenzganganalyse von gekoppelten Fluid-Strukturproblemen verfügbar. Gegen die bisherigen Methoden, wie

die reduzierte Mobilitätslösung (MR) kann signifikant Plattenplatz und Zeit eingespart werden. Hier folgen drei Beispiele:

DOFs		MR [s]	NEW FC [s]	Speed -up
PRES	DISP			
6 542 000	1 226 000	14 037	7 900	1.78
20 138 000	1 500	12 662	2 629	4.62
126 000 000	50 500	>34 h	2 754	>46

- Die Liste von unterstützten Nvidia Tesla Grafikkarten in Modul XPU (siehe Seite 125) wurde erweitert. Ampere Graphikkarten können nun verwendet werden.

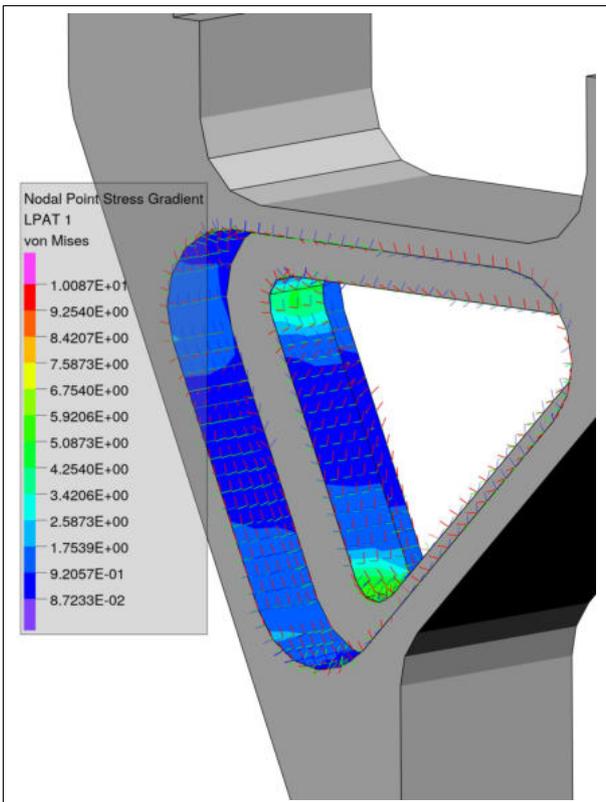


Abbildung 7: Gradienten, Knotenpunktsspannung

Die Liste der größeren Erweiterungen in PERMAS ist im Einzelnen:

- Neue Module:**
 - Das neue Modul **HBM** (Harmonic Balance Method) ermöglicht die Berücksichtigung von Nichtlinearitäten in der Frequenzganganalyse und ermöglicht damit die Analyse neuer Problemklassen mit PERMAS. Für weitere Informationen, siehe ab Seite 106.
 - Ein neues Modul **LIFE** ermöglicht eine voll in PERMAS integrierte Lebensdauerberechnung. Für weitere Informationen, siehe ab Seite 121.
 - Eine Schnittstelle zu SIMDRIVE3D wurde

realisiert, siehe Seite 132.

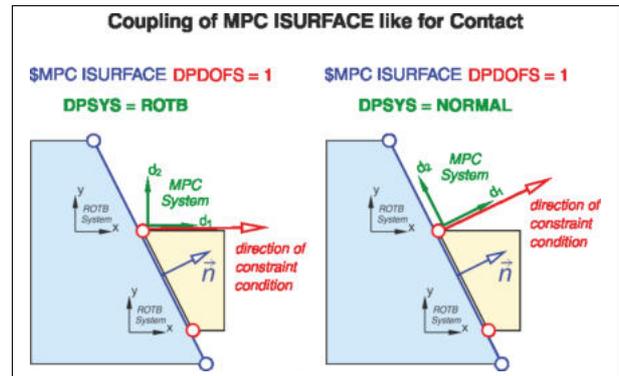


Abbildung 8: Oberflächenkopplung

- Größere Erweiterungen:**
 - Erweiterungen für das Basismodul sind (siehe Modul MQA auf Seite 77):
 - Parametrische geometry in PERMAS als neues Input-Bracket **GEOMETRY**
 - FUNCTION** kann in einer eigenen Klammer, wie z.B. Materialdaten gruppiert werden. **FORMULA** Option zur symbolischen Definition allgemeiner Gleichungen.


```

$FUNCTION FORMULA LABEL=VMS
& DESCRIPTION='V. Mises'
sigma_VM(s_x,s_y,s_z,t_xy,t_yz,t_xz) =
& sqrt(s_x^2 + s_y^2 + s_z^2
& - s_x*s_y - s_y*s_z - s_x*s_z
& + 3*(t_xy^2 + t_yz^2 + t_xz^2))
                            
```
 - INTEGRATE** Option zur automatischen Integration von anderen vordefinierten Funktionen. Z.B. zur direkten Nutzung von Beschleunigungen als last für die Zeitintegration. Funktionen mit Vektorwerten, z.B. zur Geometriebeschreibung.
 - Die Auswahl des lokalen Kopplungskoordinatensystems (**MPC DPSYS** Option) ist jetzt auch für IQUAD/ITRIA/ILIN MPC Typen verfügbar.
 - Die Kopplung von Oberflächen („Tied Contact“) wurde so erweitert, dass die Normalen- und Tangentenrichtungen auf den Oberflächen einfach verwendet werden können. Damit ist ein leichtes Umschalten zwischen der Kopplung von Oberflächen und einer Kontaktdefinition möglich (siehe Abb.8).
 - Option **RELDof** für allgemeine MPCs als Zusatzfreiheitsgrad um Relativbewegungen zu beschreiben.

- * Neues Ergebnis: *MPC REACTION* stellt an guiding und dependent Knoten Reaktionskräfte, Wärmeflüsse, etc. zur Verfügung.
- * Die automatische Kopplung der geschlossenen Kontakte (*CONTLOCK*) jetzt mit Interpolationsregionen anstatt als allgemeine MPC Bedingungen. Damit ist eine Hebelarmkorrektur enthalten.
- Erweiterungen für die Kontaktanalyse sind (siehe Module CA, CAX und CAU ab Seite 79):
 - * Automatische Handhabung von Kontakt-Starrkörperbewegungen durch SET CARBM=nrbm
 - * Individuelle Kontaktgeometrie-Update Option (*GEOUP*) für Surface-Kontaktdefinitionen zur Kontrolle des Kontakt-Geometrieupdates.
 - * Mehrdeutige Reibfreiheitsgrade können über den Switch *CAMULTFRIC* aufgelöst werden.
 - * Die Kontaktdruckberechnung wurde verbessert.
- Die nichtlineare Statik (Modul NLS, Seite 87) wurde wie folgt erweitert:
 - * *aniisotrope Plastizität* als Materialverhalten für *Kurzfaserverwerkstoffe* durch aufsplitten des isotrop plastische und anisotrop elastischen Verhaltens.
 - * *Fitting* von hyperelastischen Materialdaten zur direkten Nutzung von Messdaten.
- Die Eigenwertanalyse (Module DEV, DEVX und MLDR, Seiten 96, 97 und 98) wurde wie folgt erweitert:
 - * Statische Zusatzmoden werden automatisch zu den Unterstrukturmoden für die Craig-Bampton Kondensation zugefügt.
 - * Lokale Unterstruktur RBMs sind jetzt erlaubt. Sie werden als modals DOFs in der Top Component behandelt.
- Das dynamische Antwortverhalten (Modul DRA, Seite 99) und die Fluid-Struktur Akustik (Modul FS, Seite 103) wurde wie folgt erweitert:
 - * Verbesserter Algorithmus zur Behandlung nichtlinearer Kräfte in der Zeitintegration.
 - * Ein neues Hysterese (*HYST3*) Element ist für die direkte Zeitintegration und für die harmonic Balance verfügbar.
- * Die Berechnung dissipierter (Dämpfungs-)Energie steht für lineare Dämpferelemente zur Verfügung.
- * Erweitertes logging der Zeitintegration mit SET THLOG = ON
- * Sweep über Rotationsfrequenzen möglich für rotierende Systeme mit synchronem Rotor.
- Die Fluid-Struktur-Akustik (Modul FS, Seite 103) wurde wie folgt erweitert:
 - * *Assembly Situation* ist für die direkte, gekoppelte Frequenzganganalyse verfügbar. D.h. mehrfache Rechthandseiten pro Anregungsfrequenz.
- Die Random Response Analyse (Modul DRX, Seite 103) wurde wie folgt erweitert:
 - * Stochastische Drucklasten (z.B. durch Turbulenz) können am Oberflächenknoten per Nutzerprogramm beschrieben werden.
- Erweiterungen der Entwurfsoptimierung und Topologie-Optimierung (Module OPT und TOPO, Seiten 108 und 112):
 - * Beulsensitivitätsberechnung berücksichtigt element set filter in \$ELSTATE.
 - * Spannungsskalierung über Füllungsgrade in TOPO.

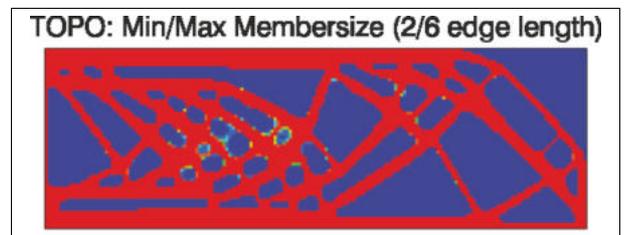


Abbildung 9: Verbesserte Bauteil-Abmessungen zwischen minimaler und maximaler Dicke.

Darüberhinaus wurden zahlreiche kleinere Erweiterungen der meisten Funktionsmodule durchgeführt. Außerdem wurden alle Schnittstellen aktualisiert und auf die neuen Funktionalitäten erweitert. Die wichtigsten Erweiterungen der Schnittstellen sind:

- **ABAQUS (ABA)** (siehe Seite 131):
 - * Knotenbasierte Oberflächen können direkt nach PERMAS übersetzt werden (\$SURFACE NODES).
 - * Die Abaqus Reibkontakte werden jetzt übernommen. Zuvor wurden zwei Definitionen: mit und ohne Reibung erzeugt.
 - * Potentiell geklemmte Kontaktdefinitionen können über einen Schalter vermieden werden (DEFAULT SET ABAQUS CACLAMP = RESOLVE).
 - * Zusätzliche nichtlineare Lastdefinitionen werden aus Abaqus step/load data unterstützt.
 - * *CONTACT INTERFERENCE ist nicht länger auf den ersten Schritt begrenzt.
- **NASTRAN (NAS)** (siehe Seite 130):
 - * Unterstützung von quadratischen Elementen mit fehlenden Mittelknoten (z.B. 'HEXE17' im Bereich quadratisch↔linearer Netzübergänge)
 - * Übernahme von temperaturabhängigen Materialeigenschaften: Case Control TEMPERATURE und Bulk Data TABLEM1, MATT1, TEMPD, TEMP
 - * Übernahme von Geschwindigkeit und Beschleunigung für Frequenzganglasten → Bulk Data RLOAD1, RLOAD2 mit Option VELO und ACCE
- **SIMPACK (SIM)** (siehe Seite 128):
 - * Erweiterte Modalbasis für verbesserten Stress-recovery Prozeß:
 - Zusätzliche Residuenmoden über die Craig-Bampton Kondensation von Trägheitslasten.
 - * Erweiterter Modellexport von PERMAS auf den SimPack .fbi File:
 - Komplette Recovery-Matrix, einschließlich abhängiger Freiheitsgrade von MPCs
 - * Simpack Spannungsdateien für Eigenmoden und Trägheitsmoden:
 - Neuer Schalter PARAM SIMPACK FBITYPE = STRESS im Export Kommandoabschnitt.

- * Unterstützung von Simpack Version 6 beendet

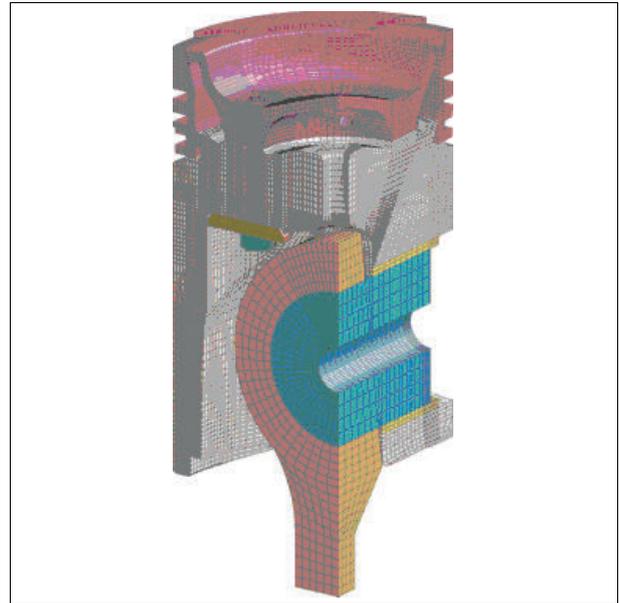


Abbildung 10: Modell eines Schiffsmotorkolbens
Mahle GmbH, Stuttgart.

Bei allen System-Plattformen erfolgte eine Anpassung an das jeweils aktuelle Release des Betriebssystemes (siehe auch Seite 137).

Was ist neu in VisPER Version 19

VisPER (d.h. Visual PERMAS) ist ein graphisches Werkzeug zur Bereitstellung von Analysearbeitsabläufen (siehe Abb. 60 und 51, sowie als PERMAS-angepasstes Tool zum Pre- und Post-processing. VisPER wird zusammen mit PERMAS Version 19 ausgeliefert. Mehr Informationen zu VisPER sind ab Seite 41 zu finden.

- **Geometriehandling:**

- VisPER liest stl und step Formate für die Geometrie. Handhabung und Visualisierung geschieht über einen eigenen Dialog
- Geometriedarstellung/vernetzung, siehe Abbildung 11:
 1. Geometriedarstellung
 2. Erzeugung einer diskreten Geometrie
 3. (Dreiecks-) Oberflächenvernetzung
 4. Tet-Vernetzung
 Netz-Prüfungsfunktionen werden zusätzlich bereitgestellt
- VisPER kann Geometrie im step oder stl format exportieren

Die Liste der größeren Erweiterungen in VisPER ist in vier Abschnitte gegliedert und ist im Einzelnen:

- **Vervollständigung eines Modells:**

- Neuer Fatigue Dialog zur direkten Verifikation/Definition.
- Neuer Elstate Dialog zum direkten PERMAS support.
- Neuer Dialog zur Lastkombination.
- Zahlreiche Erweiterungen, z.B. zur Unterstützung aller neuer PERMAS Funktionen, siehe Abbildung 12.

- **Wizards:**

- Design Wizard, siehe Seite 49
 - * Neue Geometrieseite zur Geometrie-Rekonstruktion.
 - * Frühere Check-Seite ist als Unterseite des Geometry-Tabs verfügbar und die Vernetzung ist generischer.

- **Auswertung der Ergebnisse:**

- Signifikante Verbesserung der Animationsperformance.
- Unterstützung der Fatigue-Ergebnisse.

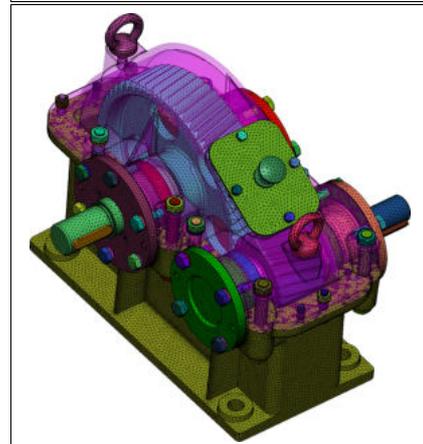
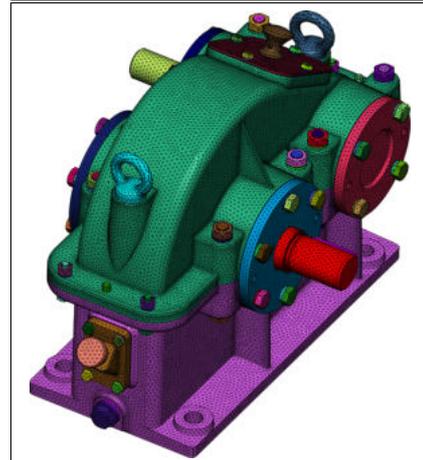
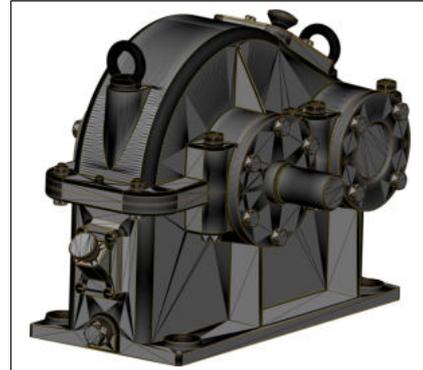
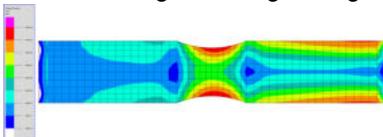


Abbildung 11: Geometrieverarbeitung, Getriebegehäuse

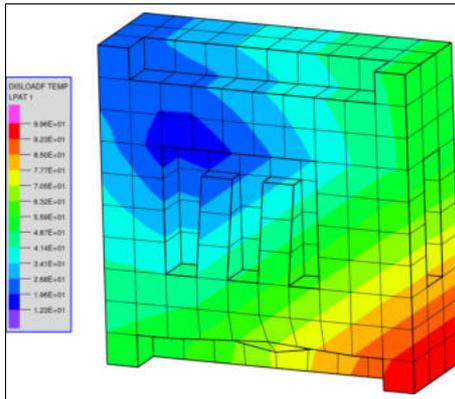


Abbildung 12: Funktionsauswertung

- **VPCGEN**, siehe Seite 55
 - Definition eines kompletten Dynamikmodells (vorgeschriebene Verschiebungen oder Beschleunigungen, Dämpfung, Zeit- und Frequenz-Lasten, Situationsdefinition für Zeit/Frequenz, zusammen mit Optimierungsrestriktionen und Sampling Definitionen.
 - Der Viewer erlaubt nun dynamischen Zoom und die visuelle Partitionierung für VisPER. Farben und Transparenz können benutzerdefiniert sein.
 - PCGen kann Geometry im step format ausgeben.
- **Werkzeuge:**
 - Über PYTHON-Scripting kann eine automatisierte Auswertung erreicht werden einschließlich der Generierung von Bildern und Videos. So können Modellinformationen, Bilder und Videos auch nach MS Word, Excel oder PowerPoint exportiert werden.

Basisfunktionen

Herausragende meist modul-unabhängige Basisfunktionen von PERMAS sind (siehe Seiten 57 bis 75):

- Hierarchische Teilstrukturtechnik mit automatischem Einsetzen von Unterstrukturen (Seite 57)
- Submodell-Technik (Spannungslupe) (Seite 57)
- Variantenanalyse (Seite 58)
- Zyklische Symmetrie (Seite 59)
- Flächen- und Linienbeschreibung (Seite 60)
- Automatisierte Bauteilkopplung (Seite 60)
- Automatisierte Schweißpunktverbindungen (Seite 61)
- Lokale Koordinatensysteme (Seite 62)
- Vielfältige kinematische Zwangsbedingungen (Seite 62)
- Automatische Ermittlung von Singularitäten (Seite 64)
- Gleiche Elemente für verschiedene Analysen (Elementbibliothek, Seite 64)
- Standard-Balkenquerschnitte (Seite 66)
- Entwurfselemente für die Optimierung (Seite 66)
- SPR Spannungen und Fehlerindikator (Seite 66)
- Allgemeine Materialbeschreibung (Seite 67)
- Knoten- und Elementsets (Seite 67)
- Mathematische Funktionen (Seite 68)
- Alle Arten von Lasten (Seite 68)
- Modellverifikation (Seite 69)
- Integrierte Schnittstellen zum Pre- und Postprocessing (Seite 70)
- Ein- und Ausgabe von Datenobjekten und Matrizen (Seite 72)
- Kombinieren, Transformieren und Vergleichen von Ergebnissen (Seite 73)
- Ausgabe von xy-Ergebnisdaten (Seite 74)
- Ermittlung von Schnittkräften (Seite 74)
- Maßeinheiten (Seite 74)
- Restart-Möglichkeit (Seite 75)
- Offene Software durch Fortran- und C-Schnittstellen (Seite 75)
- Direkte Kopplung verschiedener Berechnungsarten (Seite 75)
- Kopplung zu CFD (Seite 75)

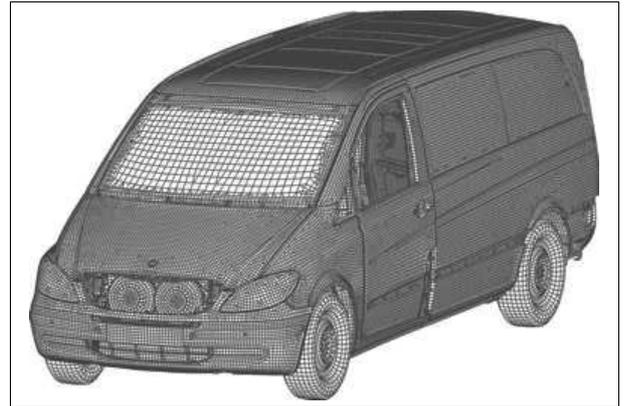


Abbildung 13: Modell eines Transporter-Fahrzeugs mit freundlicher Genehmigung der Daimler AG, Commercial Vehicle Division in Stuttgart.

Verfügbare VisPER-Module

Die im folgenden genannten Module werden im einzelnen auf den Seiten 42 bis 52 beschrieben:

- Basismodul (VBAS)
- Topologie-Optimierung (VTOP)
- Entwurfsoptimierung (VOPT)
- Fluid-Struktur-Kopplung (VFS)
- Kontaktanalyse (VCA)
- PERMAS Komponenten Generator (VPCGEN)

Verfügbare PERMAS-Module

Die im folgenden genannten Module werden im einzelnen auf den Seiten 77 bis 132 beschrieben:

- Modell-Qualitätssicherung (MQA)
- Lineare Statik (LS)
- Kontaktanalyse (CA)
- Erweiterte Kontaktanalyse (CAX)
- Update der Kontaktgeometrie (CAU)
- Kontakt-Multigrid-Löser (CAMG)
- Nichtlineare Statik (NLS)
- Erweiterte nichtlin. Materialgesetze (NLSMAT)
- Erweiterte Nichtlineare Statik (NLSA)
- Stabilitätsanalyse (BA)
- Temperaturfeldanalyse (HT)
- Nichtlineare Temperaturfeldanalyse (NLHT)
- Analyse von Eigenschwingungen (DEV)

- Erweiterte Eigenwertanalyse (DEVX)
- Eigenschwingungen mit MLDR (MLDR)
- Dynamische Simulation (DRA)
- Erweitertes dyn. Antwortverhalten (DRX)
- Verfahren der harmonischen Balance (HBM)
- Fluid-Struktur Akustik (FS)
- Nichtlineare Dynamik (NLD)
- Tragwerksoptimierung (OPT)
- Layoutoptimierung (TOPO)
- Fortgeschrittene Optimierungsmethoden (AOS)
- Zuverlässigkeitsanalyse (RA)
- Laminatanalyse (LA)
- Lebensdaueranalyse (LIFE)
- Verfeinertes Schweißpunktmodell (WLDS)
- Generalisierter Inertia Relief (GINR)
- Elektro-/Magnetostatik (EMS)
- Elektrodynamik (EMD)
- Nutzung einer GPU (XPU)
- Schnittstellen zu Pre-/Post-Prozessoren
 - MEDINA (MEDI)
 - PATRAN (PAT)
 - I-DEAS (ID)
- Schnittstellen zu anderen Berechnungsprogrammen
 - ADAMS (AD)
 - DADS (DADS)
 - SIMDRIVE3D (SIM3D)
 - SIMPACK (SIM)
 - EXCITE (EXCI)
 - MOTIONSOLVE (HMS)
 - HYPERVIEW (H3D)
 - VAO (VAO)
 - Virtual.Lab (VLAB)
 - ADSTEFAN (ADS)
 - MATLAB (MAT)
 - NASTRAN (NAS)
 - ABAQUS (ABA)
 - MpCCI (CCL)

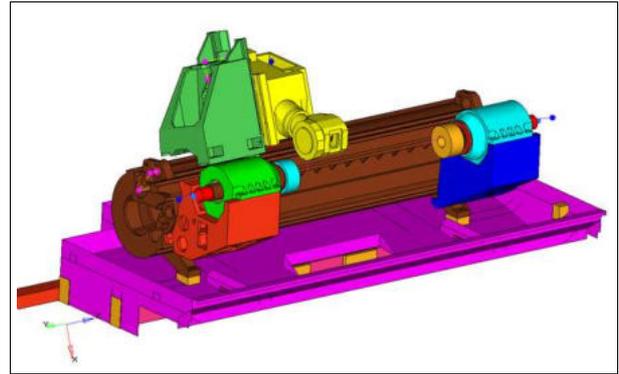


Abbildung 14: Werkzeugmaschine
INDEX-Werke GmbH & Co. KG

gleichzeitig geringem Hauptspeicherbedarf ergibt sich ein sehr gutes Multitasking-Verhalten.

- Der für eine Berechnung zur Verfügung stehende Hauptspeicheranteil lässt sich – ohne Beschränkung der Modellgröße – frei konfigurieren.
- Die Datenbasis kann – ohne sie logisch zu teilen – auf mehrere Platten verteilt werden (z.B. optimale Hardware-Nutzung in einem Workstation-Netz).
- Die Modellgröße ist praktisch unbegrenzt. Die Software kennt keine expliziten Grenzen. Auch Modelle mit vielen Millionen Freiheitsgraden werden regelmäßig berechnet.
- Durch die Nutzung einschlägiger Bibliotheken, wie BLAS für Matrix- und Vektoroperationen, ist PERMAS auch an die Besonderheiten einzelner Maschinen angepasst und stellt damit höchste Effizienz zur Verfügung.
- Eine weitere Steigerung der Rechenleistung wurde durch eine umfassende *Parallelisierung* der Software erreicht.
- Durch die gleichzeitige Nutzung mehrerer Platten (sogenanntes Disk-Striping) kann in PERMAS der I/O-Durchsatz sogar deutlich über den Leistungsdaten der Einzelplatten liegen.
- PERMAS kann mit einer Option für den direkten I/O gestartet werden. Wenn die PERMAS DMS-Dateien auf SSD-Systemen angelegt werden, dann wird der I/O direkt auf diese Systeme ausgeführt, was vor allem bei Berechnungen, die durch den I/O bestimmt werden, zu einer deutlichen Verkürzung der Rechenzeit führen kann (siehe Abb. 118).
- Der Platten-I/O kann gänzlich reduziert werden, wenn entsprechend große Zentralspeicher

Leistungsaspekte

Durch einen ständig weiterentwickelten Gleichungslöser erreicht PERMAS sehr hohe Rechengeschwindigkeiten. Dabei werden direkte und iterative Solver immer weiter optimiert.

- Durch die hohe Maschinenauslastung bei

verwendet werden. Die Größe des Zentralspeichers kann ohne weiteres 256 GB übersteigen.

Parallelisierung

PERMAS steht auch auf Parallelrechnern in vollem Funktionsumfang zur Verfügung. Ein genereller Parallelisierungsansatz ermöglicht die parallele Verarbeitung aller zeitkritischen Operationen, ohne sich auf die Gleichungslösung zu beschränken. Es gibt nur **eine** Programmversion, die sowohl auf sequentiellen als auch auf parallelen Rechnern eingesetzt wird.

PERMAS unterstützt die Parallelisierung auf Shared-Memory-Maschinen. Dabei basiert die Parallelisierung auf der Verwendung von POSIX Threads, d.h. PERMAS wird in mehreren parallelen Prozessen ausgeführt, die alle denselben Zentralspeicherbereich verwenden. Damit ist eine Kommunikation zwischen den Prozessoren nicht erforderlich, wie sie auch der Architektur dieser Rechner entspricht.

Dabei erlaubt PERMAS auf dieser Architektur auch asynchronen I/O, um durch überlappende Behandlung von CPU- und I/O-Zeit weitere Leistungsverbesserungen zu erzielen.

Die Parallelisierung verändert nicht die Reihenfolge der Operationen in PERMAS, d.h. **die Ergebnisse einer sequentiellen und einer parallelen Berechnung desselben Modells sind exakt gleich** (bei natürlich sonst auch gleichen Parametern).

Die Eigenschaft von PERMAS, mit geringem und während des gesamten Rechenlaufes konstantem Zentralspeicher sehr effizient zu arbeiten, gilt auch für die parallele Ausführung. Damit sind nicht nur mehrere simultane sequentielle Läufe möglich, sondern auf einer entsprechenden Maschine auch mehrere simultane parallele Läufe oder jede Mischung von sequentiellen und parallelen Läufen.

Die Parallelisierung basiert auf einem graphentheoretischen Ansatz, der in der Lage ist, selbst sequentiell programmierte Algorithmen automatisch zu parallelisieren. Dadurch bleibt PERMAS allgemein portabel und es wurde das Ziel erreicht, *ein* PERMAS für alle Plattformen zu haben.

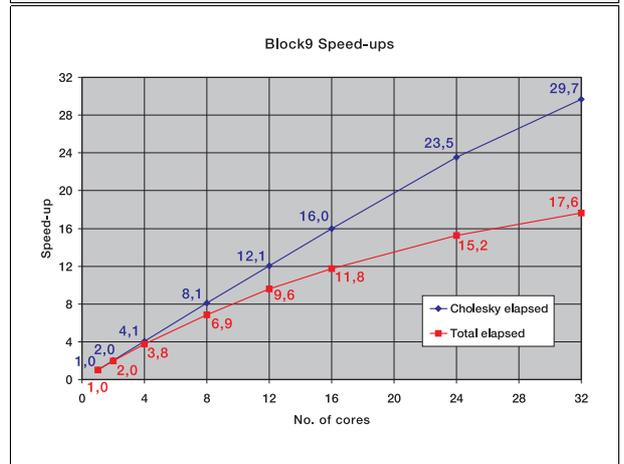
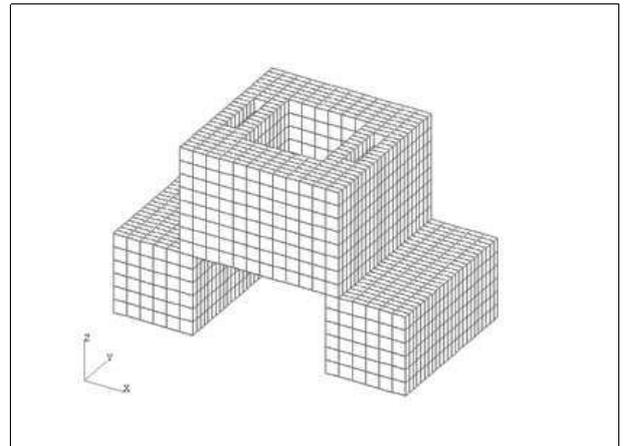


Abbildung 15: Statische Analyse mit 3 Lastfällen
1,5 Mio. Knoten, 176 Tsd. HEXE27, 4,4 Mio. Freiheitsgrade, Rechenzeit auf Intel Boxboro

Somit steht PERMAS auf allen parallelen Plattformen zur Verfügung, für die auch eine sequentielle Version unterstützt wird.

Die Parallelisierung auf mehreren Kernen kann durch die Nutzung einer GPU (Graphical Processing Unit) von Nvidia erweitert werden, wobei eine Tesla K20c oder besser unterstützt wird. Für sehr rechenintensive Lösungsschritte kann die GPU die Laufzeit erheblich reduzieren (siehe auch das Modul XPU auf Seite 125).

Die Durchführung einer parallelen Berechnung mit PERMAS ist sehr einfach. Da keine zusätzlichen Abstuerungsbefehle notwendig sind, unterscheidet sich - abgesehen von der kürzeren Rechenzeit - ein paralleler PERMAS-Lauf nicht von einem sequentiellen. Lediglich die Angabe der Anzahl von parallelen Prozessen bzw. Prozessoren ist beim Start des PERMAS-Laufs notwendig.

Einsatzgebiete

Vor allem in folgenden Branchen wird PERMAS gegenwärtig eingesetzt:

- Automobilindustrie
- Luft- und Raumfahrtindustrie
- Schiffsbau
- Maschinenbau
- Offshore- und Energietechnik
- Anlagen- und Apparatebau

Zuverlässigkeit

FEM-Ergebnisse können heute nicht mehr in jedem Falle durch Versuche überprüft werden. Sie fließen oft direkt in den Entwicklungsprozess ein. Dabei werden die Modelle immer komplexer und die Ergebnisse müssen immer schneller vorliegen. Das bedeutet eine Herausforderung an die Software, potentielle Fehlerquellen möglichst früh zu erkennen und zu beseitigen. Dazu liefern PERMAS und VisPER einen wesentlichen Beitrag:

- **Robustheit der Software:** Durch das moderne Software-Engineering und umfangreiche Tests wird die Fehlerrate im System klein gehalten.
- **Modellverifikation:** Das Grundmodul PERMAS-MQA bietet Werkzeuge zur Qualitätssicherung beim Berechnungsmodell (siehe Seite 77). Neben den automatisch durchgeführten Modellchecks stehen viele Eingabegrößen und Modellparameter auch in einem Exportformat zur Verfügung, um diese in einem Postprozessor sichtbar zu machen und zu überprüfen (siehe Kapitel Verifikation von Modellen auf Seite 69). Außerdem stellt VisPER eine besonders geeignete Umgebung für die Model-Verifikation zur Verfügung, welche die Prüfung einer wachsenden Anzahl von Modellparametern erlaubt (siehe Seite 42).
- **Sichere Anwendung:** Das PERMAS-Grundmodul ermöglicht Modelltests vor dem eigentlichen und eventuell aufwendigen Rechenlauf. Diese liefern zum einen eine Abschätzung der notwendigen Ressourcen, um die Berechnungsdurchführung gerade von großen Modellen zuverlässiger zu planen. Zum anderen können zahlreiche Modellfehler aufgedeckt werden, was direkt die Zuverlässigkeit

der nachfolgenden Berechnung beeinflusst.

- **Richtigkeit der Ergebnisse:** Durch umfangreiche und ständige Verifikation (Tests nach NA-FEMS und SFM) wird die Qualität der Berechnungsergebnisse sichergestellt.

Darüberhinaus sichert die Verwendung erprobter Algorithmen und bewährter Entwicklungswerkzeuge die hohe Qualität der Software.

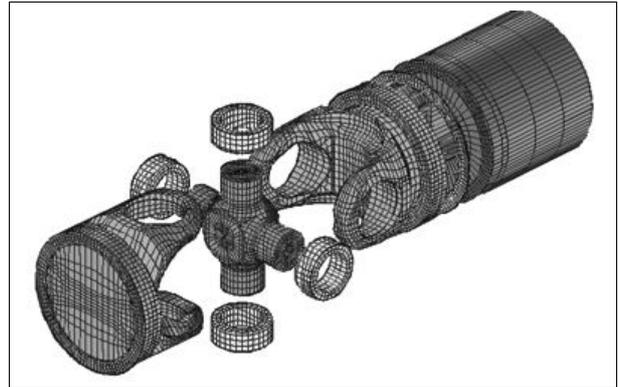


Abbildung 16: Modell einer Gelenkwelle
Voith Turbo GmbH & Co. KG, Heidenheim.

Eine breite Basis von langjährigen PERMAS-Benutzern aus den unterschiedlichsten Branchen trägt wesentlich zur Zuverlässigkeit der Software bei.

Qualitätssicherung

INTES erstellt qualitativ hochwertige Software und erbringt alle zugehörigen Dienstleistungen. Alle Phasen der Software-Erstellung und Wartung werden mit festgelegten Standards und Werkzeugen durchgeführt, um Kunden und Anwendern ein Höchstmaß an Qualität zu liefern.

Einige wichtige Aspekte der Qualitätssicherung sind:

- Ein eigens entwickeltes Software-Verwaltungssystem sorgt für eine abgesicherte Entwicklungsumgebung, welche alle Änderungen und neuen Softwareteile aufnimmt und eindeutig und nachvollziehbar verwaltet und protokolliert.
- Ein Fehlerverwaltungssystem nimmt alle Meldungen zu Softwareproblemen und Entwicklungswünschen sowie andere Anfragen der Anwender zusammen mit den daraufhin erarbei-

teten Lösungen und Antworten auf. Ein regelmäßig herausgegebener 'Technical Newsletter' informiert die Anwender über die gesammelten Anfragen und Antworten.

- Eine ständig wachsende Bibliothek von täglich durchlaufenen Software-Tests gewährleistet die gleichbleibend hohe Qualität der Software. Problemfälle aus dem Fehlerverwaltungssystem führen zu einer Erweiterung der Testbibliothek, um so ein Wiederauftreten gleicher Probleme zu vermeiden.
-

Anwendungen

Karosserieberechnung

Die Finite-Elemente-Analyse von Karosserien umfasst eine Vielfalt an unterschiedlichen Modellierungstiefen von der Rohkarosserie bis zu Modellen mit allen Einbauten (sog. *Trimmed Body*) und akustischen Modellen mit der eingeschlossenen oder sogar der umgebenden Luft. Diese Breite der Modellvarianten spiegelt sich auch in den Berechnungen, welche mit den Modellen durchgeführt werden, die von einfachen Steifigkeitsauslegungen bis zu komplexen Komfortuntersuchungen gehen kann. Deshalb kommen neben linear-statischen Berechnungen auch dynamische Schwingungsberechnungen und gekoppelte Fluid-Struktur-Berechnungen zum Einsatz.

Eine typische Eigenschaft von Karosseriemodellen ist die Verwendung von Schalenelementen. Häufig werden viereckige, lineare Schalenelemente eingesetzt (zusammen mit den passenden Dreiecken). Abhängig von der Netzfeinheit werden dabei bis zu mehreren Millionen Elementen für eine Karosserie verwendet. Des Weiteren besteht eine Karosserie aus vielen Teilen (typischer Weise 50 bis 100), welche über eine geeignete Verbindungstechnik wie Punktschweißen (siehe Seite 61 oder Modul WLDS auf Seite 122), Kleben oder Laserschweißen miteinander verbunden sind. Um alle diese Teile effizient zu vernetzen, werden die Bauteile unabhängig voneinander vernetzt und in PERMAS als *inkompatible Netze* verbunden (siehe Seite 60).

Schweißpunktkräfte können effizient mit VisPER ausgewertet werden (siehe Seite 54), auch für sehr große Modelle.

Statik

Für die Auslegung der statischen Steifigkeit werden linear-statische Berechnungen durchgeführt. Für spezielle Lastfälle wie Abschleppen oder leichte Stöße werden auch statische Berechnungen am freien Körper (*Inertia Relief*, siehe Seite 79) durchgeführt.

Um den Kraftfluss durch Strukturteile zu erhalten, können Schnittkräfte berechnet werden (z.B. beim Schnitt durch den Schweller oder eine Säule, siehe Seite 74). Die Summe der Kräfte und Momente im

Schnitt wird ermittelt und ausgegeben.

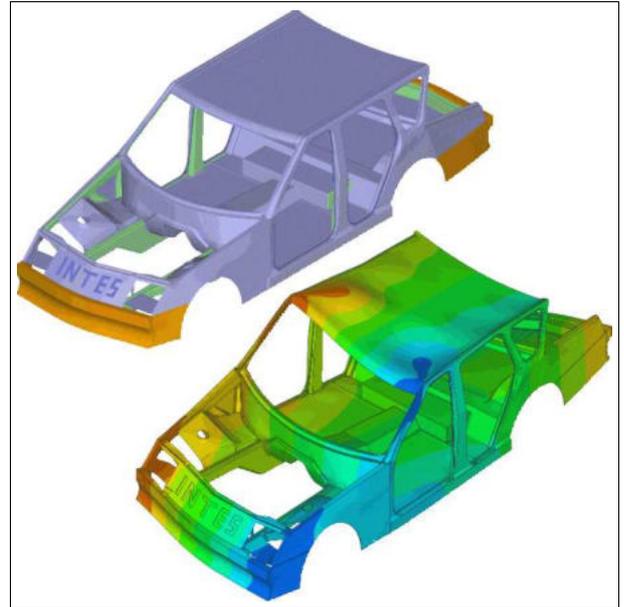


Abbildung 17: Schulungsbeispiel INTEScar unter Torsion

Dynamik

Für dynamische Analysen ist es erforderlich, alle Massen der beteiligten Bauteile zu berücksichtigen. Die Übereinstimmung der Massen zwischen realen Bauteilen und dem Simulationsmodell ist für einen Vergleich der Ergebnisse aus Versuch und Berechnung sehr wichtig. Massen und Trägheitsmomente werden dazu in der Berechnung ermittelt.

Als Basis einer Berechnung der Betriebsschwingungen werden zunächst die Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen ermittelt. Da Fahrzeuge nicht gelagert sind, werden Schwingungsberechnungen am freien Körper durchgeführt. Dabei erfolgt in der Regel eine Prüfung der Starrkörpermoden und -frequenzen, um Modellprobleme auszuschließen. Der Frequenzbereich für die Eigenwertanalyse hängt von der anschließenden Berechnung des dynamischen Antwortverhaltens ab. Dabei wird in der Eigenwertanalyse oftmals eine um den Faktor 2 bis 3 höhere obere Frequenzgrenze verwendet als in der nachfolgenden Antwortberechnung, um eine gute Qualität der Antwort über den gesamten Frequenzbereich zu erreichen.

Flexible Körper werden oft in *MKS-Systemen* (zur *Mehrkörpersimulation*) verwendet. Dazu werden modale Modelle verwendet, die PERMAS über verschiedene Schnittstellen ausgeben kann (siehe Sei-

te 128).

Da man beim modalen Modell alle Eigenwerte oberhalb einer bestimmten Frequenz abschneidet, können die Antwortergebnisse unzuverlässig sein. Dieses Verhalten kann durch die Berücksichtigung statischer Verschiebungsformen (siehe Seite 102) verbessert werden, indem die quasistatischen Anteile der vernachlässigten Eigenformen einbezogen werden. Dazu werden geeignete statische Lastfälle definiert, aus denen automatisch zusätzliche Moden erzeugt werden, welche die modale Basis erweitern.

Häufig werden Änderungen an der Karosserie in einem bestimmten Bereich durchgeführt, z.B. am Vorderwagen. Wenn dabei der Hinterwagen unverändert bleibt, dann kann man diesen einmal mit dynamischer Kondensation reduzieren (siehe Seite 97). Dabei entstehen sog. *Matrizenmodelle* der reduzierten Teile (siehe Seite 72). Diese Matrizenmodelle werden bei jeder neuen Variante z.B. des Vorderwagens mit verwendet. Auf diese Weise kann die Rechenzeit einer Variante deutlich reduziert werden.

Für die nachfolgende Berechnung des dynamischen Antwortverhaltens (siehe Seite 99) kommen Methoden im Frequenzbereich (wie die Frequenzganganalyse) oder im Zeitbereich (als Zeitintegration) in Betracht. Diese Methoden stehen als modale Methoden zur Verfügung (auf der Basis der zuvor berechneten Eigenwerte und Eigenformen) und als direkte Methoden (auf der Basis der vollen Systemmatrizen). Für realistische Modelle benötigen die direkten Verfahren viel mehr Rechenzeit als die modalen Verfahren. Allerdings sind die direkten Verfahren sehr genau und können von Fall zu Fall auch zur Bestätigung der Genauigkeit von modalen Verfahren herangezogen werden.

Die dynamische Belastung (oder Anregung) kann über Kräfte (und Momente) oder vorgeschriebene Verschiebungen (oder Verdrehungen) durch Überlagerung mit einer frequenz- oder zeitabhängigen Funktion erfolgen, welche den Verlauf der Anregung über der Frequenz bzw. Zeit wiedergibt.

- Im Frequenzbereich ist die Diskretisierung der Anregungsfrequenzen für die Genauigkeit der Ergebniskurven wesentlich. Vor allem ist die Diskretisierung um die Spitzen herum wichtig. Dazu kann über eine Anhäufung von Anregungsfrequenzen um die Eigenfrequenzen herum eine bessere Auflösung der Spitzen erreicht werden.

- Wird eine Zeitreihe aus Messungen vorgegeben, dann kann neben der Zeitintegration auch eine alternative Methode verwendet werden, um zu einer periodischen Lösung zu kommen. Eine interne *FFT (Fast Fourier Transformation)* wird verwendet, um die Hauptanregungsfrequenzen zu ermitteln. Für jede dieser Anregungsfrequenzen wird eine Frequenzganganalyse (für jeweils eine Frequenz) durchgeführt. Anschließend werden die harmonischen Ergebnisse aus den verschiedenen Analysen im Zeitbereich überlagert und man erhält eine periodische Antwort (auch *Steady-State Response*). Abb. 100 zeigt ein Beispiel.
- Im Zeitbereich ist die Abtaststrategie für die Antwort auch abhängig von der Anregungsfunktion.

Bei der Berechnung des Antwortverhaltens ist die Beschreibung der Dämpfung sehr wichtig. Es gibt eine ganze Reihe von Möglichkeiten, die Dämpfung zu spezifizieren (siehe Seite 101). Insbesondere benötigt das Modell eines Trimmed Body eine detaillierte und genaue Modellierung aller zusätzlichen Steifigkeiten, Massen und Dämpfer.

Die Ergebnisse einer Frequenzganganalyse sind komplexe Primärergebnisse (Verschiebungen, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen) und Sekundärergebnisse (wie Spannungen, Dehnungen, Schallabstrahlungsleistung) für alle Knoten und jede Anregungsfrequenz. Häufig sind die sog. *Übertragungsfunktionen* wichtiger als die Ermittlung der gesamten Felder einer Ergebnisgröße für alle Knoten an einer Frequenz. Übertragungsfunktionen beschreiben das Verhältnis von Anregung und Antwort zwischen einem Anregungspunkt und jedem beliebigen Zielpunkt (auf der Basis einer Einheitsanregung) über alle Anregungsfrequenzen.

Um den Rechenaufwand für eine Antwortrechnung zu reduzieren, können die gewünschten Ergebnisse vorher festgelegt werden. Bei der Ermittlung der Übertragungsfunktionen kann die Antwort auf ein Knotenset mit den Zielpunkten beschränkt werden.

Fluid-Struktur-Schwingungen

Gekoppelte Simulationen von Struktur und Luft werden als natürliche Erweiterung der reinen Strukturdynamik angesehen. Diese Erweiterung ist erforderlich, da sich der Schall im Fahrzeug aus Luft- und Körperschall zusammensetzt. Der Schall verschafft dem Fahrer den Eindruck von Komfort und akusti-

scher Qualität des Fahrzeugs.

Zunächst wird das Innere eines Fahrzeugs mit sog. Fluid-Elementen modelliert, welche wie klassische Volumenelemente aussehen, aber Druckfreiheitsgrade abbilden. Um die physikalische Kopplung von Struktur und Luft herzustellen, werden Kopplungselemente verwendet, die sowohl Verschiebungs- als auch Druckfreiheitsgrade haben und die erforderlichen Koppelmatrizen bereitstellen.

Um die Modellierung von Fluid- und Kopplungselementen für das Innere eines Fahrzeugs zu erleichtern, stellt VisPER einen Assistenten (Wizard) zur Verfügung, der ausgehend von einem bestehenden Strukturmodell Schritt für Schritt und weitgehend automatisch das Fluid-Netz und die Kopplung zur Struktur erstellt (siehe Seite 49). Typischerweise werden die Kopplungselemente kompatibel mit der Struktur erstellt, während die Fluid-Elemente für die Luft inkompatibel vernetzt werden, da die Luft in der Regel deutlich gröber vernetzt wird als die Struktur. Der Assistent ermittelt die Elementgröße für das Fluid aufgrund des gewünschten Frequenzbereichs.

Die Luft kann zur Dämpfung des gekoppelten Systems in zweifacher Weise beitragen: die volumetrische Dämpfung definiert die Absorption im Fluidvolumen, während die Oberflächenabsorption über die Kopplungselemente spezifiziert wird und die Normalimpedanz der Kopplungsfläche definiert.

Nach der Fertigstellung des Fluid-Struktur-Modells sind die weiteren Berechnungsschritte recht analog zum Vorgehen in der Strukturmechanik wie oben beschrieben (weitere Details auf Seite 103).

- Eine gekoppelte Eigenwertanalyse ermittelt die gekoppelten Eigenfrequenzen und Eigenformen. Die Eigenformen bestehen dabei aus zwei sich ergänzenden Teilen, einer Verschiebungsform für die Struktur und einem Druckfeld für das Fluid.
- Anregungen im Fluid können über ein Drucksignal angegeben werden.
- Auf der Basis der gekoppelten Eigenfrequenzen und Eigenformen ist eine modale Frequenzganganalyse und modale Zeitintegration in derselben Weise möglich wie für die Struktur alleine.

Neben den modalen Verfahren steht auch eine direkte Frequenzganganalyse für gekoppelte Fluid-Struktur-Modelle zur Verfügung.

Aus einer gekoppelten Berechnung erhält man die gleichen Strukturergebnisse wie aus der Strukturmechanik alleine. Zusätzlich erhält man das Druckfeld in der Luft und Übertragungsfunktionen von Strukturknoten auf Fluidknoten und umgekehrt. Darüber hinaus kann im Druckfeld die Schallschnelle (als Vektor oder als Betrag) ermittelt werden.

Zusätzlich zur Luft im Fahrzeug kann auch die Luft um das Fahrzeug in die gekoppelte Rechnung einbezogen werden. Damit können auch Schalldurchgangsaufgaben berechnet werden (von der Straße oder vom Luftschall an das Ohr des Fahrers).

Höchstleistung

In die Verbesserung und Beschleunigung von Algorithmen wird laufend investiert. Im Bereich der Karosserieberechnung sind folgende Punkte hervorzuheben:

- Für große Modelle (mit Millionen von Freiheitsgraden) und vielen Eigenformen (mit Tausenden von Moden), kann die Eigenwertanalyse mit der *MLDR-Methode (Multi-Level Dynamic Reduction)* viel schneller durchgeführt werden (zu Details siehe Seite 98). Diese Methode steht sowohl für die reine Strukturmechanik als auch für die gekoppelte Fluid-Struktur-Dynamik zur Verfügung.
- In der Frequenzganganalyse müssen häufig viele dynamische Lastfälle berechnet werden (mehrere Hundert Lastfälle). Mit sog. *verbundenen Situationen (Assembled Situations)* können diese Lastfälle gleichzeitig gelöst werden statt nacheinander (siehe Seite 102).
- Für eine große Anzahl von Moden mit vielen Anregungsfrequenzen kann die Frequenzganganalyse mit einem iterativen Löser stark beschleunigt werden.

Optimierung

Unterstützt durch VisPER und PERMAS können Optimierungsaufgaben am Fahrzeug in integrierter Weise durchgeführt werden. Das Optimierungsmodell ist Teil der Modellbeschreibung und kann in einfacher Weise von allen vorhandenen Referenzen Gebrauch machen (wie Knoten- und Elementsets). Obwohl prinzipiell alle Optimierungsverfahren (wie sie auf den Seiten 108 bis 118 beschrieben sind) auch für Karosserien verwendbar sind, sind doch die folgenden besonders hervorzuheben:

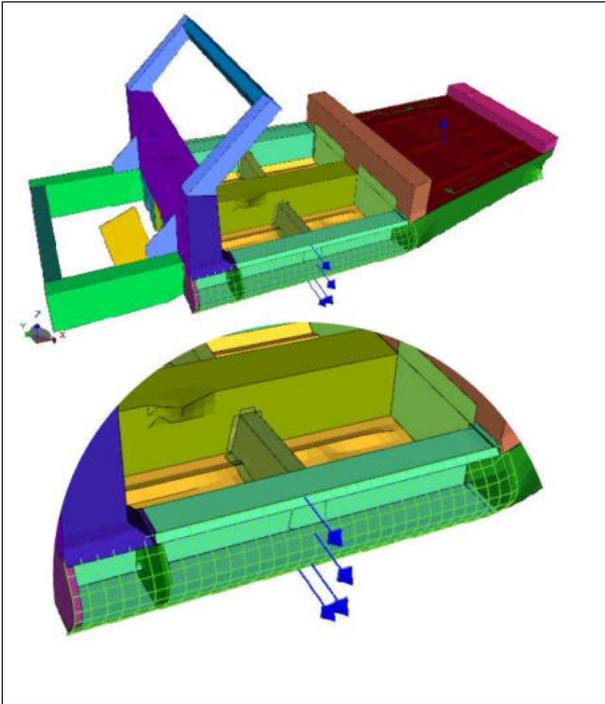


Abbildung 18: Formoptimierung eines Schwelers mit Übergang zu benachbarten Teilen

- **Dimensionsoptimierung:** Wird zur Optimierung von Elementeigenschaften wie Schalendicke, Balkenquerschnittswerte, Federsteifigkeiten oder Dämpfungseigenschaften verwendet.
- **Formoptimierung:** Wird zur Optimierung der Geometrie von Bauteilen durch Änderung der Knotenkoordinaten eingesetzt (auch in Verbindung mit inkompatiblen Netzen).
- **Sickengenerierung:** Wird verwendet, um die Position und die Form von Sicken in Schalenstrukturen zu bestimmen (siehe Abb. 19).

Alle diese Optimierungsarten können in einem Optimierungsprojekt gemeinsam auftreten. Statische und dynamische Analysen können in einem solchen Projekt gemeinsam verwendet werden. Die Modellierungsarbeiten für die Optimierung werden von VisPER voll unterstützt (zu Details siehe Seite 47). Auch die Auswertung der Optimierung kann mit VisPER erfolgen.

In der dynamischen Berechnung kommt der Optimierung von Übertragungsfunktionen eine besondere Bedeutung zu. Diese Frequenzgangoptimierung kann mit einer Übertragungsfunktion als Zielfunktion durchgeführt werden (z.B. mit einer frequenzabhängigen Begrenzung der Amplituden).

Falls die Ziel-Übertragungsfunktion aus Experimenten stammt, dann nennt man die Optimierung auch *Model Updating*. Dadurch werden ausgewählte Parameter des FE-Modells so abgestimmt, dass die Übertragungsfunktion aus der Simulation an diejenige aus dem Experiment so weit wie möglich angepasst wird.

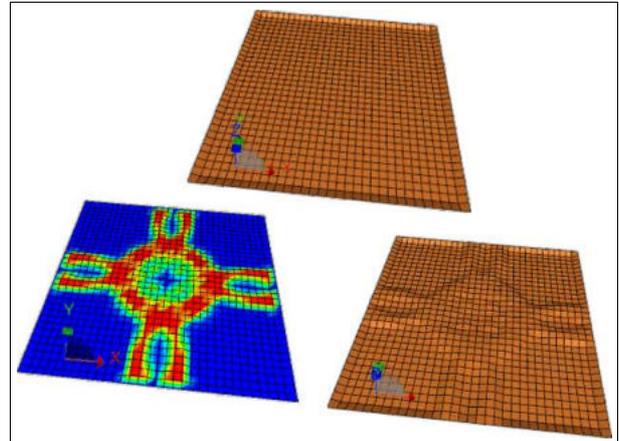


Abbildung 19: Sickengenerierung für eine Platte mit Sickenlage und -höhe

Motorberechnung

Für die Berechnung von Verbrennungsmotoren spielen viele physikalische Effekte eine wichtige Rolle. Im Bereich der Statik sind es Dichtheit und Festigkeit unter sich ändernden Temperaturbedingungen und im Bereich der Dynamik Schallabstrahlung und Frequenzgang mit allen Anbauteilen. Der Einfluss der Temperatur erfordert zumindest in der Statik eine gekoppelte Analyse unter Einbeziehung der Wärmeleitung. Bei der Montage müssen die Schraubenvorspannungen berücksichtigt werden und für Schraubenanzug und Betriebslasten ist eine präzise Nachbildung der Belastungsfolge erforderlich. Dazu kommen Effekte aus nichtlinearem Materialverhalten.

Diese und andere Effekte müssen bei der Motorenberechnung einbezogen werden.

Temperaturberechnung

Anwendungsbeispiele sind die Berechnung der Betriebstemperaturen und das Härten im Ölbad durch Simulation des Abkühlvorgangs. Folgende Funktionalitäten stehen zur Verfügung:

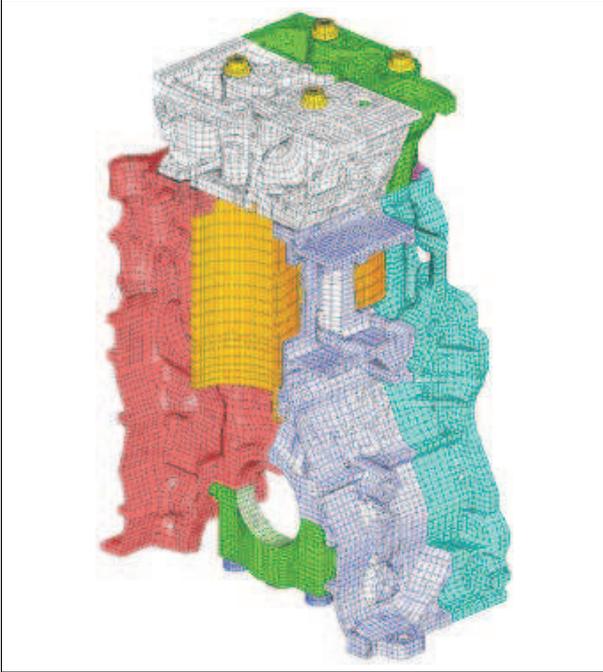


Abbildung 20: Einfaches Motormodell
Daimler AG, Commercial Vehicle Division)

- Nichtlineares Material mit temperaturabhängiger Konduktivität und Kapazität,
- Temperaturabhängiger Wärmeübergang zur Modellierung des Wärmeaustauschs mit der Umgebung,
- **Vollautomatisches Lösungsverfahren** für nichtlineare Wärmeleitungsberechnungen mit **Schrittweitensteuerung** und mehreren Konvergenzkriterien, ein automatisches Lastschrittverfahren für den stationären und ein automatisches Zeitschrittverfahren für den transienten Fall,
- Komfortable und sehr detaillierte Beschreibungsmethode für die Lastaufbringung und Vorgabe der Ergebniszeitpunkte,
- Vollständige Kopplung zur statischen Analyse vorhanden (stationär und transient),
- Wenn der Wärmeaustausch durch Strahlung einen Einfluss auf die Ergebnisse hat, kann dieser in der Temperaturberechnung einbezogen werden.
- Wenn Temperaturfelder für Zylinderkopf und Motorblock vorliegen, dann fehlen möglicherweise Temperaturen für weitere Teile wie Dichtungen und Schrauben. Dann kann mit Hilfe der Submodell-Technik ein *Mapping der Temperaturen* erfolgen (siehe Seite 57).

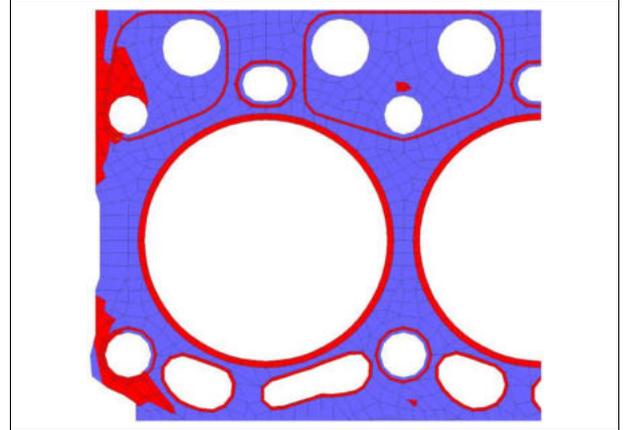


Abbildung 21: Kontaktstatus
für die Dichtungselemente

Statik

Die Verformungen werden berechnet unter verschiedenen Belastungen mit linearem und nichtlinearem Materialverhalten:

- Nichtlineare Materialmodelle:
 - Plastische Verformung,
 - Nichtlinear-elastisch,
 - Kriechen,
 - Grauguss mit unterschiedlichem Verhalten im Zug und Druckbereich.
- *Dichtungselemente*:
 - Komfortable Simulation von Dichtungen,
 - Verhalten basiert auf Druck-Weg-Messkurven,
 - Eingabe einer Vielzahl von Entlastungspfaden möglich.
- Kontaktanalyse:
 - Viele Kontakte können berücksichtigt werden (> 100000),
 - Konkurrenzlos schnelle Lösungszeiten,
 - Neueste Solvortechnologie,
 - Reibung kann mit Wechsel zwischen Haft- und Gleitreibung berücksichtigt werden,
 - Vorspannung wird in einem Rechenschritt exakt aufgebracht,
 - Beschreibung einer realitätsnahen Lastgeschichte,
 - Wenn ein Motor aus vielen Teilen besteht, die alle nur durch Kontakt gehalten werden, dann bietet der RBM-Assistent in VisPER eine einfache Möglichkeit, um Kompensationsfedern anzubringen (siehe Seite 45).
 - Kontaktsergebnisse: Pressung, Kontaktstatus, Knotenkräfte, Sättigung, etc..

- **Submodell-Technik (Spannungslupe):**
 - Für nachträgliche Detailuntersuchungen,
 - Automatische Interpolation der Verschiebungen auf ein feineres Netz als Randbedingungen,
 - Damit wird eine lokale Berechnung durchgeführt, um z.B. genauere Spannungen zu erhalten.

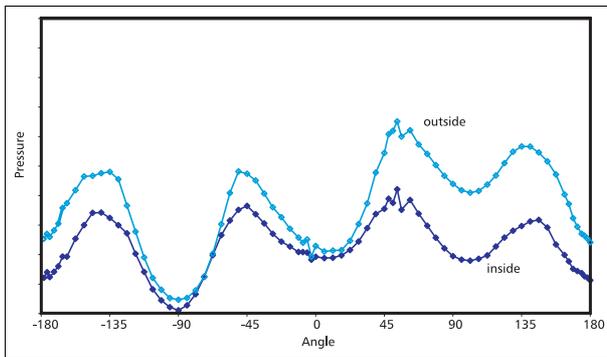


Abbildung 22: Druckverteilung am Stopper über dem Winkel

Höchstleistung

Aufgrund der typischen großen Modelle in der Motorberechnung orientieren sich alle Berechnungsmethoden an höchstmöglicher Effizienz. Hervorzuheben sind dabei:

- hervorragende Leistung durch spezielle Algorithmen für große Modelle mit nichtlinearem Materialverhalten und Kontakt,
- Auslegung der Kontaktalgorithmen grundsätzlich für große Modelle mit vielen Kontakten,
- konkurrenzlos schnelles Verfahren bei der Kombination von linearem Materialverhalten und Kontakt.
- Dichtungselemente können auch als integraler Teil einer Kontaktberechnung verwendet werden (sog. **CCNG-Analyse**, Contact Controlled Nonlinear Gasket Analyse), ohne sie wie bisher als Teil einer Berechnung mit nichtlinearem Materialverhalten zu betrachten. Wenn keine weiteren Nichtlinearitäten außer Kontakt und Dichtungselemente vorhanden sind, kann so auf nichtlineare statische Berechnung verzichtet werden und die Rechenzeit somit um mehr als den Faktor 10 beschleunigt werden (z.B. in der Motorenberechnung mit Schraubenvorspannung, Temperaturlasten, und Zylinderdrücken). In Fällen mit weiteren Materialnichtlinearitäten kann immer noch eine deutliche, aber nicht ganz so hohe Verringerung der Rechenzeit erzielt werden.

- Eine deutliche Beschleunigung der Rechenzeit ist bei Wiederholungen einer Kontaktanalyse möglich, wenn Modellvarianten gerechnet werden. Der resultierende Kontaktstatus einer Kontaktanalyse wird in sog. **Kontaktstatus-Dateien** gespeichert. Dieser Kontaktstatus kann dann bei der wiederholten Kontaktanalyse als Startpunkt verwendet werden. Dies führt je nach den durchgeführten Modelländerungen zu wesentlichen Verkürzungen der Rechenzeit.
- Wenn bei der Motorberechnung mehrere Temperaturfelder mehrfach verwendet werden, z.B. wenn mehrere Belastungszyklen mit unterschiedlichen Temperaturen wie im kalten und warmen Motor berechnet werden, dann steht ein spezieller Algorithmus zur Verfügung, der die Gesamtberechnung erheblich beschleunigt (siehe Abb. 118).

Dynamik

Durch die Verwendung der gleichen Software für dynamische und statische Simulationen ist nur ein Modell notwendig. Alle dynamischen Verfahren stehen für die Motorberechnung zur Verfügung (siehe Seiten 96 bis 103). Einige wichtige Punkte sind hier:

- Für die Ermittlung von Eigenwerte und -formen für große Volumenmodelle steht MLDR zur Verfügung (siehe Seite 98).
- Schnelle **Kondensationsverfahren** erlauben die dynamische Berechnung von Motoren mit vielen Anbauteilen (DEVX, siehe Seite 97).
- Mit der **trockenen Kondensation** (Seite 97) können auch Fluide korrekt in ein mechanisches Modell integriert werden, ohne Druckfreiheitsgrade direkt mitzunehmen (z.B. bei der Ölwanne).
- Eine Bewertung der Luftschallemission kann über Oberflächenschnellen erfolgen.

Um den Übergang von einer statischen Analyse mit Kontakt zu einer dynamischen Berechnung zu unterstützen, können die aktiven Kontakte eingefroren werden (auch **Contact Locking** genannt, siehe Seite 83). Zusätzlich kann das Einfrieren von einem Schwellenwert für den Kontaktdruck abhängig gemacht werden, um z.B. dynamische Rechenergebnisse mit experimentellen Daten abzugleichen.

Bauteilverbindungen

Die Modellierung von Bauteilverbindungen bestimmt wesentlich die Qualität der Simulationsergebnisse. Andererseits ist die Abbildung von Verbindungsdetails aufwändig und man sucht daher nach vereinfachten Verbindungsmodellen mit ausreichender Genauigkeit. Bauteilverbindungen befinden sich also im Spannungsfeld zwischen Modellierungsaufwand und Ergebnisgüte.

Man kann zwei Klassen von Bauteilverbindungen unterscheiden, die nachfolgend beschrieben werden:

- Strukturverbindungen,
- Verbindungselemente.

Strukturverbindungen

Bauteile können über ihre Oberflächen auf verschiedene Arten gekoppelt werden:

- zur Kopplung von z.B. zwei zylindrischen Teilen, wo das innere Teil einen etwas größeren Durchmesser hat als der Innendurchmesser des äußeren Teils, eignet sich eine Pressverbindung, welche das Übermaß direkt verwendet und ohne Kontakt auskommt. Diese Verbindung bleibt allerdings unter allen Lasten erhalten.
- über eine feste Kopplung (d.h. die Kopplung bleibt während der Belastung stets erhalten). Dies wird typischerweise durch kinematische Zwangsbedingungen erreicht (siehe Seite 62).
- über Kontakt (d.h. die Verbindung kann während der Belastung öffnen und schließen). Dies wird mit Hilfe der Kontaktanalyse gelöst (siehe Seite 79).

In allen Fällen können die gekoppelten Flächen kompatibel oder inkompatibel vernetzt sein (siehe dazu die Bauteilkopplung auf Seite 60). Letzteres hilft, den Modellierungsaufwand zu reduzieren, weil die Teile unabhängig voneinander vernetzt werden können.

Die feste Kopplung kann mit allen Berechnungsarten (wie Statik und Dynamik) verwendet werden. Aber beim Kontakt benötigt z.B. eine nachfolgende dynamische Berechnung einen zusätzlichen Berechnungsschritt. Dazu gehört zunächst eine Kontaktanalyse und ein nachfolgendes Einfrieren der aktiven Kontakte (auch *Contact Locking* genannt, siehe Seite 83). Auf diese Weise wird eine Linearisierung des nichtlinearen Kontaktproblems er-

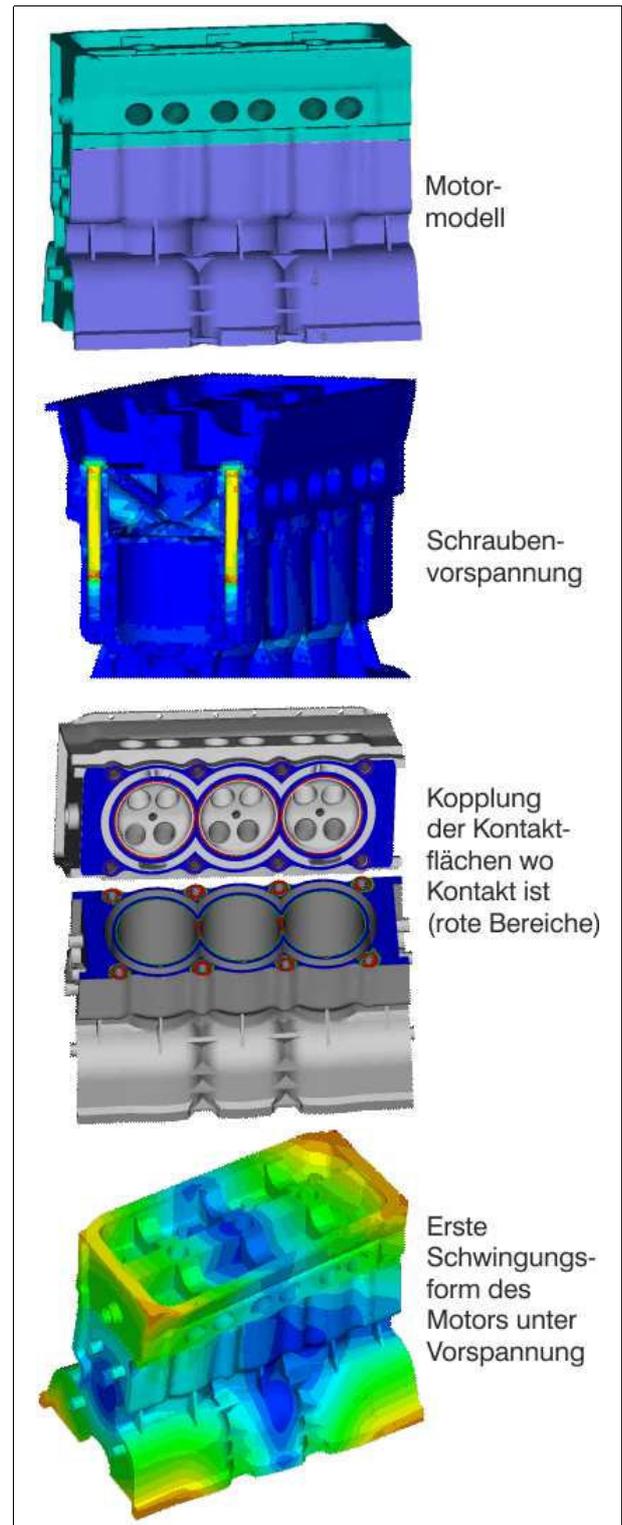


Abbildung 23: Dynamische Berechnung eines Motors unter Schraubenvorspannung

reicht. Abb. 23 beschreibt den Prozess der dynamischen Analyse eines vorgespannten Motors. Solange keine Schraubenvorspannung aufgebracht wird, schwingen Motorblock und Zylinderkopf unabhän-

gig voneinander. Aber nach Aufbringen der Schraubenvorspannung schwingt der gesamte Motor wie ein Festkörper. Dies wird durch das Einfrieren jener Kontakte erreicht, die bei der Kontaktanalyse auch tatsächlich im Kontakt waren. Alle anderen Bereiche bleiben ungekoppelt.

Wenn die Kontakte einmal eingefroren sind, dann können Eigenwerte oder Frequenzgänge berechnet werden. Selbst die Optimierung von Frequenzgängen ist möglich, um z.B. die Schallabstrahlung des Motors zu reduzieren. Abb. 24 zeigt die Wirkung von bewegliche Rippen auf der Oberfläche des Motorblocks und die Wirkung einer Dickenänderung der Rippen auf die abgestrahlte Schalleistung. Die Rippen werden inkompatibel gegenüber dem Motorblock vernetzt. Dann können Sie auf der Oberfläche verschoben werden, ohne Rippen oder Motorblock neu vernetzen zu müssen. Dies wird von der Formoptimierung genutzt.

Verbindungselemente

Folgende Modellierungen können als Verbindungselemente betrachtet werden:

- **Schraubverbindungen:**

Diese werden in der Regel unter Vorspannung verwendet. Deshalb wird die Kontaktanalyse verwendet, um vorgespannte Schrauben zu modellieren und zu berechnen (siehe Seite 81 für weitere Details).

Die Möglichkeit, Schrauben mit dem Gewinde an die Struktur zu koppeln ist dabei besonders für kurze Schrauben interessant (siehe Abb. 25), weil ihr Schaftquerschnitt sich unter Vorspannung verwölbt.

- **Schweißpunktverbindungen:**

Die typische Modellierungsweise von Schweißpunkten umfasst ein Element an der Stelle des Schweißpunkts, welches die zusätzliche Schweißpunktsteifigkeit darstellt, und eine MPC-Bedingung, welche die Einkopplung der Elementkräfte in die beteiligten Flansche bewerkstelligt. Dabei sind die Flansche üblicherweise inkompatibel vernetzt (auf Seite 61 mehr zur automatischen Schweißpunktgenerierung). Ein spezielles Schweißpunktmodell ist ebenfalls verfügbar, das eine verbesserte Darstellung der Steifigkeit erlaubt und zugleich weniger sensitiv gegenüber unterschiedlichen Netzfeinheiten der Flansche ist (siehe Seite 122).

- **Dichtungsverbindungen:**

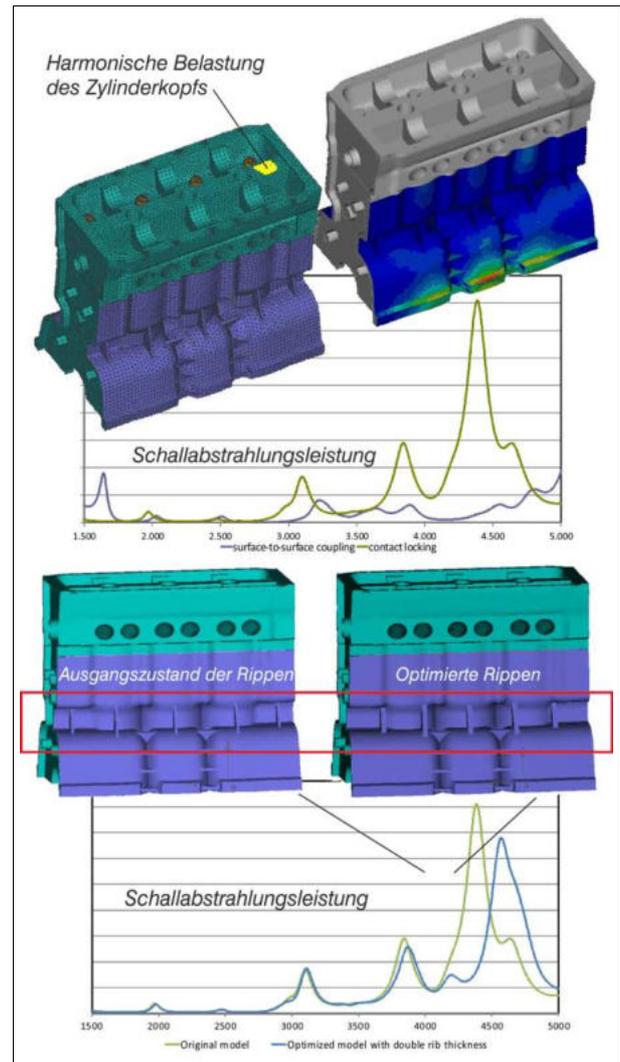


Abbildung 24: Optimierung der Rippendicke und der Rippenposition, um die Schallabstrahlung durch die Oberfläche des Motorblocks zu reduzieren

Um Dichtungen einfach zu beschreiben, stehen Dichtungselemente zur Verfügung, welche das nichtlineare Verhalten in einer ausgezeichneten Richtung über Kraft-Verschiebungskurven beschreiben.

Diese Dichtungselemente werden in der Kontaktanalyse berücksichtigt, wo die Kraft-Verschiebungskurven als interne Kontakte abgebildet werden.

In der Dynamik muss oft die frequenzabhängige Steifigkeit und Dämpfung einer Dichtung berücksichtigt werden. Dazu werden Dichtungen in der Regel als Feder-Dämpfer-Systeme modelliert (siehe Abb. 150).

- **Feder-Dämpfer-Verbindungen:**

In der Dynamik verhalten sich viele Füge- und

len hinsichtlich Steifigkeit und Dämpfung abhängig von der Frequenz. Diese Stellen werden oft als Feder-Dämpfer-Systeme modelliert, welche auch die Frequenzabhängigkeit berücksichtigen (siehe Abb. 150).

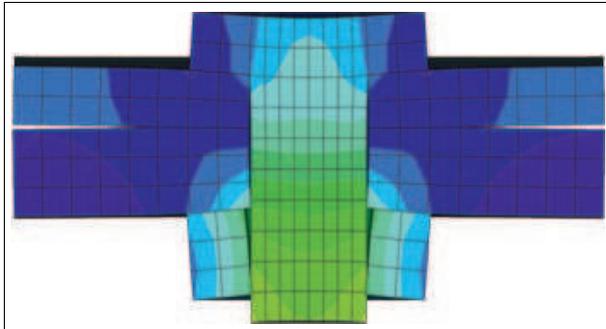


Abbildung 25: Kurze Schraube unter Vorspannung

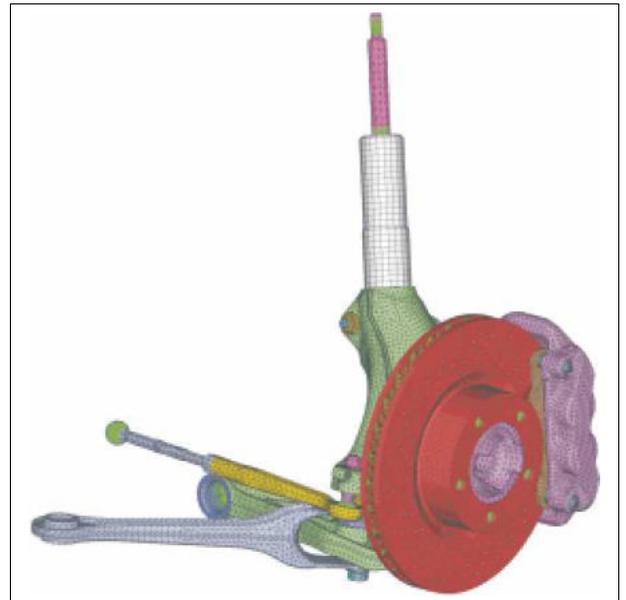


Abbildung 26: Bremsenmodell
mit freundlicher Genehmigung der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG in Stuttgart, Deutschland.

Bremsenquietschen

Bremsenquietschen gibt es, seit es Bremsen gibt, und trotz intensiver Forschung seit vielen Jahrzehnten kommen immer noch neue Autos auf den Markt, deren Bremsen so quietschen, dass für die Hersteller daraus teure Gewährleistungsfälle entstehen. Aber das betrifft nicht nur Pkw sondern ebenso alle Arten von Nutzfahrzeugen, desgleichen bei Eisenbahnwagen, Flugzeugbremsen oder gar Fahrradbremsen. Ebenso sind nicht nur Scheibenbremsen betroffen, sondern auch Trommelbremsen.

Es fehlt nicht an numerischen Ansätzen, das Bremsenquietschen einer Berechnung zugänglich zu machen, aber bislang hat die Komplexität des Phänomens verhindert, dass wegen der damit verbundenen großen Rechenzeiten massiv Berechnungen eingesetzt werden konnten. Solange ein einzelner Parametersatz für eine Bremse viele Stunden Rechenzeit erfordert, solange bleibt es praktisch unmöglich auch noch Geometrieänderungen durchzuführen, um eine Konfiguration zu ermitteln, welche in den typischen Betriebszuständen kein Quietschen zeigt.

Das Bremsenquietschen wird weitgehend als reibungsinduzierte dynamische Instabilität interpretiert. Deshalb gibt es grundsätzlich zwei verschiedene Berechnungsmöglichkeiten: Transiente Analysen oder komplexe Eigenwertanalysen. Wegen des

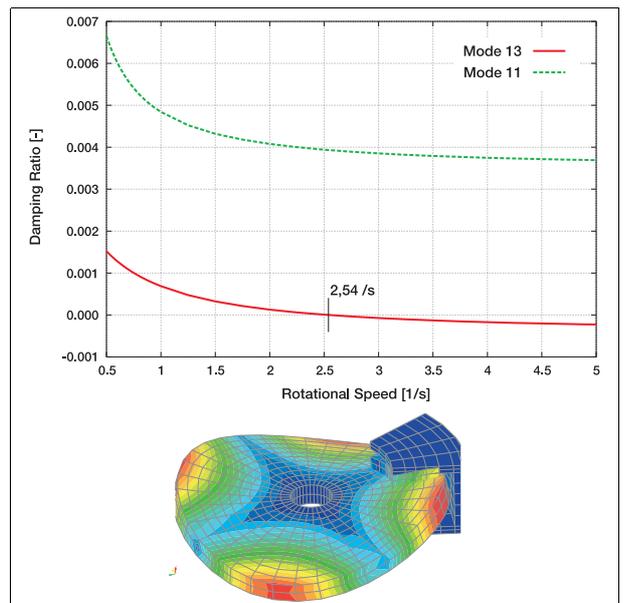


Abbildung 27: Einfaches Bremsenmodell (1)
mit einem instabilen Biegemode ($m=2, n=1$), der ab 2,54 U/s auftritt

großen Zeitaufwands einer transienten Analyse liegt es nahe, die Stabilitätsuntersuchungen über eine Bestimmung der komplexen Moden durchzuführen.

Die Berechnung kann in folgende Schritte zerlegt werden:

- Eine linear statische Analyse mit Kontakt und Reibung unter Bremsdruck und Rotation. Dabei

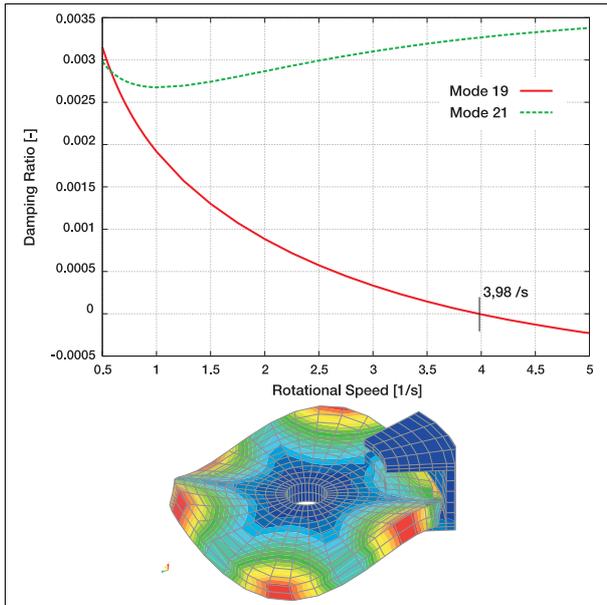


Abbildung 28: Einfaches Bremsenmodell (2) mit einem instabilen Biegemode ($m=3, n=1$), der ab 3,98 U/s auftritt

kann das Gleiten zwischen Scheibe und Bremsbelag über eine Starrkörperbewegung beschrieben werden, um die Gleitgeschwindigkeit zu ermitteln.

- Eine reelle Eigenwertanalyse unter dem zuvor ermittelten Kontaktzustand. Dazu wird der Kontaktzustand eingefroren.
- Eine komplexe Eigenwertanalyse mit zusätzlichen Reibungs- und Rotationsanteilen. Dazu werden Kreisel- und Steifigkeitsterme hinzugefügt, welche die Bremsscheibe als elastische Struktur im Inertialsystem berücksichtigen. Außerdem werden noch weitere Steifigkeits- und Dämpfungsterme ermittelt, die sich aus dem Reibungszustand ergeben, welcher durch die Kontaktanalyse zuvor berechnet wurde.

Wie üblich werden die Instabilitäten bei der komplexen Eigenwertanalyse dadurch sichtbar, dass der Realteil der komplexen Eigenfrequenz positiv bzw. die effektive Dämpfung negativ wird.

Die komplexe Eigenwertanalyse wird in einem Lauf für den gesamten Bereich der interessierenden Drehgeschwindigkeiten durchgeführt. Mit diesem Durchlauf erhält man für einen Parametersatz wie Reibungskoeffizient oder Materialwert für den Bremsbelag alle relevanten Instabilitätsstellen. Mit weiteren Berechnungen werden Parameteruntersuchungen durchgeführt, um eine Stabilitätskarte für

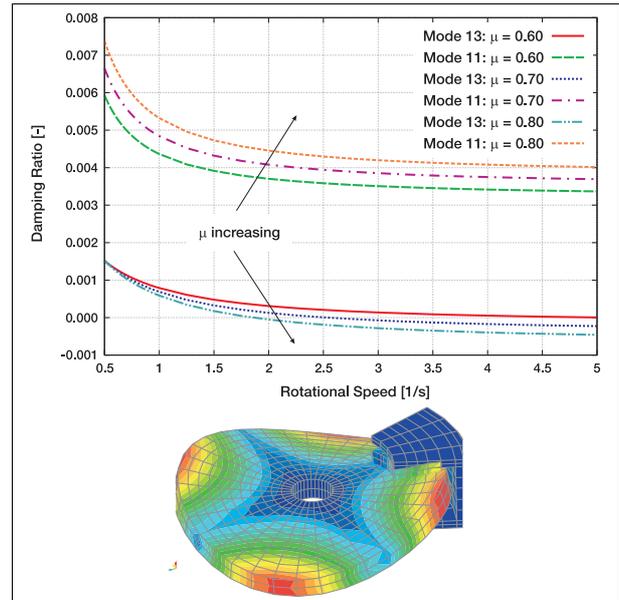


Abbildung 29: Einfaches Bremsenmodell (3) mit einem instabilen Biegemode ($m=2, n=1$), der in Abhängigkeit vom Reibkoeffizienten bei unterschiedlichen Drehgeschwindigkeiten instabil wird.

alle zu untersuchenden Einflüsse zu erhalten.

Als Beispiel wird eine einfache Bremse verwendet, die verschiedene Instabilitäten bei verschiedenen Drehgeschwindigkeiten zeigt (siehe Abb. 27 and Abb. 28). Die gezeigten Graphen wurden jeweils in einem einzigen PERMAS-Lauf erzeugt.

Zur Untersuchung der Stabilität bei verschiedenen Reibkoeffizienten zwischen Bremsbelag und Bremsscheibe wird die Analyse mehrfach wiederholt (siehe Abb. 29).

Eine ähnliche Untersuchung kann auch für den E-Modul des Bremsbelages durchgeführt werden. Die Abbildung 30 zeigt dazu ein Beispiel.

Um die Rechenzeiten für diese Analysen zu illustrieren, sei folgendes große Industrie-Beispiel angeführt:

480.000	Elemente
900.000	Knoten
2,1 Mio.	Unbekannte
218	Reelle Eigenwerte
240	Komplexe Eigenwerte
80	Drehgeschwindigkeiten

Für dieses Beispiel liegt die gesamte Rechenzeit (elapsed) mit PERMAS Version 18 bei 12 Minuten auf einem Intel E5-2697 v4 Prozessor (18 cores /

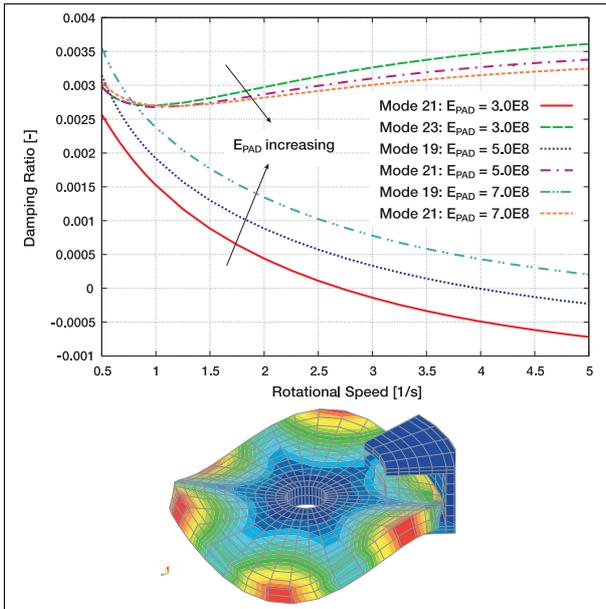


Abbildung 30: Einfaches Bremsenmodell (4) mit einem instabilen Biegemode (m=3, n=1), der in Abhängigkeit vom E-Modul des Bremsbelages bei unterschiedlichen Drehgeschwindigkeiten instabil wird.

2.3 GHz) mit 105 GB Memory.

Mit solchen Rechenzeiten ist eine umfangreiche Parameteruntersuchung einer Bremse in kurzen Zeiträumen möglich.

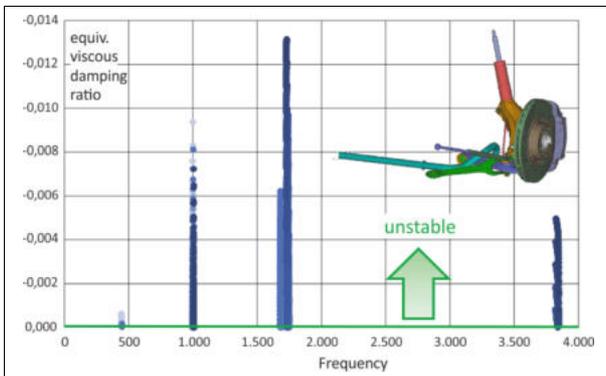


Abbildung 31: Stabilitätskarte einer Bremse für 7110 Parametersätze aus Drehgeschwindigkeit, E-Modul der Scheibe und Reibkoeffizient zwischen Scheibe und Bremsbelag. Die Gesamtrechenzeit betrug dafür 5 Std. 12 Min..

Eine solche Parameteruntersuchung kann z.B. dafür verwendet werden, um eine Stabilitätskarte einer Bremse zu erstellen (siehe Abb. 31). Dabei werden alle instabilen Moden, wie sie sich aus einer komplexen Eigenwertanalyse ergeben, für eine große Anzahl verschiedener Parametersätze zusammen-

gestellt. Dadurch werden die besonders gefährdeten Moden sichtbar gemacht. Die damit verfügbaren Informationen erlauben die Ermittlung der Bauteile einer Bremse, die für eine Verbesserung des Quietschverhaltens verändert werden sollten.

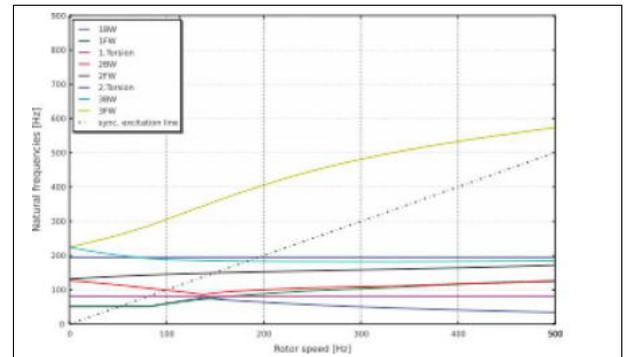


Abbildung 32: Campbell-Diagramm für die Auswertung in der Rotordynamik

Rotierende Systeme

Die verfügbaren statischen und dynamischen Berechnungsmöglichkeiten erlauben die Analyse rotierender Systeme, welche besonderen Randbedingungen unterworfen sind.

Abb. 33 gibt einen Überblick über die Berechnungsmöglichkeiten von rotierenden Systemen. Sowohl mitdrehende als auch inertielle Bezugssysteme können verwendet werden.

Statik

In einer quasistatischen Berechnung, die z.B. auch den Kontakt im Nabenbereich berücksichtigt, werden die Zentrifugalkräfte aufgrund der Drehung berücksichtigt. Dabei ist das Bezugssystem ein mitrotierendes Relativsystem oder das Inertialsystem (bei axialsymmetrischem Rotor). Die statische Berechnung ist auf den unterkritischen Betrieb beschränkt.

In einer linearen Berechnung werden die Zentrifugalfeldsteifigkeit und die geometrische Steifigkeit jeweils bei der angegebenen Drehzahl berücksichtigt. Bei einer geometrisch nichtlinearen Berechnung erfolgt eine Korrektur der Zentrifugalkräfte.

	Körperfestes Bezugssystem	Raumfestes Bezugssystem
Elastischer Rotor	beliebige Form	axialsymmetrisch
Mehrere Rotoren	einheitliche Drehzahl	verschiedene Drehzahlen
Lagersteifigkeit	isotrop	beliebig, drehzahlabh.
Stator	keiner	beliebige Form
Statische Analyse	unterkritisch	unterkritisch
Dynamische Analyse	unter- und überkritisch	unter- und überkritisch
Zusätzliche Matrizen	geometrische Steifigkeit, Zentrifugalfeldsteifigkeit, Coriolis-Matrix	geometrische Steifigkeit, konvektive Steifigkeit, gyroskopische Matrix
Dämpfung modal +	Material, viskos	drehzahlabh. Lager, Material, viskos im Stator
Campbell-Diagramm in einem Lauf	mit Modeverfolgung und Stabilitätsbewertung	mit Modeverfolgung und Stabilitätsbewertung
Modale und direkte Antwort	harmonisch, periodisch (stationär), im Zeitbereich	harmonisch, periodisch (stationär), im Zeitbereich
Dimensions- und Formoptimierung	für Rotor	für Rotor, Stator und Lager
Aktive Dämpfung	von Rotor	von Stator und Lager
Modellreduktion	von Rotor	von Rotor und Stator

Abbildung 33: Berechnungen in der Rotordynamik

Dynamik

Um den Verlauf der Eigenfrequenzen über der Drehzahl zu ermitteln steht ein automatisches Verfahren zur Verfügung (siehe Abb. 32 und Seite 98), mit dem ein *Campbell*-Diagramm direkt erstellt werden kann.

In der Dynamik rotierender Systeme geht man von den allgemeinen Voraussetzungen einer linearisierten Bewegungsgleichung mit konstanten Koeffizienten aus. Das Bezugssystem kann ein mitrotierendes Relativsystem oder das Inertialsystem sein. Die Drehgeschwindigkeit wird als konstant vorausgesetzt.

Bei einer Kopplung von rotierenden und nicht-rotierenden Teilen **im mitdrehenden Bezugssystem** muss man für den rotierenden Teil keinerlei Einschränkung berücksichtigen, während die nicht-rotierenden Teile eine isotrope Lagerung für den Rotor darstellen müssen.

Für diese Konfiguration können die direkten und modalen Methoden im Zeit- und Frequenzbereich eingesetzt werden. Dabei wird auch die jeweilige *Coriolis-Matrix* bei der Lösung berücksichtigt.

Bei einer Dynamik **im Inertialsystem** hat man für die nicht-rotierende Struktur keine weiteren Einschränkungen zu berücksichtigen, aber die rotierende Struktur muss axialsymmetrisch sein.

Auch für diese Konfiguration können die direkten und modalen Methoden im Zeit- und Frequenzbereich unter Berücksichtigung der *Kreiselmatrix* eingesetzt werden. Dabei bleiben die modalen Methoden zur Ermittlung der dynamischen Antwort auch im überkritischen Bereich einsetzbar.

Um die *kritische Drehgeschwindigkeit* zu ermitteln, kann ein Campbell-Diagramm verwendet werden. Im mitdrehenden Bezugssystem wird ein Eigenwert bei der kritischen Geschwindigkeit einen Nullwert zeigen.

Eine *drehzahlabhängige Steifigkeit und viskose Dämpfung* von Rotorlagern kann in einer komplexen Eigenwertanalyse und bei der Erstellung eines Campbell-Diagramms berücksichtigt werden. Das wird mit einem speziellen Element erreicht (d.i. CONTROL6-Element, siehe Abb. 146).

Von speziellem Interesse bei der Dynamik ist die stationäre Antwort im Modalraum. Dabei werden zunächst die statischen Spannungen unter Zentrifugallast ermittelt. Dann werden geometrische und Zentrifugalfeldsteifigkeit einbezogen und die Verschiebungen für den konstanten Lastanteil berechnet. Nach einer Eigenwertanalyse werden im Modalraum dann Frequenzgänge für jede Harmonische ermittelt, welche dann nach einer Rücktransformation in den physikalischen Raum mit den statischen Verschiebungen im Zeitbereich überlagert werden (siehe Seite 100).

Berechnung von Werkzeugmaschinen

Bei der Entwicklung von Werkzeugmaschinen spielt das dynamische Verhalten des Gesamtsystems für die Effizienz und Präzision der Maschinen die entscheidende Rolle. Das Gesamtsystem besteht dabei aus den Strukturteilen, den Antrieben der verschiedenen Achsen und ihrer Regelung. Bei der Bearbeitung des Werkstücks durch das Werkzeug entstehen Kräfte, welche die Maschine zu Schwingungen anregen können, die durch die Systemkomponenten ausreichend gedämpft werden müssen. Am Ende soll die Maschine bei hoher Geschwindigkeit ein Höchstmaß an Genauigkeit erreichen.

Alle verfügbaren dynamischen Analysemethoden können auch für die Berechnung von Werkzeugmaschinen verwendet werden, wie die Eigenwert- und

Frequenzganganalyse, die komplexe Eigenwertberechnung und die Zeitintegration. Außerdem stehen Optimierungsverfahren zur Verfügung, um Modelländerungen zu ermitteln, welche die Eigenschaften einer Werkzeugmaschine bezüglich Gewicht und unter statischer dynamischer Belastung verbessern können.

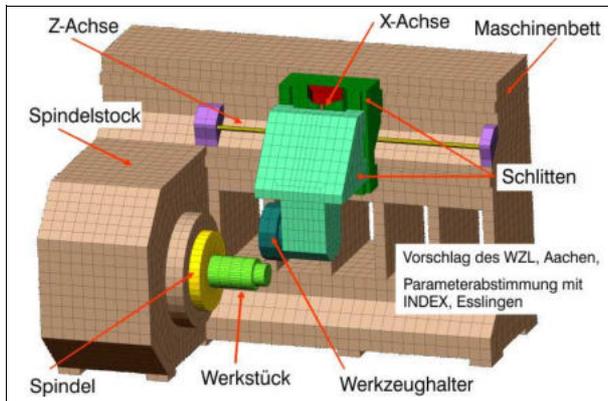


Abbildung 34: Vereinfachtes Modell einer Drehmaschine auf Vorschlag des WZL in Aachen und unterstützt durch INDEX, Esslingen für eine sinnvolle Parametereinstellung

Als Beispiel für eine Drehmaschine wurde vom WZL in Aachen das Modell in Abb. 34 vorgeschlagen. Die Systemparameter wurden dazu in Abstimmung mit INDEX-Werke GmbH & Co. KG in Esslingen festgelegt.

Die folgenden typischen Maschinenteile wurden für das Modell herangezogen:

- Bauteile:**
 Maschinenbett, Schlitten und Spindelstock sind als Volumenmodell erstellt worden (siehe Abb. 34).
- Führungen:**
 Diese sind Bestandteil der Struktur, aber die passende Modellierung der Verbindung geschieht über Feder-Dämpfer-Systeme, wobei die Feder- und Dämpferkräfte mit den verbundenen Volumenstrukturen über geeignete MPC-Bedingungen unter Berücksichtigung von inkompatiblen Netzen gekoppelt werden.
- Kugelumtriebe:**
 Diese werden mit Balkenelementen modelliert. Ihre Funktion besteht darin, die Drehbewegung des Antriebs in eine translatorische Bewegung des Schlittens umzusetzen. Diese Transformation wird mit Hilfe einer MPC-Bedingung realisiert, welche den Durchmesser des Gewindes

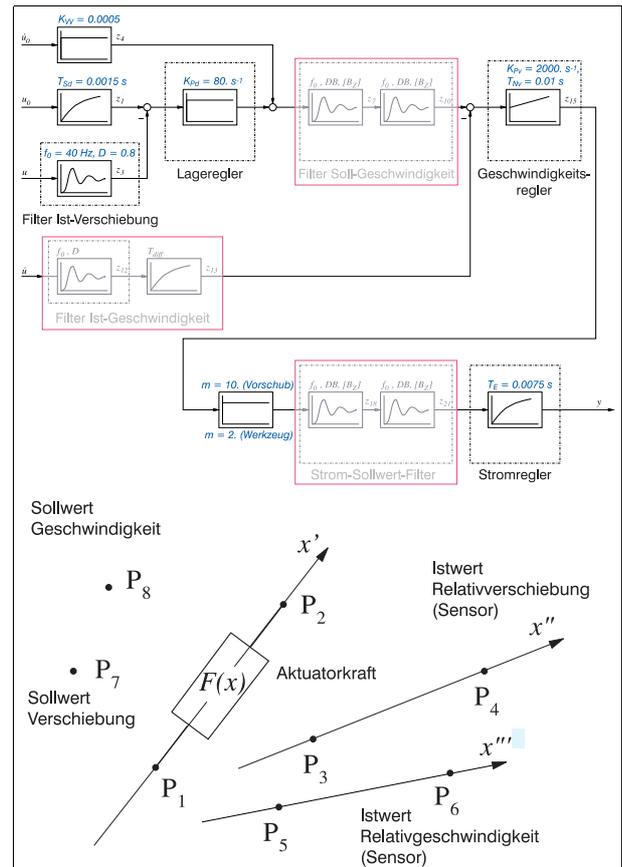


Abbildung 35: Blockdiagramm des Reglers und die entsprechende Darstellung als finites Element

und seine Steigung berücksichtigt.

- Spindel mit Werkstück:**
 Spindel und Werkstück werden wieder als Volumenmodelle realisiert. Die Kopplung zum Spindelstock erfolgt über ein spezielles Element und wieder mit einer geeigneten MPC-Bedingung. Das spezielle Element wird benötigt, um Steifigkeit und Dämpfung der Spindel-Lagerung abhängig von der Drehgeschwindigkeit zu gestalten (siehe Abb. 146).
- Regelung:**
 Um die Regelung im Modell zu berücksichtigen, wurde ein finites Element entwickelt, das einen sog. *Kaskadenregler* darstellt (wie in Abb. 35). Dieser Kaskadenregler enthält Positions- und Geschwindigkeitsregler zusammen mit Filtern und einem Stromregler. Dieser Regler enthält alle typischen Regelungsanteile, wie sie für die Regelung von Werkzeugmaschinen gebraucht werden und er wurde in Kooperation mit Herstellern von Werkzeugmaschinen entwickelt. Die Aktuatorkraft wird als Moment in den Kugel-

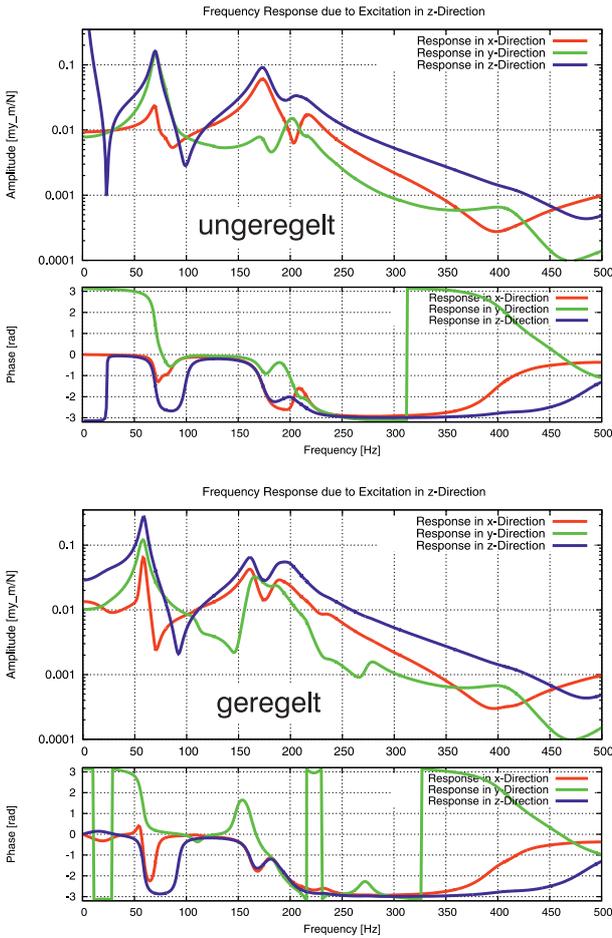


Abbildung 36: Frequenzgang zwischen Werkzeug und Werkstück aufgrund einer Anregung in z-Richtung für die unregelte (oben) und die geregelte (unten) Maschine

gewindetrieb beider angetriebener Achsen eingespeist (Z-Achse und X-Achse). Die Sensoren für die relativen Positionsänderungen befinden sich zwischen dem Maschinenbett und dem Z-Schlitten bzw. zwischen dem Z-Schlitten und dem X-Schlitten. Die Sensoren für die relative Geschwindigkeit (mit Hilfe von Drehratensensoren) befinden sich an den Kugelgewindetrieben. Die Parameter des Reglers müssen den tatsächlichen Regler wiedergeben, wie er in der Maschine verbaut wird. Deshalb sind die Parameter dem Berechnungsingenieur als Eingangswerte zur Verfügung zu stellen (wie auch andere Werte, z.B. fürs Material). Damit ist der Berechnungsingenieur in der Lage, die Entwicklung der Maschine mit einer vollen Systemsimulation zu unterstützen.

Im Beispielmodell befinden sich zwei Regler, einer für die translatorische Bewegung parallel zur

Spindelachse (Z-Achse) und einer für die radiale Bewegung (der Werkzeugzustellung, X-Achse). Die Reglerparameter sind in beiden Fällen dieselben mit Ausnahme des Parameters m , der ein Maß für die bewegte Masse in dieser Achsrichtung darstellt. Dies führt zu einem höheren Wert für die Z-Achse als für die X-Achse.

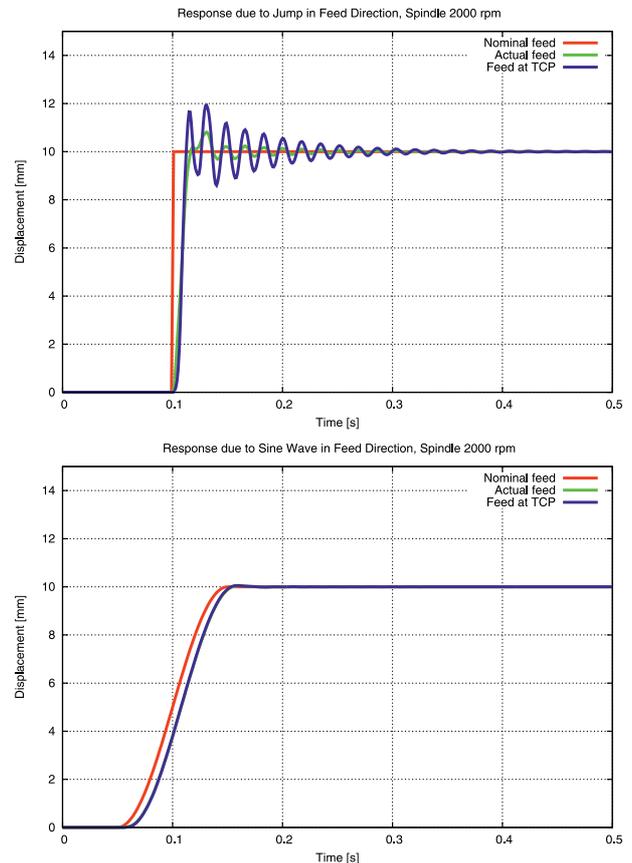


Abbildung 37: Zeitintegration nach einer Anregung in z-Richtung für einen plötzlichen Positionssprung (oben) und eine glatte Positionsänderung (unten) der geregelten Maschine

Typische Methoden zur dynamischen Berechnung von Werkzeugmaschinen sind:

- Eigenwertanalyse:** Modale Methoden haben den Vorteil, dass sie wegen der Modellreduktion deutlich effizienter sind. Trotzdem stehen auch direkte Verfahren zur Verfügung.
- Modale Frequenzganganalyse:** Abb. 36 zeigt den Frequenzgang für Amplitude und Phase zwischen Werkzeug und Werkstück bei einer Anregung in Z-Richtung unter unregelten (oben) und geregelten (unten) Bedingungen.
- Modale Zeitintegration:**

Abb. 37 zeigt die Antwort auf eine Positionsänderung des Werkzeugs in Z-Richtung. Einmal ist die Positionsänderung sprunghaft (oben) und zum anderen ein glatter Übergang (wie eine Sinusfunktion, Abb. unten). Dabei wird auch die Rotation der Spindel bei 2000 U/min berücksichtigt.

Zusätzlich ist es wichtig zu erwähnen, dass die nichtlinearen Lagerbedingungen der Spindel in der modalen Zeitintegration verwendet werden können.

• **Komplexe Eigenwertanalyse:**

Die Wirkung der Systemdämpfung (wie in den Führungen und im Spindellager) sowie die dämpfende Wirkung der Regelung auf die Verlagerung der Eigenfrequenzen kann mit der komplexen Eigenwertanalyse ermittelt werden (unter Berücksichtigung der Kreiseffekte). Damit ist auch eine Stabilitätsbetrachtung des Reglers möglich.

• **Stabilitätsanalyse des Prozesses:**

Für die Entwicklung einer Werkzeugmaschine ist es besonders wichtig, schon früh eine Aussage über auftretende Instabilitäten machen zu können. Es ist das Ziel der Entwicklung, eine Maschine zu bekommen, die stabil mit hoher Genauigkeit bei hoher Geschwindigkeit arbeitet. Die Quelle von Instabilitäten liegt in der Interaktion zwischen Werkzeug und Werkstück, wobei die Energie der selbsterregten Schwingungen aus der rotierenden Spindel kommt.

Um den nichtlinearen Drehprozess berechenbar zu machen, wurde ein Schnittkraftmodell entwickelt. Dieses hängt von der Schnittgeschwindigkeit, der Schnitttiefe und der Zustellung pro Umdrehung ab. Das Schnittkraftmodell erfordert eine Reihe von Koeffizienten, die sich auf die Kombination eines bestimmten Werkzeugs mit einem bestimmten Material des Werkstücks beziehen. Diese Koeffizienten müssen über einige Experimente mit dieser Kombination ermittelt und kalibriert werden.

Damit können eine Stabilitätskarte erstellt und die zugehörigen Ratterfrequenzen ermittelt werden (siehe Abb. 38). Dabei kann ein besonders wichtiger Effekt der Spindeldrehung beobachtet werden. Die Stabilität hängt von der Drehrichtung der Spindel ab. Hier erlaubt die Links-Drehung (gegen den Uhrzeigersinn) höhere Schnitttiefen als die Rechts-Drehung (im Uhrzeigersinn) der Spindel.

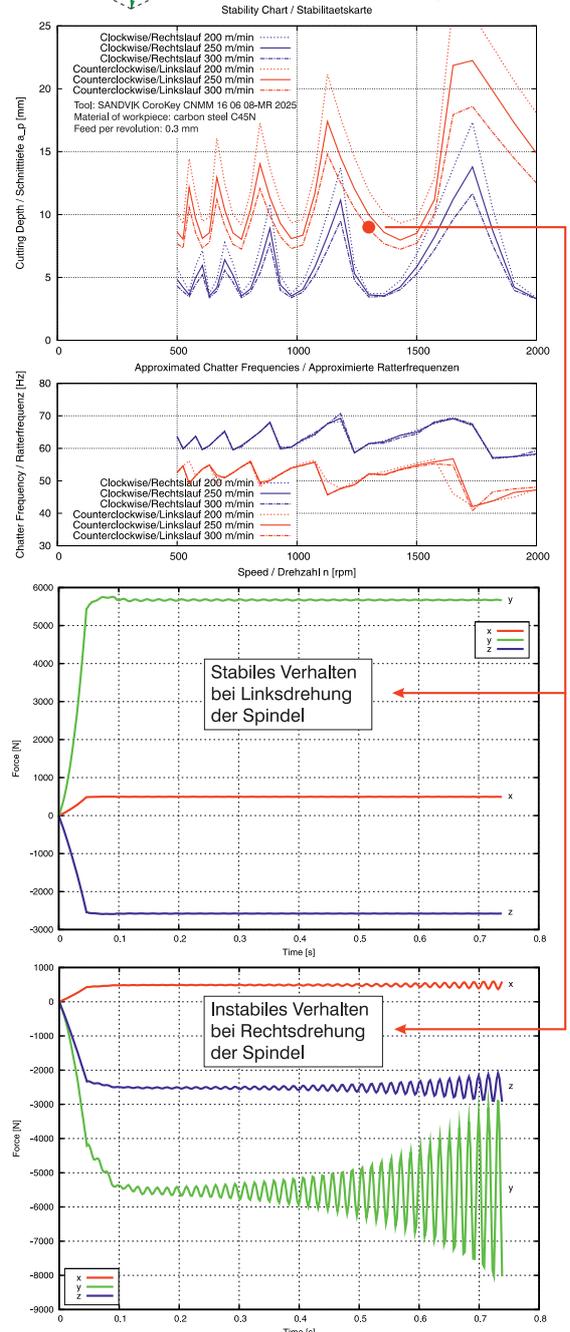
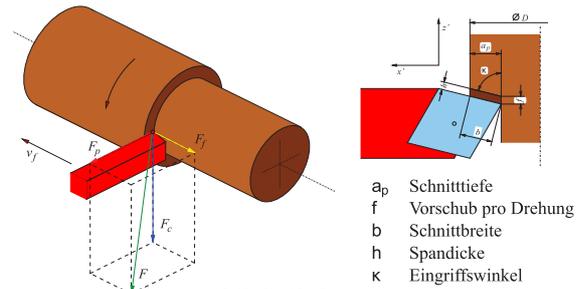


Abbildung 38: Stabilitätskarte fürs Längsdrehen mit stabilem und instabilem Verhalten bei Links- bzw. Rechtslauf.

Abb. 38 zeigt auch die Ergebnisse einer Zeitintegration für einen Arbeitspunkt (siehe den roten Punkt bei 1300 U/min), der ein stabiles Verhalten bei Linksdrehung und ein instabiles Verhalten bei Rechtsdrehung aufweist.

Einige Anwendungsbeispiele für den Einsatz der Optimierung können noch ergänzt werden:

- Die Topologie-Optimierung kann verwendet werden, um leichtere Werkzeugmaschinen zu erhalten. Dabei können Regler und weitere dynamische Bedingungen berücksichtigt werden (wie Eigenfrequenzen, Frequenzgang).
- Formoptimierung, um die richtigen Aufstandspunkte der Maschine zu ermitteln.
- Optimierung der Reglerparameter, um Eigenfrequenzen zu verschieben und den Frequenzgang zu verbessern.

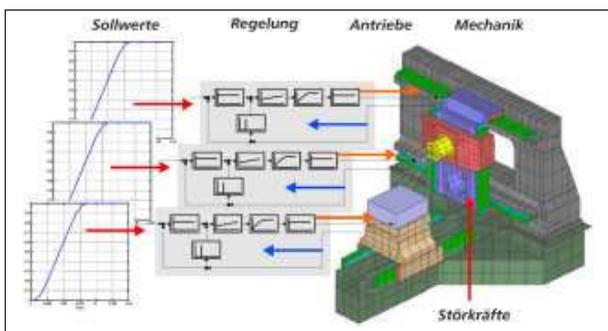


Abbildung 39: Schema der gekoppelten Analyse mit Regelung

Aktiv geregelte Systeme

In der Vergangenheit wurde die Auslegung von Maschinenstrukturen und Regelung getrennt durchgeführt. Bedingt durch die wesentlich höhere Dynamik der Antriebe kann diese Trennung nicht mehr aufrechterhalten werden, da beide Bereiche einer starken Kopplung unterliegen. Dadurch wird die gekoppelte Simulation von Strukturmechanik und Regelung zur notwendigen Voraussetzung für eine erfolgreiche Gesamtauslegung.

Leichtbaustrukturen zeigen häufig eine höhere Empfindlichkeit gegenüber Schwingungen. Dagegen kann z.B. eine aktive Dämpfung eingesetzt werden (siehe das Beispiel eines Laminat-Hohlkastens in Abb. 40). Eine dynamische Analyse mit aktiver Dämpfung erbringt viele wertvolle Infor-

mationen für den Leichtbauentwurf, wie die erforderlichen Dämpfungskräfte oder die dabei benötigte Leistung.

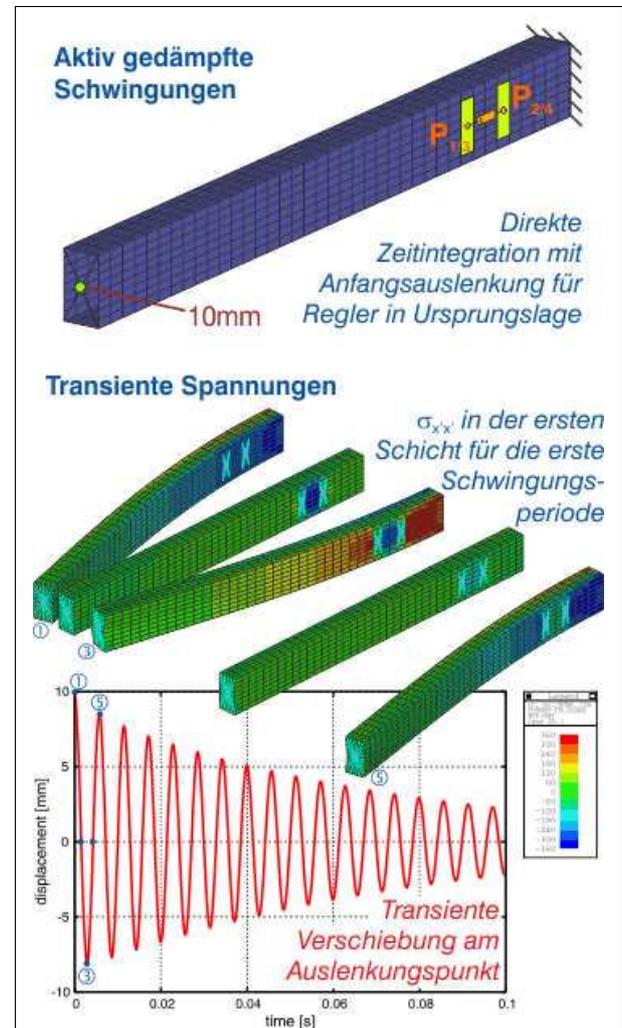


Abbildung 40: Aktive Dämpfung eines Laminat-Hohlkastens

Für die Berechnung aktiv geregelter Strukturen bestehen folgende Möglichkeiten:

- Lineare **Regelemente**:

- PID-Regler,
- Verschiedene Kaskadenregler.

Diese Regelemente verbinden einen dynamischen Schwingungszustand (abgegriffen am Sensor) über klassische lineare Regelparameter mit einer Antriebskraft.

Lineare Regelemente werden wie andere Elemente auch behandelt, d.h. sie sind über ihre Topologie (Knoten und Koordinaten) und ihre Eigenschaften definiert. Natürlich können beliebig viele Regelemente in einem Modell verwendet werden.

Ein zusätzliches Regelement mit acht Knoten steht als programmierbares Element zur Verfügung, wobei der Anwender die Elementsteifigkeit und die viskose Dämpfungsmatrix über ein Unterprogramm spezifiziert.

- Lösungsverfahren:
 - Lineare Regelemente können allein in dynamischen Analysen verwendet werden, wobei insbesondere folgende Verfahren in Betracht kommen:
 - Direkte Antwortverfahren im Zeit- und Frequenzbereich.
 - Modale Antwortverfahren im Zeit- und Frequenzbereich, wobei die modale Basis durch statische Verschiebungsformen erweitert wird, welche die regler-internen Zustandsvariablen abbilden.
 - Komplexe Eigenwertanalyse zur Bewertung der Wirkung von Reglerelementen auf die Dynamik des Systems.
- Zusätzliche statische Verschiebungsformen:
 Neben der Einbeziehung von regler-internen Zuständen können statische Verschiebungsformen auch dazu verwendet werden, die Genauigkeit der Ergebnisse einer modalen Antwortberechnung zu verbessern (siehe Seite 102).

oder modalen Zeitintegration.

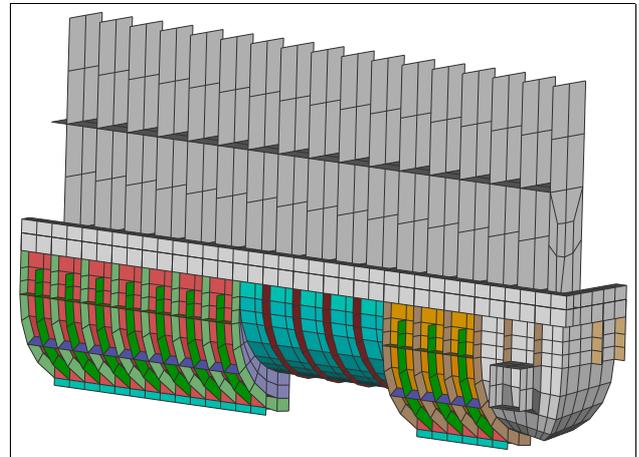


Abbildung 42: Optimierung eines Wasserkastens mit 18 Entwurfsvariablen und 19 stochastischen Basisvariablen

		Basis	Optimiert	Einschritt
Masse:	M	$4.09 \cdot 10^{-4}$	$3.15 \cdot 10^{-4}$	$3.21 \cdot 10^{-4}$
Versagenswahrscheinlichkeit:	P_f	$4.78 \cdot 10^{-6}$	$6.80 \cdot 10^{-3}$	$1.55 \cdot 10^{-6}$
Ausfallrate (eines von):		209205	147	645161

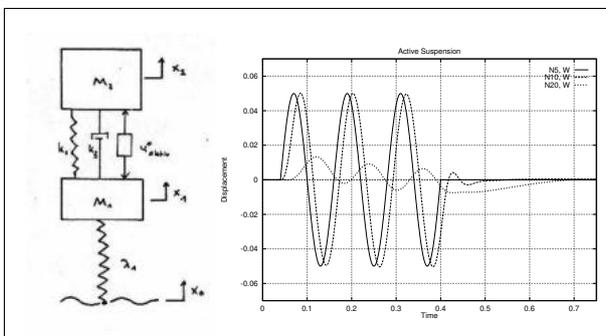


Abbildung 41: Gesteuerter Kraftgeber

u_{aktiv}^* zwischen Rad M1 und Aufbau M2 als Funktion $f(x_0, x_1, x_2, \dot{x}_1, \dot{x}_2)$ mit harmonischer Fußpunktanregung. Der Aufbau zeigt keine Amplitudenerhöhung.

- Nichtlineare Regelemente:
 Zusätzlich können nichtlineare Regelemente verwendet werden, die eine allgemeine Funktion erlauben, um die Abhängigkeit der Reglerkraft vom Schwingungszustand des Modells zu beschreiben (z.B. als FORTRAN- oder C-Subroutine). Wegen der Nichtlinearitäten können diese Elemente ausschließlich im Zeitbereich verwendet werden, d.h. in einer direkten

Robustes Optimum

Um einen *robusten Entwurf* zu bekommen, genügt es nicht, nur eine einfache Optimierung durchzuführen:

- Optimierung führt oftmals zu reduzierten Sicherheit margins.
- Der optimierte Entwurf kann andere kritische Parameter haben als der Ausgangsentwurf.
- Ein „zuverlässiges“ Optimum kann sich von einem deterministischen unterscheiden.

Die vorgeschlagene Lösung besteht in einer Kombination von Optimierung und Zuverlässigkeitsanalyse. Für diese Kombination gibt es zwei verschiedene Vorgehensweisen:

- **Zweischrittverfahren**
 - Ausgangszustand
 - * FE-Analyse (z.B. Statik),
 - * Zuverlässigkeitsanalyse.
 - Optimierung unter Berücksichtigung der Zuverlässigkeit
 - * Optimierung,

- * Zuverlässigkeitsanalyse des optimierten Zustands,
- * Wenn nicht befriedigend:
 - Änderung des Designmodells auf Grund der Zuverlässigkeitsergebnisse,
 - Wiederholen von Optimierung und Zuverlässigkeitsanalyse.
- **Einschrittverfahren**
 - Kombinierte Optimierungs- und Zuverlässigkeitsanalyse,
 - Zuverlässigkeit als Randbedingung in der Optimierung.

Für das Einschrittverfahren ist das Zusammenspiel von Entwurfsvariablen in der Optimierung und Basisvariablen in der Zuverlässigkeitsanalyse wie folgt:

- Entwurfsvariable
 - legen den Entwurfzustand fest,
 - können bei der Optimierung geändert werden,
 - können von einem der folgenden Typen sein:
 - * Deterministische Entwurfsvariable,
 - * Deterministischer Mittelwert einer stochastischen Entwurfsvariable.
- Basisvariable
 - Basisvariable definieren die stochastischen Eigenschaften des Problems,
 - Folgende Typen von Basisvariablen sind möglich:
 - * Stochastische Eigenschaften der Struktur,
 - * Stochastische Entwurfsvariable mit deterministischem Mittelwert,
 - * Lastfaktoren,
 - * Parameter der *Versagensfunktion*,
 - * Parameter einer anderen Basisvariable.

Beim Einschrittverfahren gehören zu jedem Entwurfsschritt zwei verschiedene Zustände:

- Entwurfzustand,
- Grenzzustand.

Für jeden Zustand ist eine FE-Analyse notwendig. Damit müssen in jedem Schritt während der Iteration mindestens zwei FE-Analysen durchgeführt werden.

Der Entwurfzustand ist der aktuelle Stand der Optimierung. Er ist gegeben durch:

- Aktuelle Werte der Entwurfsvariablen,
- Mittelwerte der Basisvariablen.

Die Zielfunktion wird für den Entwurfzustand ausgewertet. Die Randbedingungen der Optimierung werden für den Entwurfzustand überprüft. Der endgültige Entwurfzustand muss diese Randbedingungen erfüllen.



Abbildung 43: Optimierung PROTEUS Satellit mit 28 Entwurfsvariablen und 30 stochastischen Basisvariablen (Alcatel Space S.A.)

		Basis	Optimiert	Einschritt
Masse:	M	324.8	308.9	312.5
Maximale Spannung:	σ	$9.6 \cdot 10^7$	$1.2 \cdot 10^8$	$5.5 \cdot 10^6$
Versagenswahrscheinlichkeit:	P_f	$8.2 \cdot 10^{-7}$	$4.2 \cdot 10^{-5}$	$1.0 \cdot 10^{-6}$
Ausfallrate (eines von)		1.2 Mio	23809	1 Mio.

Der Grenzzustand beschreibt für einen gegebenen Entwurfzustand den zugehörigen Versagensfall. Er ist gegeben durch:

- Aktuelle Werte der Entwurfsvariablen,
- Aktuelle Werte der Basisvariablen.

Die Versagensfunktion wird für den Grenzzustand ausgewertet. Die Randbedingungen der Optimierung sind für den Grenzzustand bedeutungslos, i.a. sind die Grenzwerte für die Versagensfunktion und die Grenzwerte für die Optimierung unterschiedlich.

Die kombinierte Vorgehensweise liefert folgende Ergebnisse:

- **Endgültiger Entwurfzustand**
 - Wert der Zielfunktion,
 - Werte der Entwurfsvariablen,
 - Elastizitäten der Entwurfsvariablen bezüglich der Zielfunktion,
 - Versagenswahrscheinlichkeit,
 - Werte der aktiven Restriktionen.
- **Endgültiger Grenzzustand**
 - Werte der Basisvariablen,

- Parameterempfindlichkeit der Versagensfunktion.
- **Immer verfügbar:**
 - Ausgewählte Daten für jede Iteration.

Experimentelle Modal-Analyse

Für Strukturen unter dynamischer Belastung werden Simulationen und Experimente häufig nebeneinander eingesetzt. Dies kann zu beiderseitigem Nutzen führen. Zunächst erlaubt die Simulation, jene Strukturpunkte zu identifizieren, an denen vorzugsweise gemessen werden sollte. Mit den Ergebnissen der Messung können dann Unterschiede im Simulationsmodell gefunden werden, welche eine Anpassung des Modells an die getestete Struktur erlauben.

Ein wichtiger Vergleich zwischen experimenteller Modalanalyse (EMA) und dynamischer Eigenwertanalyse (PERMAS-Modul DEV) ist der zwischen den gemessenen und gerechneten Eigenfrequenzen und zwischen den gemessenen und gerechneten Eigenschwingungsformen. Während die Eigenfrequenzen direkt numerisch verglichen werden können, hat sich für den Vergleich der Eigenschwingungsformen die MAC-Matrix (MAC - Modal Assurance Criterion) etabliert (siehe auch Seite). Dabei wird jede Schwingungsform des Experiments mit jeder Schwingungsform der Berechnung verglichen und umgekehrt. Die Werte der MAC-Matrix liegen zwischen Null und Eins. Werte nahe Eins zeigen eine starke Ähnlichkeit der Schwingungsformen an, während kleine Werte verschiedene Schwingungsformen anzeigen.

PERMAS kann zunächst das Modell und die Ergebnisse des Experiments (über einen Universal-File) einlesen und anschließend mit den berechneten Schwingungsformen direkt die MAC-Matrix ermitteln und ausgeben.

Abb. 44 zeigt ein Beispiel, das uns dankenswerter Weise von Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Bienert von der Technischen Hochschule Ingolstadt zur Verfügung gestellt wurde. Er hatte die Versuchsergebnisse für die Leiterraumstruktur ermittelt, während die Berechnung und der Vergleich von INTES durchgeführt wurde. Die Messpunkte stimmten dabei nicht mit Knotenpunkten des FEM-Modells überein. Des-

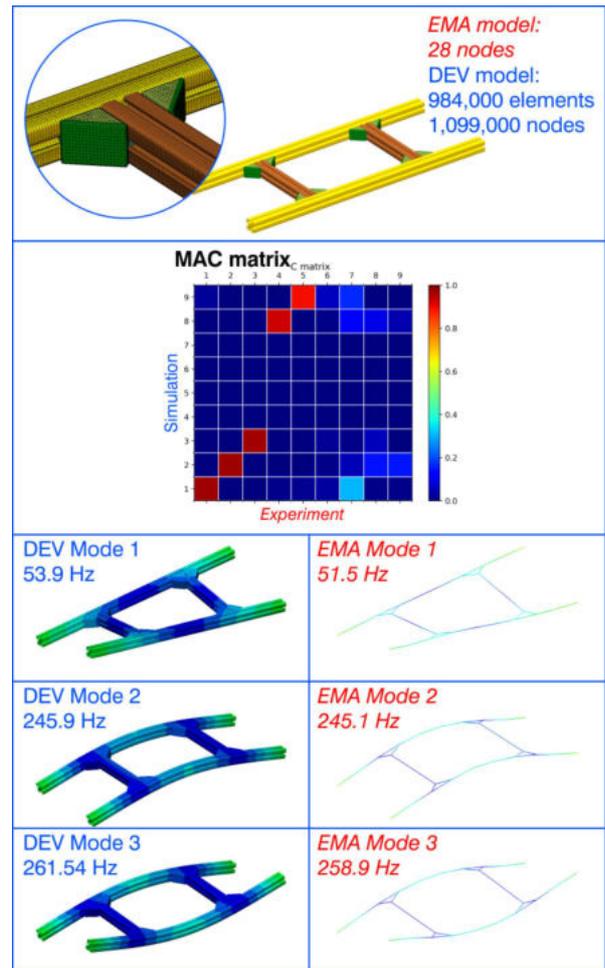


Abbildung 44: Beispiel für EMA
 Ein Leiterraum mit gemessenen und gerechneten Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen. Die MAC-Matrix zeigt eine gute Korrelation für fünf Eigenformen.

halb werden Interpolationsgebiete verwendet, um die Messpunkte mit den benachbarten Knoten des FEM-Modells zu verbinden. Dadurch stehen an den Messpunkten sowohl die Mess- als auch die Berechnungsergebnisse zur Verfügung und die beiden Ergebnissätze lassen sich unmittelbar miteinander vergleichen und die entsprechende MAC-Matrix erstellen.

Für die ersten drei Moden sind die gemessenen und berechneten Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen dargestellt. Aus der MAC-Matrix ist für die höheren Moden vier bis sieben zu erkennen, dass diese nicht im Experiment festgestellt wurden. Dort wurden eindimensionale Sensoren verwendet, welche die Schwingungen normal zum Leiterraum messen können. Die berechneten Moden vier

bis sieben sind aber Moden in der Ebene des Leiterrahmens und daher für die Sensoren nicht sichtbar.

Weitere Informationen zur Berechnung von dynamischen Eigenwerten findet man auf Seite 96.

VisPER



Abbildung 45: Das Logo von VisPER

Zur Vorgeschichte von VisPER

PERMAS als Software für numerische Berechnungen hält viele Funktionalitäten bereit, die durch die allgemein verfügbaren Preprozessoren nicht ausreichend unterstützt werden. Deshalb haben die PERMAS-Entwickler seit Jahren nach einer grafischen Benutzerschnittstelle (*GUI*) gesucht, welche PERMAS so gut wie möglich unterstützt und die Modellbeschreibung effektiver gestaltet.

Die initiale Version der neuen grafischen Benutzeroberfläche VisPER (Visual PERMAS) wurde auf der PERMAS-Anwendertagung in Stuttgart Anfang April 2008 angekündigt. Die aktuelle Version ist VisPER Version 19, welche zeitgleich mit PERMAS Version 19 verfügbar ist.

VisPER – Eine kurze Einführung

VisPER (Visual PERMAS) ist ein grafisch basierter Modell-Editor. Er wird verwendet, um PERMAS-Modelle für spezifische Anwendungen zu vervollständigen. Damit schließt VisPER die Lücke zwischen FE-Modellen, wie Sie von verschiedenen Vernetzern erstellt werden, und lauffähigen PERMAS-Modellen (see Abb. 46).

VisPER kann auch als Postprozessor für PERMAS verwendet werden. Vor allem solche Funktionen können auch ausgewertet werden, für die VisPER auch als Modell-Editor einsetzbar ist.

Um das Potential eines erweiterten Modell-Editors aufzuzeigen, unterstützt VisPER eine Reihe spezieller Anwendungsfälle:

- Berechnung des Bremsenquietschens,

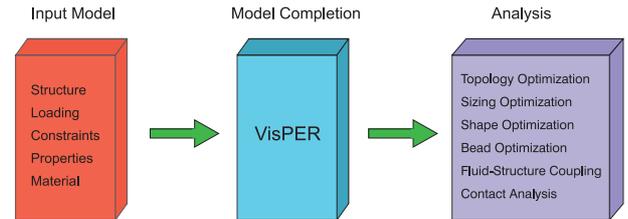


Abbildung 46: VisPER als Modell-Editor

- Bauteiltausch,
- Entwurf durch Simulation,
- Topologie-Optimierung,
- Dimensionsoptimierung,
- Formoptimierung (mit Freiformoptimierung),
- Sicken generierung,
- Sampling,
- Fluid-Struktur-Kopplung,
- Kontaktanalyse (mit Schraubenvorspannung),
- Pressverbindungen.

Die Anwendung von VisPER empfiehlt sich, wenn

- ein FE-Modell für eine vom Modell-Editor unterstützte Anwendung ergänzt werden soll und ein Netz bereits vorhanden ist,
- ein bestehendes FE-Modell überprüft werden soll (z.B. Lasten und Randbedingungen),
- ein Teilstruktur-Modell generiert und verifiziert werden soll,
- Ergebnisse einer FE-Berechnung mit PERMAS ausgewertet werden sollen.

Mit VisPER sind eine ganze Reihe von Vorteilen verbunden:

- VisPER stellt einen einfachen und schnellen Weg bereit, Modelle zu vervollständigen.
- Modelle werden vervollständigt in einer Weise, welche die logische Struktur der PERMAS-Eingabe abbildet. Das ermöglicht eine zuverlässige und syntaktisch fehlerfreie Beschreibung der zu ergänzenden Modellteile und verkürzt den Weg zu einem korrekten Modell.
- Die Möglichkeit, Operationsfolgen aufzuzeichnen, und die Verfügbarkeit einer integrierten Skriptsprache (*Python*) machen VisPER in hohem Maße an Kundenanforderungen anpassbar.
- Die in VisPER neu erzeugten Modelldaten können separat exportiert werden und in PERMAS mit den bereits vorhandenen Modelldaten gemeinsam eingelesen und verwendet werden.
- VisPER benutzt die PERMAS-Datenstrukturen

und -Leseroutinen. Damit sind Modelle in beiden Programmen gleich, ohne Übersetzung und ohne Interpretation.

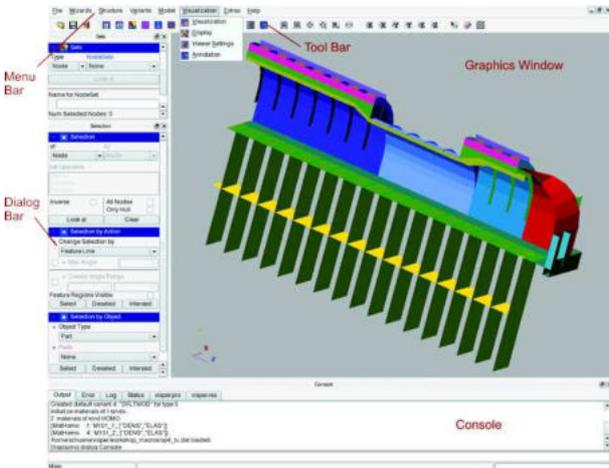


Abbildung 47: Hauptfenster von VisPER

Die Abb. 47 zeigt das Hauptfenster von VisPER. Jede Funktion ist über Pulldown-Menüs erreichbar. Tastaturbefehle stehen für viele Funktionen zur Verfügung, die jederzeit geändert oder erweitert werden können. Die Werkzeugleiste ermöglicht den schnellen Zugriff auf häufig verwendete Funktionen. Kommandoleisten ermöglichen den Aufruf einer Reihe von Befehlen zu ausgewählten Datenelementen. Das Bedienfeld zeigt die Reaktionen von VisPER auf die Eingaben des Benutzers (wie Kommentare oder Fehlermeldungen). Das Bedienfeld und Kommandoleisten können ausgeblendet werden, um das Grafikenfenster zu vergrößern. Zusätzlich können Sie aus dem Grafikenfenster herausgezogen werden, um sie ständig sichtbar zu halten.

VisPER-BAS – Basismodul

Dieses Modul umfasst die VisPER-Infrastruktur, die grafische Benutzerschnittstelle und alle Basisfunktionen für das Pre- und Postprocessing.

Die Infrastruktur umfasst:

- die Konfiguration von VisPER bezüglich Standort und Benutzer sowie der Integration benutzer-eigener Dokumentation (wie *Tooltips*),
- Import und Export von Dateien (wie für Modell-daten und Ergebnisse),
- die Erzeugung und Verwendung von Makros,

- die Erzeugung und Verwendung von Dateien zur PERMAS-Ablaufsteuerung (d.i. UCI).

File	Wizards	Structure	Variants	Model	Geometry	Visualization	Extras	Additional	Help
Open	Add-& Replace	Selection	Constraints	Config.	Geom-Display	Results-&Data	Console	Check-Mesh	About
Import	Brake	Contlock	Loading	Functions	Geom-Meshing	Annotations	Snapshots	Fix-Mesh	What's This
Open Macro	Design	El. Quality	Modification	Materials	Check-Mesh	Clip-planes	Videos		
PY									
Export	Contact	Elements	Results	Messages	Tet-Meshing	Display	Edit Macro		Manual
Save	Pressfit	EISystems	System	Measurements	Patch-Meshing	Face Normals	Recorder		Shortcuts
	SyncDMS	PretensionLines	Create New	Information		Show/Hide	Abaqus El. Report		
Create	FS	MPCs	Parameters	Relabel		Viewer Settings	Customize		
UCI									
Exit	Free-shape	Nodes		Search For					
	Shape	Parts							
	Sizing	Reference Systems							
	Topo	Rotated Bases							
	Sampling	Sets							
	Sub-structure	Subcomp.							
		Surfaces							

Abbildung 48: VisPER-Menü mit allen Einstiegspunkten.

Die grafische Benutzerschnittstelle umfasst:

- die Menü-Elemente wie Menüleiste, Werkzeugleiste, Dialogleiste, Wizards, Eingabefeld und Informationsfeld,
- die Festlegung von Farben, die Animation über Schieberegler und die Auswahl von Schriftarten,
- die Steuerung der Maus, von SpaceMouse, Auswahl von Ansichten und Kameraeinstellungen,
- die interaktive Verwendung der Maus,
- die Abstandsmessung zwischen Knoten und Elementen,
- die Festlegung und Verwendung von Tastaturbefehlen.

Fig. 48 zeigt alle Haupteinstiegspunkte ins VisPER-Menü. Dies gibt einen guten Überblick über die für PERMAS unterstützten Funktionen und Modelldefinitionen.

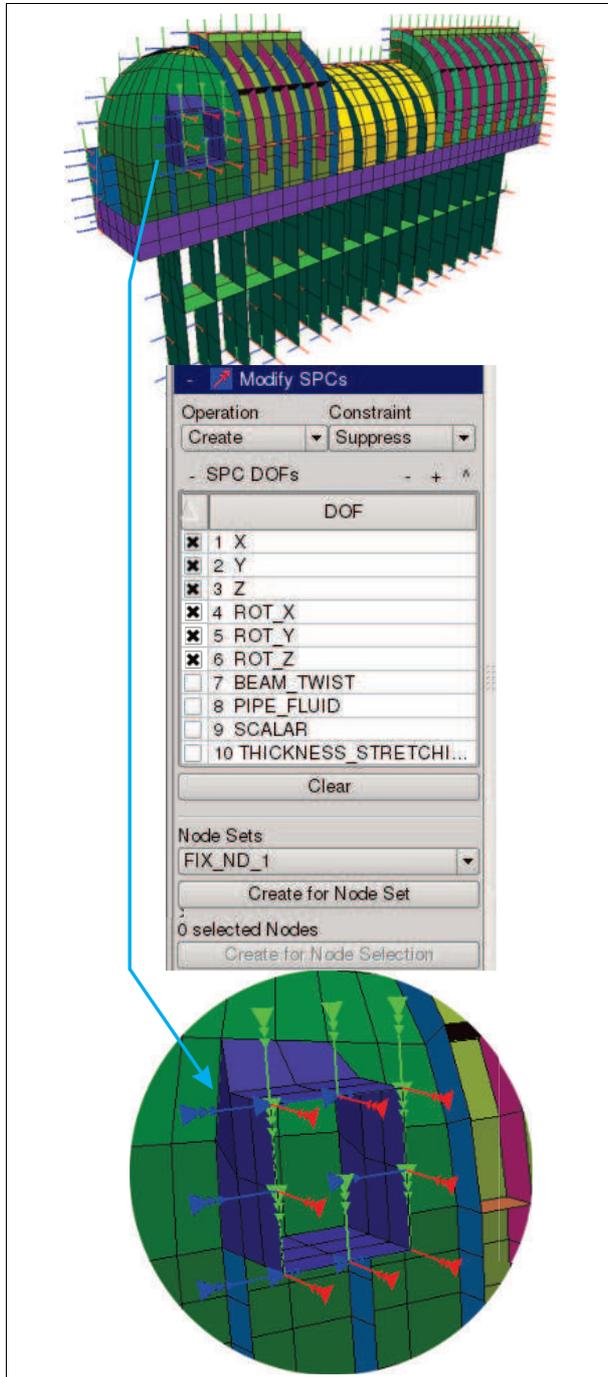


Abbildung 49: Kinematische Randbedingungen an Knoten

Die folgenden Wizards sind Teil des Basismoduls:

- Add&Replace Wizard,
- Brake Squeal Wizard,
- Design Wizard,

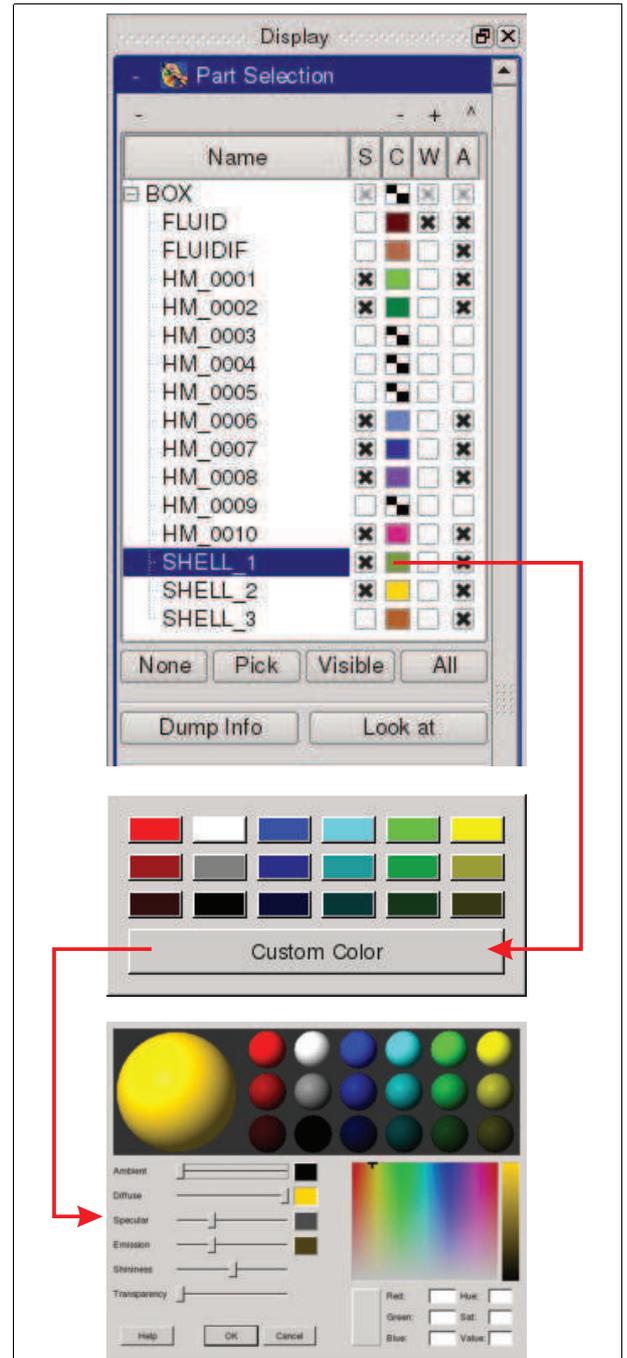


Abbildung 50: Grafikeigenschaften von Parts und Elementgruppen (wähle S=Sichtbar, C=Farbe, W=Gitter, A=Aktiv).

- Pressfit Wizard,
- Sampling Wizard.

Im weiteren werden diese Wizards im einzelnen erläutert:

Der *Add&Replace Wizard* unterstützt die folgenden zwei Operationen:

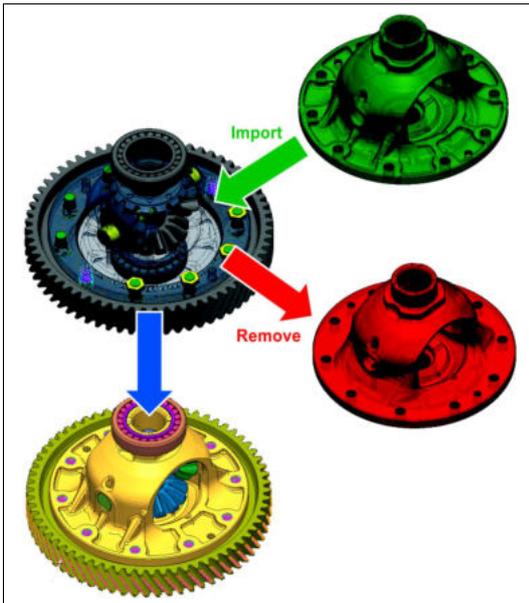


Abbildung 51: Ersetzen eines Modellteils

- Hinzufügen eines neuen Teils zu einem bestehenden Modell:
 - Automatisches Umnummern von mehrfachen Knoten- und Elementnummern,
 - Optionale Positionierung, um falsche Position oder Ausrichtung sowie einen unterschiedlichen Koordinatenursprung zu korrigieren,
 - Herstellen der Verbindungen zwischen bestehendem Modell und dem neuen Teil, wie MPC, Kontakt, Vorspannung, Pressverbindung, etc..
- Austauschen eines bestehenden Modellteils durch einen neuen (siehe Abb. 51):
 - Wiederverwendung bestehender Verbindungen und Sets,
 - Anpassen der Oberflächen an die neue Geometrie,
 - Umnummern von Knoten- und Elementnummern,
 - Gleichzeitiges Verwalten von altem und neuem Teil,
 - Erhaltung eines regelkonformen Modells.

Der *Brake Squeal Wizard* für die Vorbereitung einer Berechnung des Bremsenquietschens erlaubt die einfache Beschreibung solcher komplexen Modelle gemäß der verfügbaren PERMAS-Technologie. (siehe Abb. 52). Die wichtigsten Funktionen des Wizards für eine Standardisierung solcher Modelle und die Erreichung der Prozessstabilität sind:

- Schnelle Vorbereitung einer Bremsenberechnung,

- Geführte Beschreibung dynamischer Eigenschaften des Modells,
- Überprüfung der dynamischen Eigenschaften des Modells und Ihrer Verträglichkeit,
- Erzeugung einer UCI-Datei zur Steuerung der Bremsenberechnung.

Der *Design Wizard* unterstützt einen simulationsgetriebenen Entwurf (siehe Abb. 60) durch Generieren und Glätten der Hülle des Ergebnisses einer Topologie-Optimierung, Reparieren des Netzes auf der Hülle, Hinzufügen und Prüfen von Herstell-Randbedingungen sowie das Generieren eines TET-Netzes innerhalb der Hülle:

- Topologie-Optimierung hat ein großes Potential neue Design-Ideen zu erhalten,
- Dafür ist die klare Trennung von Bereichen mit und ohne Material essentiell, um einen automatisierten Prozess zur Geometrieauswahl zu erhalten,
- Für den gefundenen Entwurf müssen zusätzliche Anforderungen erfüllt werden (z.B. durch eine Formoptimierung),
- Daher muss der Simulationsprozess so aufgesetzt werden, dass alle Anforderungen bestmöglich erfüllt werden,
- Die Simulationskette überbrückt die Lücke zwischen Topologie- und Formoptimierung,
- Das Ziel ist der digitale Prototyp, der eine leistungsorientierte Entwurfsentscheidung ermöglicht.

Der *Sampling Wizard* unterstützt die Eingabe für eine Berechnung mit Sampling durch Vorbereiten der Sampling-Situation, Zuweisung der ausgewählten Variablen, Festlegung des Wertebereichs der Variablen sowie Angabe des Ergebnisses, das für die Variablen ausgewertet werden soll (siehe auch Seite 77).

Der *Pressfit Wizard* unterstützt die Eingabe für eine Pressverbindung durch Auswahl der Verbindungspartner, Beschreibung der zugehörigen Parameter und Lasten sowie die Beschreibung einer Lastgeschichte, falls nötig.

Ein *RBM-Assistent* (Rigid-Body-Mode Assistent) stellt einen effizienten Prozess zur Erzeugung geeigneter elastischer Lagerungen für Statikmodelle zur Verfügung. Insbesondere können damit bequem die Kompensationsfedern für Kontaktmodelle gene-

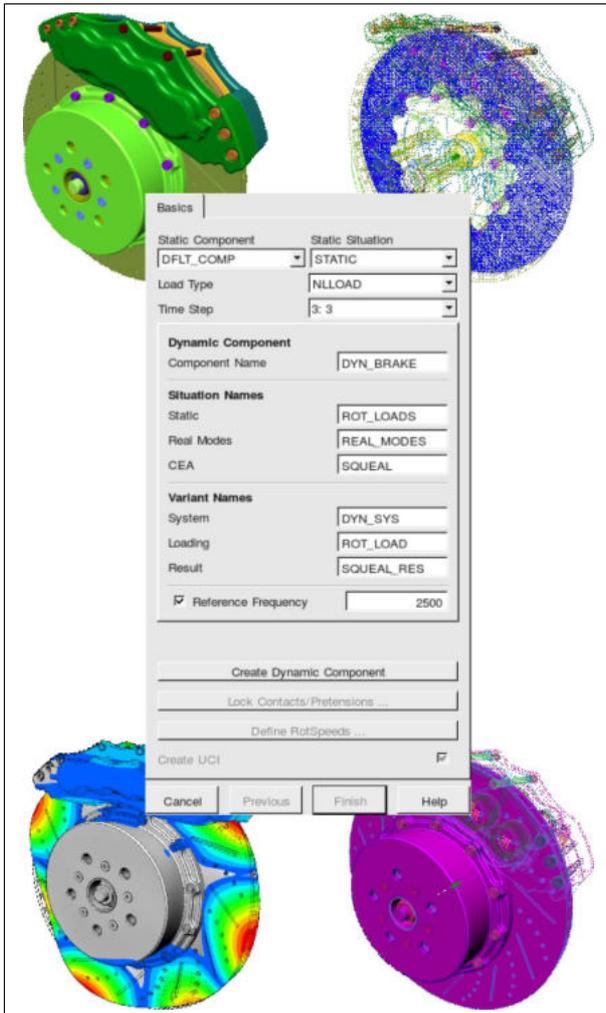


Abbildung 52: Preprozessing von Bremsenmodellen

riert werden (siehe Seite 81).

VisPER stellt eine Reihe von Werkzeugen zur Verfügung, um die Zusammenarbeit mit PERMAS zu unterstützen, z.B.:

- Die Diagnosemeldungen von PERMAS in der Protokoll-Datei können in VisPER mit Hilfe eines speziellen Dialogs (sog. *Message Tree*) ausgewertet und die betroffenen Modellteile direkt angezeigt werden.
- Informationen zum Modell können als Baum für alle eingelesenen Dateien dargestellt werden.
- VisPER kann so konfiguriert werden, dass ein Batchjob von PERMAS gestartet wird.
- Importierte Ergebnisse und das Modell fürs Postprozessing können auch aus VisPER heraus in anderen Formaten ausgegeben werden (wie MEDINA und HyperView).

VisPER stellt alle Funktionen für ein vollständiges

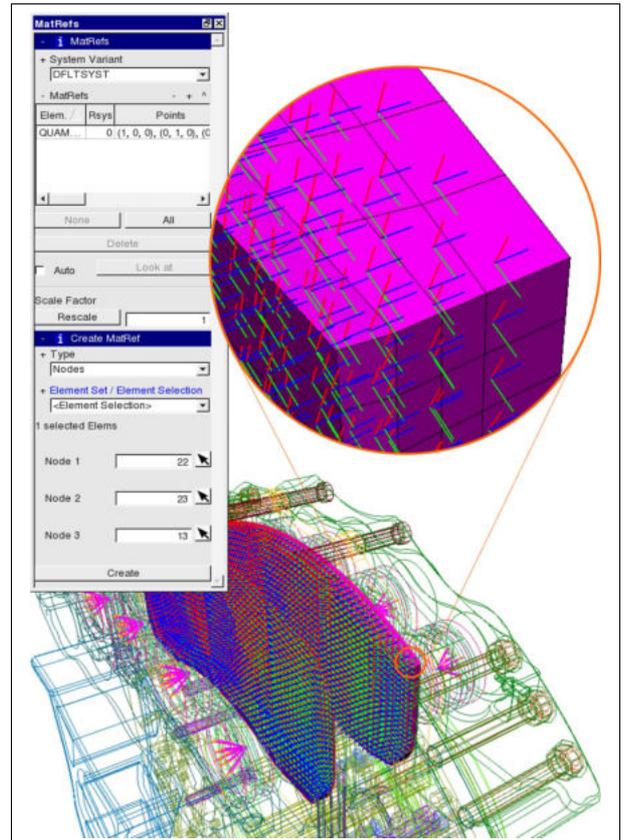


Abbildung 53: Material Bezugssystem für isotropes Material

Postprozessing zur Verfügung, z.B.:

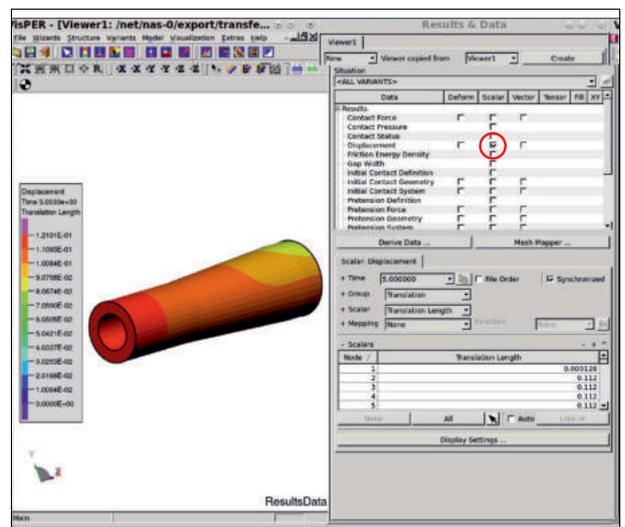


Abbildung 54: Postprozessing)

- Komplette Übersicht über alle verfügbaren Ergebnisse (siehe Abb. 54).
- Mehrfache Viewer, siehe Abb.55
- Direkte Auswahl der Ergebnisse aus der Übersicht für die Darstellung.

- Je nach Ergebnis können Verformungsergebnisse, skalare Ergebnisse (farbig auf der Oberfläche), Vektorergebnisse (Pfeillänge und -farbe), Tensorergebnisse (wie Spannungen), Füllungsgrade (z.B. aus einer Topologie-Optimierung) und XY-Daten dargestellt werden.
- Zusätzlich können einzelne Ergebnisspalten, einzelne Komponenten oder Komponentengruppen (wie Translation oder Rotation) sowie ein Mapping über eine definierte Funktion (wie LOG oder ABS) ausgewählt werden.
- Eine Vielzahl von arithmetischen Operationen auf Ergebnis-Kombinationen ist nun möglich (wie die Differenz von kinetischer Energiedichte und Dehnungsenergiedichte). Jede einzelne Spalte kann als Operand verwendet werden. Alle Funktionen mit übereinstimmender Anzahl von Eingabedaten können ebenso verwendet werden (wie die Logarithmusfunktion zur Auswertung von Schallpegeln).
- Die Visualisierung von Tensoren und Hauptspannungskomponenten wird entsprechend der Werte eingefärbt.
- Betrachtungswinkel und -richtung sowie Auswahl von Bauteilen oder Ausschnitte können definiert werden.
- Wahlweise kann die Darstellung mit oder ohne Legende erfolgen, wobei die Zuordnung von Farbe und Wert sowie die Größe und Position der Legende angepasst werden kann.
- Ansichten können als Bilder gespeichert werden, und Animationen können erzeugt und als GIF oder Video gespeichert werden.
- Einzelne Ergebniswerte (z.B. an Knoten oder Elementen) können über Annotationen in die Auswertung eingebunden werden.
- Schnittflächen können definiert werden und erlauben eine Sicht in das Innere eines Modells.

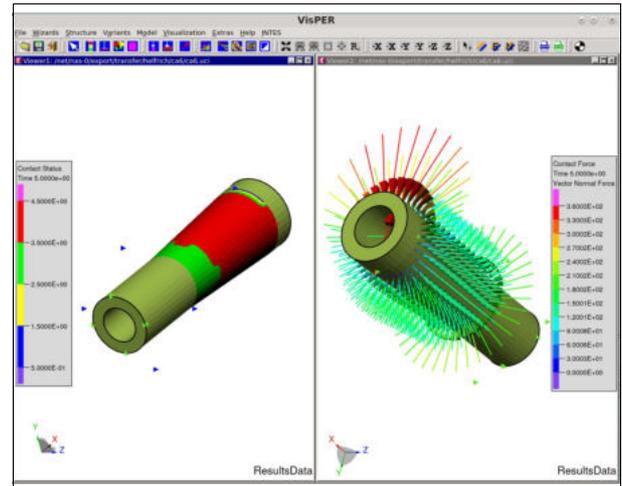


Abbildung 55: Mehrere Ansichten (Viewers)

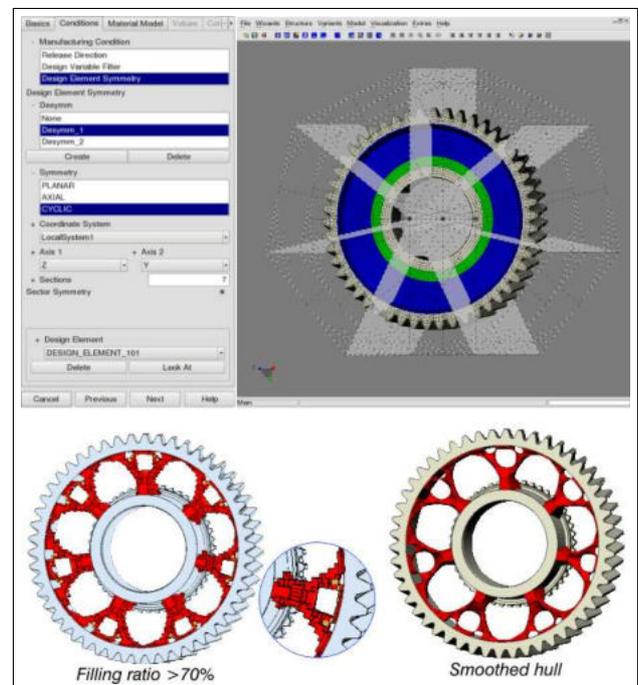


Abbildung 56: Topologie-Opt. eines Zahnrads
 Zyklische Symmetrie und Auszugsrichtungen, max. Spannung am Übergang zum Zahnkranz, Gewichtsreduktion und minimale Nachgiebigkeit als Zielfunktion (mit freundlicher Genehmigung der Daimler AG, Stuttgart).

VisPER-TOP – Topologie-Optimierung

Dieses Modul stellt einen Assistenten (*Wizard*) für die Erstellung eines Modells zur Topologie-Optimierung bereit. Weitere Details zur Topologie-Optimierung sind auf Seite 112 zu finden.

Der Assistent führt den Anwender durch die folgenden Schritte der Modellierung:

1. Zunächst wird der Entwurfsraum festgelegt und die zugehörigen Entwurfs-elemente spezifiziert. Für den Füllungsgrad können zusätzliche Bedingungen zum Anfangswert, zu Unter- und Obergrenzen sowie zur Änderungsbegrenzung spezifiziert werden.
2. Bedingungen des Herstellprozesses (*Herstell-*

randbedingungen) werden definiert, wie Ausformrichtungen, Symmetriebedingungen und Filter für minimale und maximale Wandstärken (als Beispiel siehe Abb. 56). Bei entgegengesetzten Ausformrichtungen kann eine *Teilungsebene* angegeben werden.

3. Zielfunktion und Nebenbedingungen werden abhängig von der Analyseart auf der Basis von Ergebniswerten definiert (wie Nachgiebigkeit, Gewicht, Verschiebung, Eigenfrequenz).

Zusätzlich können die Ergebnisse der Topologie-Optimierung mit VisPER auch ausgewertet werden. Vor allem kann die *Hüllengenerierung* mit *Glättung* und *Polygon-Reduktion* interaktiv durchgeführt werden, um einen passenden Entwurf zu erhalten. Die geglättete Hülle kann anschließend exportiert werden. Auf Seite 115 sind nähere Informationen dazu zu finden. Abb. 56 zeigt die geglättete Hülle einer optimierten Zahnradscheibe.

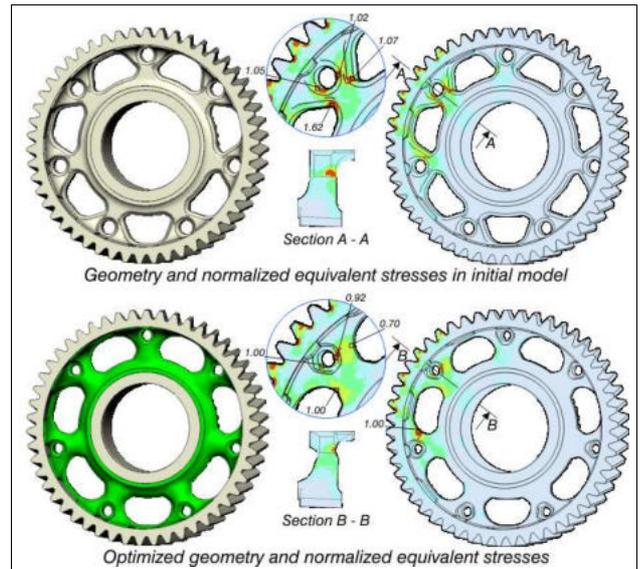


Abbildung 57: Form-Optimierung eines Zahnrads
Zyklische Symmetrie, max. Spannung, minimales Gewicht als Zielfunktion (mit freundlicher Genehmigung der Daimler AG, Stuttgart).

VisPER-OPT – Entwurfsoptimierung

Dieses Modul bietet drei Assistenten (*Wizard*) zur Erstellung von Optimierungsmodellen für die Entwurfsoptimierung, einen für die parametrische Formoptimierung, einen für die Dimensionsoptimierung, und einen für die nichtparametrische Freiform-Optimierung. Details zur Entwurfsoptimierung sind auf Seite 108 zu finden.

Die Entwurfsoptimierung umfasst folgende Aufgabenstellungen:

- Dimensionierung zur Optimierung von Elementeneigenschaften (wie Querschnittsdaten oder Materialeigenschaften).
- Formoptimierung zur Änderung der Knotenkoordinaten über einen parametrischen Ansatz.
- Sicken-generierung, bei der für ein Schalenmodell geeignete Sicken erzeugt werden (durch Änderung von Knotenkoordinaten), um die gewünschten Versteifungseffekte zu erreichen.
- Freiform-Optimierung zur Änderung der Knotenkoordinaten über einen nicht-parametrischen Ansatz.

Für die *Dimensionsoptimierung* stellt ein Assistent folgende Schritte zur Erstellung des Optimierungsmodells zur Verfügung:

1. Zunächst werden die zu optimierenden Eigenschaften der Elemente global ausgewählt und mit Grenzen versehen, zwischen denen das Optimum gesucht wird. Diese Eigenschaften werden mit den Entwurfselemente verknüpft, welche über Elementsets beschrieben werden.
2. Festgelegt werden der Entwurfsraum und die zugehörigen Entwurfselemente.
3. Die zu optimierenden Elementeigenschaften können dann bei Bedarf auch noch lokal für jede Entwurfsvariable geändert werden.
4. Zielfunktion und Nebenbedingungen werden abhängig von den verwendeten Berechnungsarten auf den Ergebnisgrößen spezifiziert (wie auf Nachgiebigkeit, Gewicht, Verschiebung, Eigenfrequenz, Temperatur, Kontaktdruck).

Für die *Formoptimierung* und *Sickengenerierung* unterstützt ein weiterer Assistent die Optimierungsmodellierung in folgenden Schritten:

1. Zunächst werden Entwurfsraum und zugehörige Entwurfselemente beschrieben.
2. Dann werden die Bedingungen für die gewünschte Formänderung beschrieben, z.B. Symmetriebedingungen oder Anschlussbedingungen.
3. Die Entwurfsvariablen beschreiben die Änderungsmöglichkeiten der gegebenen Form und die zugehörigen *Form-Basisvektoren* (oder *Shape Basis Vectors, SBV*) werden durch Unter- und Obergrenzen, Anfangswerte und Änderungsschrittweiten näher spezifiziert. Die Form-Basisvektoren werden mit PERMAS ermittelt und können direkt visualisiert werden. Abb. 58 zeigt ein Beispiel für die Definition und Visualisierung von Form-Basisvektoren.
4. Zielfunktion und Nebenbedingungen werden abhängig von den verwendeten Berechnungsarten auf den Ergebnisgrößen spezifiziert (wie auf Nachgiebigkeit, Gewicht, Verschiebung, Eigenfrequenz, Temperatur, Kontaktdruck).

Ein Wizard für die *Freiform-Optimierung* ist verfügbar, um diese Funktion von PERMAS zu unterstützen (siehe Abb. 59).

Auch das Postprocessing der Ergebnisse einer Optimierung kann mit VisPER durchgeführt werden:

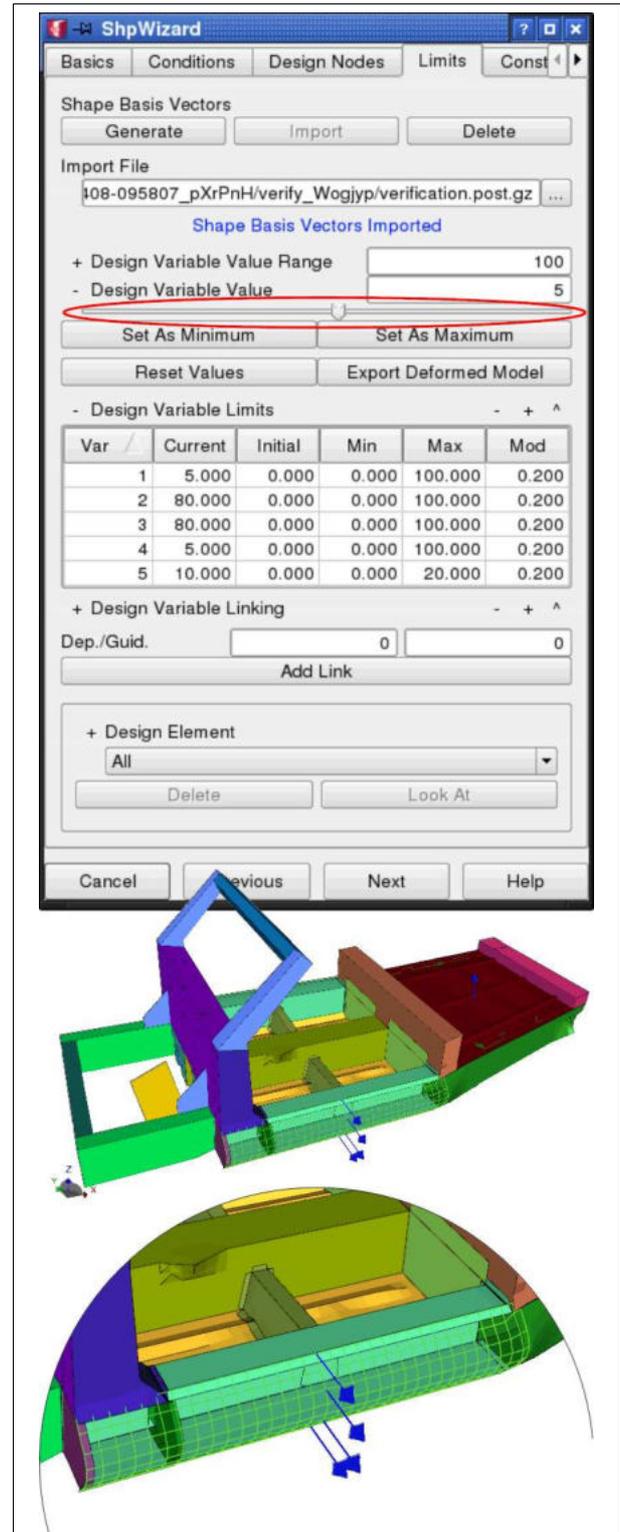


Abbildung 58: Definition von Shape-Basis-Vektoren für den Schweller eines Fahrzeugs. Die Formänderungen können durch die Bewegung des Schiebereglers sichtbar gemacht werden.

- Die verschiedenen Parameter des Optimierungsverlaufes stehen als xy-Daten für die Aus-

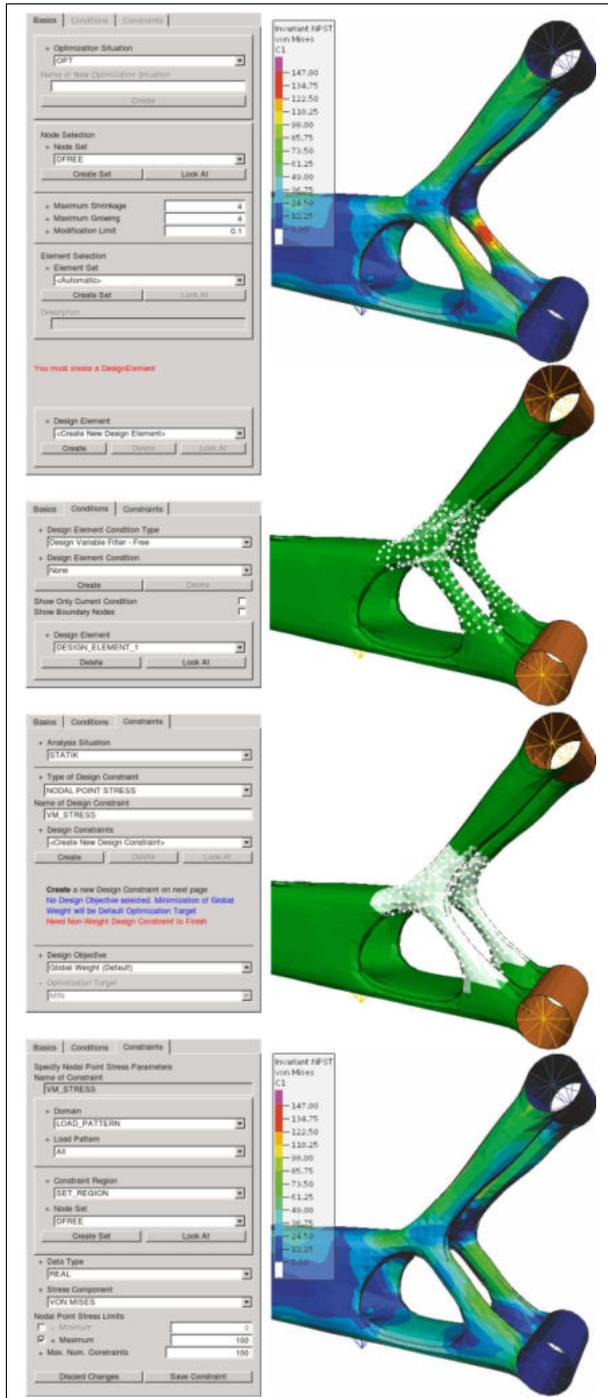


Abbildung 59: Pre- und Postprozessing für eine Freiform-Optimierung:

- Anfangsform mit zu hohen Spannungen
- Definition eines Knotensets auf der Oberfläche zur Angabe des Entwurfsbereiches
- Automatische Bestimmung des Entwurfsraums in Dickenrichtung
- Neue Form nach einer Freiform-Optimierung mit reduzierten Spannungen

wertung zur Verfügung, wie der Verlauf der Zielfunktion, der Nebenbedingungen, der Entwurfsvariablen und der maximalen Verletzung der Nebenbedingungen. Bei der Visualisierung der Verläufe erfolgt als direkter Bezug zwischen xy-Daten und Modell eine Hervorhebung der betroffenen Strukturbereiche. So werden z.B. bei der Darstellung von Verläufen der Entwicklung von Entwurfsvariablen während der Optimierung die entsprechenden Entwurfs-elemente markiert.

- Veränderte Schalendicken können ausgewertet werden.
- Formänderungen werden durch eine Darstellung der Struktur mit den neuen Koordinaten sichtbar gemacht.
- Eine *Hüllengenerierung* kann auch für die Ergebnisse einer Formoptimierung durchgeführt werden.

Design Wizard

Dieser Wizard spielt eine zentrale Rolle um den „*simulationsbasierten Entwurf*“ als Arbeitsablauf zu realisieren. Siehe Abbildung 60. Er stellt folgende Funktionen zur Verfügung:

- Erzeugung einer regulären Hülle nach einer Topologie- oder Formoptimierung
- Glättung und Neuvernetzung der Hülle für eine neue Bauteilvariante
- Prüfung von Herstellungsbedingungen, siehe Abb. 61
- Geometrieerzeugung für eine neue Berechnungsvariante oder Geometrie-Export nach CAD.

Dieser Prozeß erlaubt auch die Weiternutzung unveränderter Geometrie „*Hybride Geometrie*“

VisPER-FS – Fluid-Struktur-Kopplung

Dieses Modul stellt einen Assistenten (*Wizard*) zur Verfügung, um eine weitgehend automatische Erstellung von Fluid-Netzen in Hohlräumen zu erstellen, für die das umgebende Strukturmodell bereits vorliegt. Der Assistent unterstützt dabei die folgenden Schritte, wobei die Ziffern mit denen in Abb. 62 und 63 übereinstimmen:

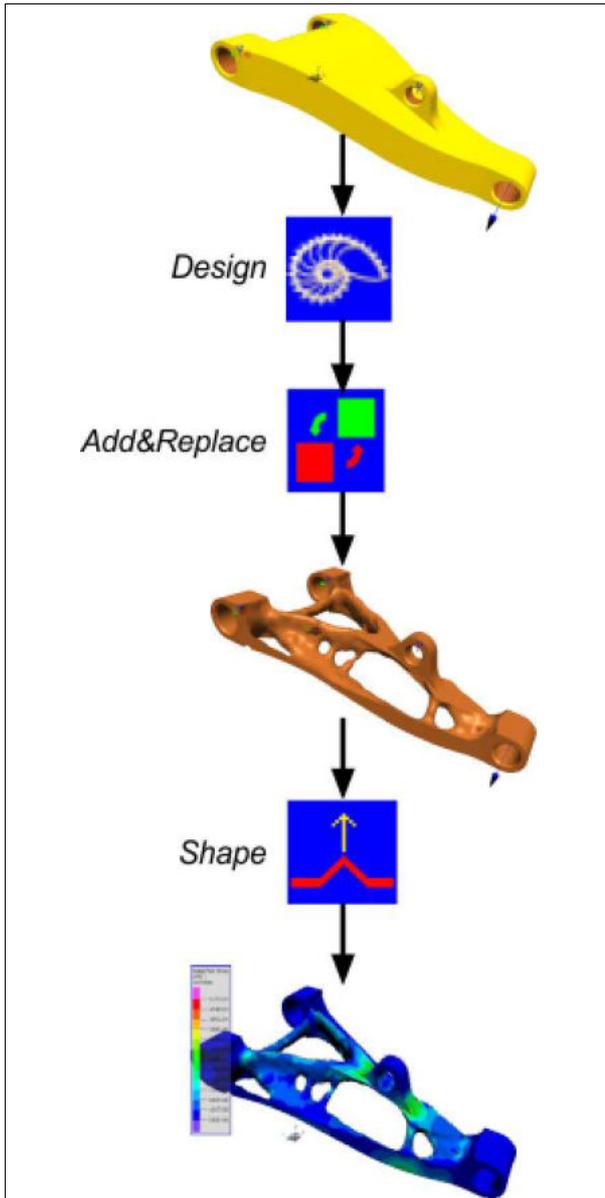


Abbildung 60: Ablauf im Design Wizard

1. Eine empfohlene Maschenweite für das Fluidnetz wird auf der Basis eines gegebenen Frequenzbereiches ermittelt.
2. Löcher im Strukturmodell werden automatisch gefunden, und zwar nur solche, welche größer sind als eine zuvor festgelegte Mindest-Maschenweite des Fluidnetzes (*Lochdetektion*).
3. In schwierigen topologischen Situationen können manche Löcher nicht automatisch gefunden werden. In solchen Fällen können die Löcher auch direkt angegeben werden.
4. Die Löcher werden dann vernetzt, und zwar mit Elementen, die keine Steifigkeit oder Masse ein-

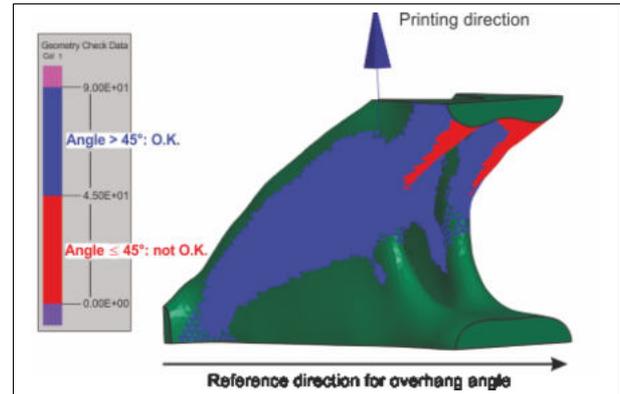


Abbildung 61: Prüfung des Überhangwinkels
rot: kritischer Winkel, blau: unkritisch, andere Farbe: kein Wert (d.h. >90°).

- tragen (wie Plotelemente). Sie werden nur benötigt, um der nachfolgenden Vernetzung des Hohlraums eine Begrenzung zu bieten.
5. Definition eines Saatpunktes, an dem die Vernetzung des Hohlraumes beginnt.
 6. Der Hohlraum wird automatisch vernetzt. Die eingesetzte *Voxel*-Technik sorgt für ein hexaeder-dominantes Netz, das eine möglichst geringe Anzahl von Knoten (und damit Druckfreiheitsgraden) im Hohlraum erzeugt und weniger richtungsabhängig ist (im Vergleich zu Tetraedernetzen).
 7. Nach diesem Vernetzungsschritt durchdringen einige der Fluidelemente die Hülle des Hohlraums und müssen in einem separaten (automatischen) Relaxationsschritt auf die Hülle zurückgeschoben werden.
 8. Der letzte Schritt ist die (automatische) Erzeugung der Kopplung zwischen Fluid und Struktur mit Kopplungselementen, die sowohl die Druckfreiheitsgrade des Fluids als auch die Verschiebungsfreiheitsgrade der Hülle haben.

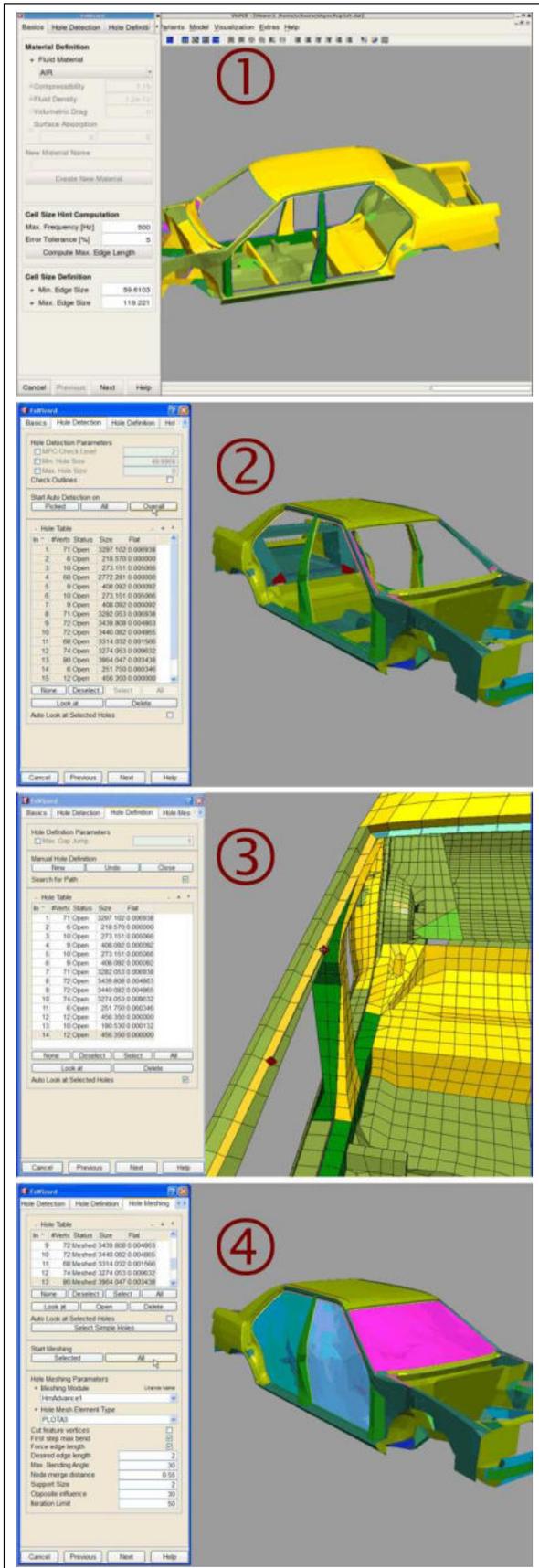


Abbildung 62: Schritte 1 bis 4 im FS-Wizard

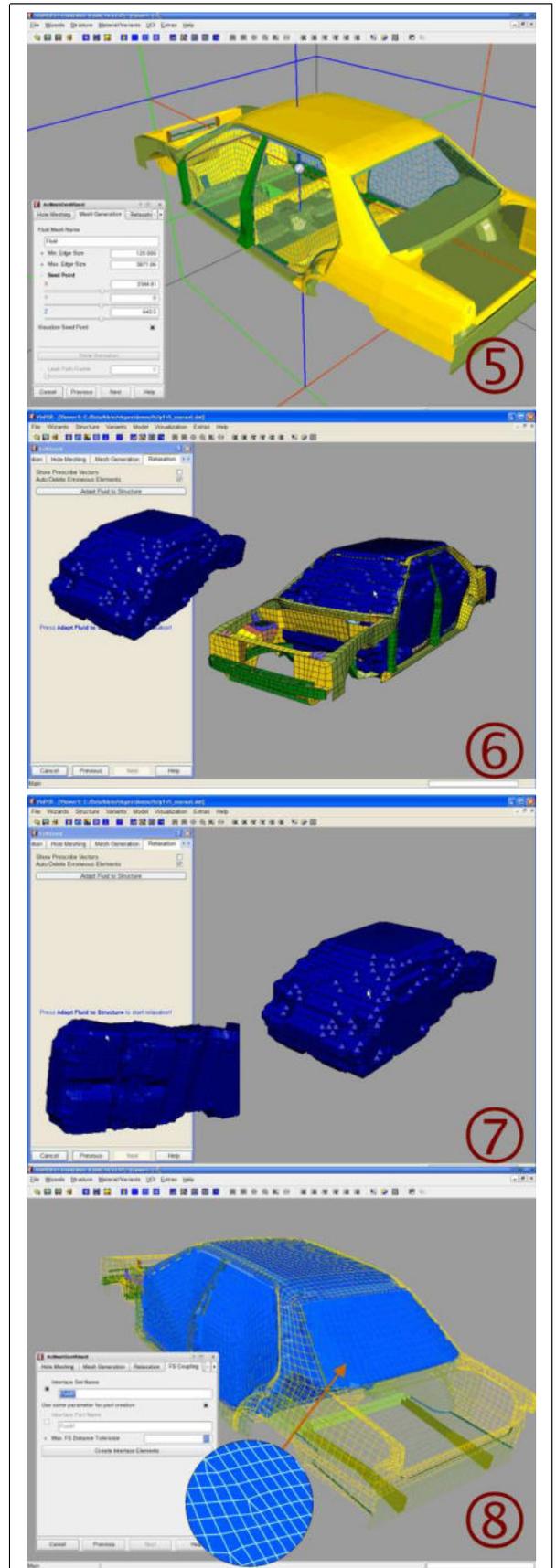


Abbildung 63: Schritte 5 bis 8 im FS-Wizard

Weitere Details zur Fluid-Struktur-Kopplung sind auf der Seite 103 zu finden.

VisPER-CA – Kontaktanalyse

Dieses Modul stellt zwei Assistenten (*Wizard*) für die Erstellung von Kontaktmodellen und für die Schraubenvorspannung zur Verfügung. Details zur Kontaktanalyse sind auf Seite 79 zu finden.

Der *Kontakt-Wizard* führt den Anwender durch alle wichtigen Schritte zur Kontaktmodellierung und dient zur grafischen Kontrolle von vorhandenen Kontaktdefinitionen:

- Definition der Kontakttopologie mit Knoten-zu-Knoten Zuordnung oder auch Fläche-zu-Knoten oder Fläche-zu-Fläche Zuordnung (letztere werden für inkompatible Netze im Kontakt verwendet).
- Definition von Kontakteigenschaften wie Anfangsspaltbreite und Reibkoeffizienten. Diese Informationen werden als lastfall-abhängige Daten spezifiziert.
- Definition einer Lastgeschichte, welche die Aktivierung und Deaktivierung von Lastfällen während der Kontaktanalyse (oder auch allgemein für eine statische Analyse) beschreibt. Die Abb. 64 zeigt dazu ein Beispiel.
- Kontrolle der Kontaktdefinitionen über eine grafische Hervorhebung bei gleichzeitiger Darstellung des Modells durch Konturlinien.

Ein *Vorspannungs-Wizard* für die Beschreibung der Schraubenvorspannung gestattet die einfache Eingabe komplexer Schraubverbindungen entsprechend der von PERMAS bereitgestellten Möglichkeiten:

- Schrauben werden automatisch gefunden und gemäß ihrer Länge und Ausrichtung gruppiert.
- Die Partner für die Vorspannung im Gewindebereich werden vorgeschlagen und können nach einer visuellen Kontrolle angepasst oder bestätigt werden.
- Der Wizard kann Löcher für die Schrauben in der Struktur automatisch finden.

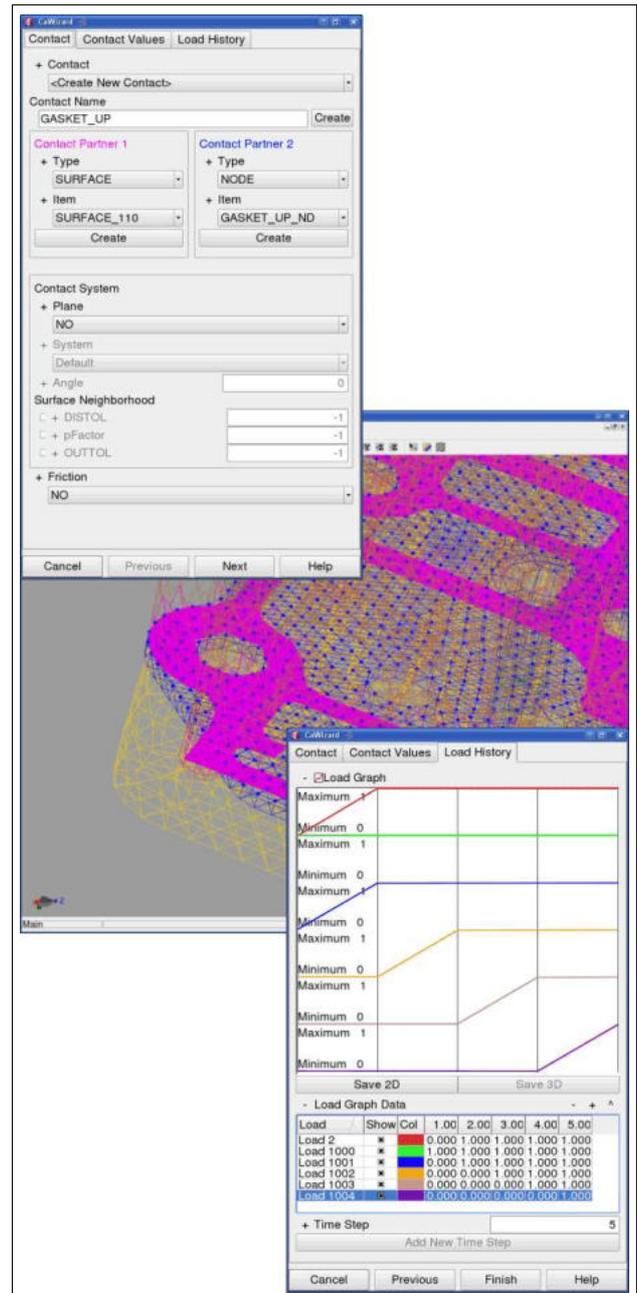


Abbildung 64: Kontaktmodellierung
Kontakttopologie und Definition der Lastgeschichte

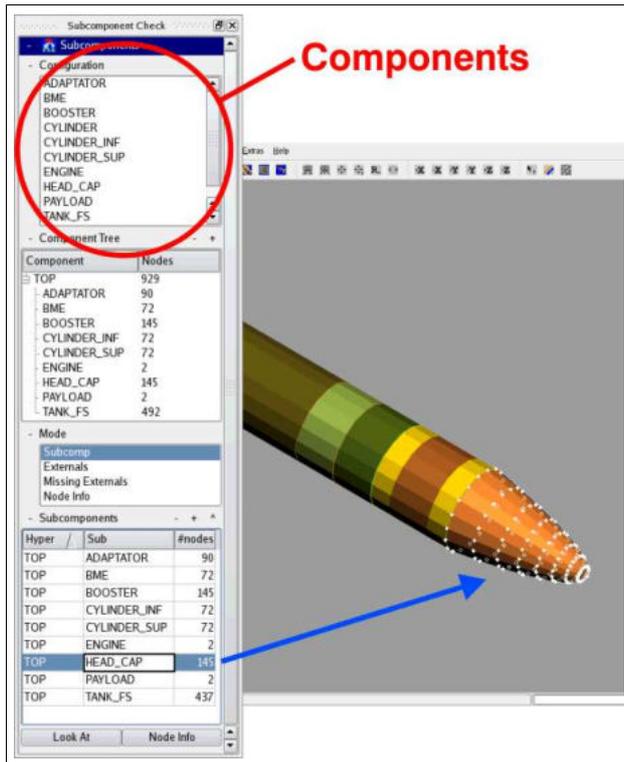


Abbildung 65: Navigieren im Komponentenbaum eines Teilstrukturmodells

42).

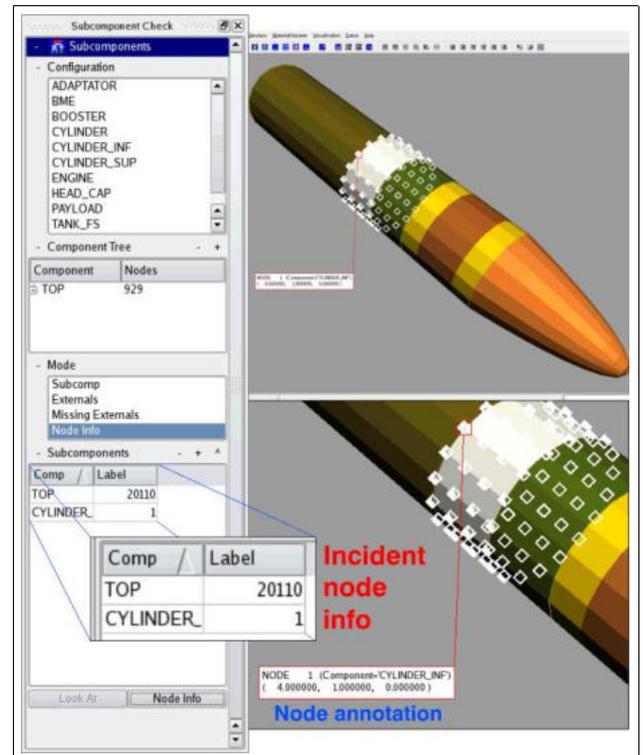


Abbildung 67: Darstellung der Koppelknoten eines Teilstrukturmodells

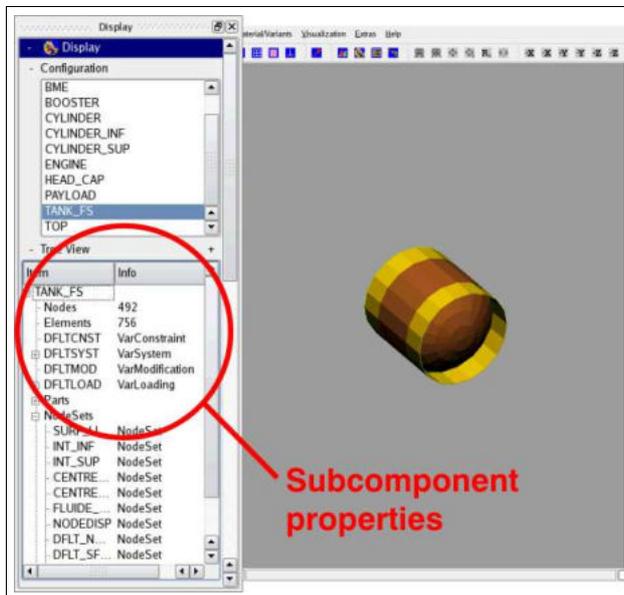


Abbildung 66: Darstellung einzelner Komponenten eines Teilstrukturmodells

Da VisPER die PERMAS-Datenstrukturen nutzt, können Teilstrukturmodelle direkt eingelesen werden. Die Teilstrukturtechnik selbst ist auf Seite 57 näher beschrieben.

Die Überprüfung von Teilstrukturmodellen umfasst folgende Punkte:

- Die Navigation durch den Baum der Komponenten (wie in Abb. 65).
- Die Darstellung einzelner Komponenten (wie in Abb. 66).
- Die Darstellung der Koppelknoten (wie in Abb. 67).
- Die Prüfung der Elementeigenschaften (wie in Abb. 68).
- Die Darstellung von Eigenschwingungsformen (wie in Abb. 69).

Teilstrukturen

Ein *Teilstruktur-Wizard* wurde entwickelt, um den Aufbau von Teilstrukturmodellen zu erleichtern. Diese Funktion ist Teil des Moduls VBAS (siehe Seite

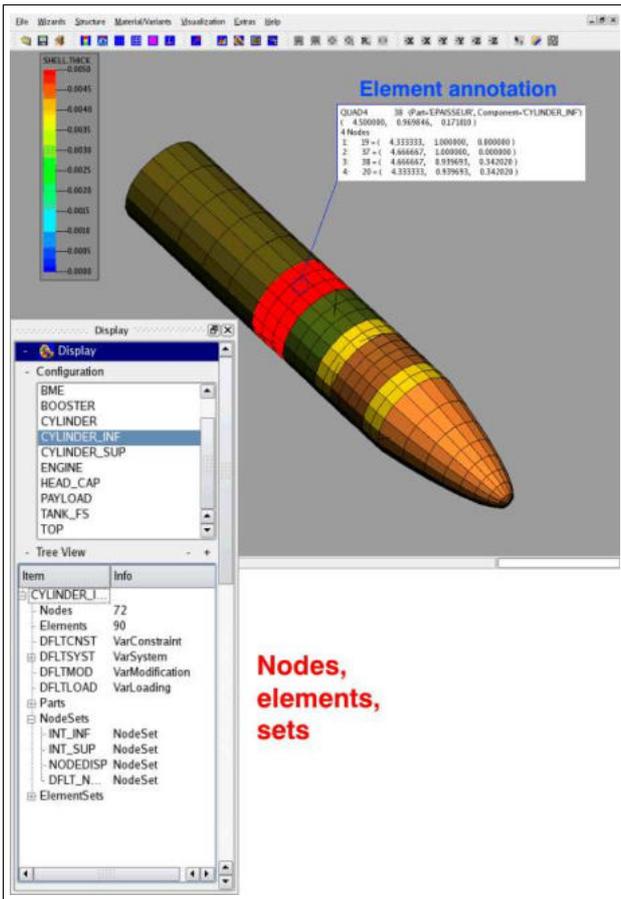


Abbildung 68: Prüfung von Elementeigenschaften in einem Teilstrukturmodell

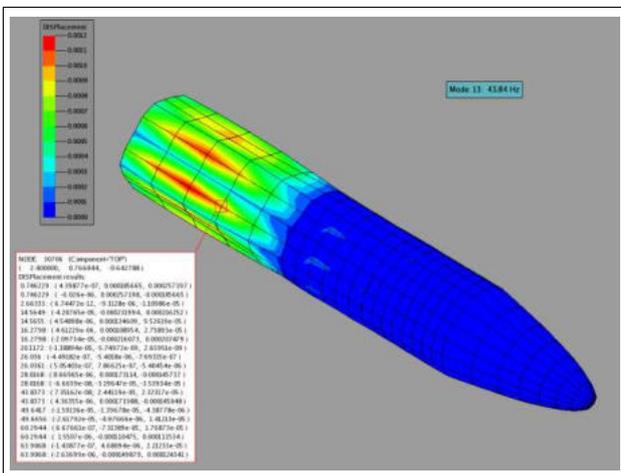


Abbildung 69: Darstellung von Schwingungsformen eines Teilstrukturmodells

Schweißpunktauswertung

Für die Auswertung von Schweißpunktkräften stellt VisPER spezielle Funktionen zur Verfügung. Diese Funktionen sind Teil des Moduls VBAS (siehe Seite 42).

Über Ampelfarben können die kritischen und unkritischen Werte für Normal- oder Schubkraft auch bei großen Modellen rasch sichtbar gemacht werden. Zusammen mit den zugehörigen Spannungen im Blech können die Schweißpunktverbindungen komplett bewertet werden. Dabei können die Schweißpunktkräfte als Halbkugeln mit proportionaler Größe dargestellt werden (siehe Abb. 70) oder auch als Vektoren normal zum Blech. Eine automatische Erkennung kritischer Regionen ermöglicht eine schnelle Navigation im Modell.

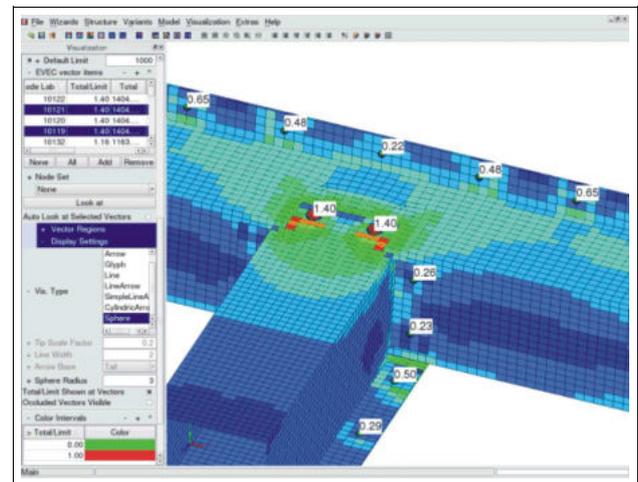


Abbildung 70: Auswertung der Schweißpunktkräfte zusammen mit Elementspannungen



Abbildung 71: PCGen logo

VisPER-PCGen – PERMAS Komponenten-Generator

PCGen ist ein Modellierungszusatzwerkzeug für VisPER, spezialisiert auf quasi-axialsymmetrische Strukturen wie Fluidtanks, siehe Abbildung 74.

PCGen ist ein Werkzeug für den Konzeptentwurf. Es erlaubt die Erzeugung vollständiger PERMAS Simulationsmodelle, sogar für die Optimierung ohne Ausgangsdaten und ohne weitergehende Kenntnisse von PERMAS. Das Werkzeug erlaubt schnelle Entwurfszyklen.

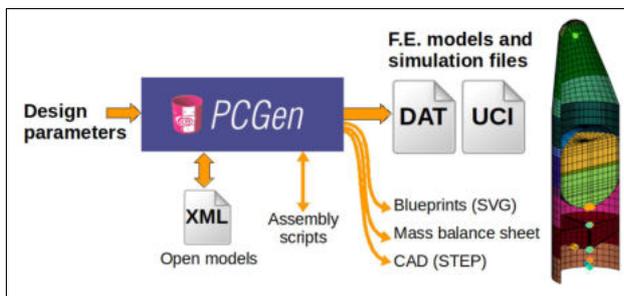


Abbildung 72: PCGen files

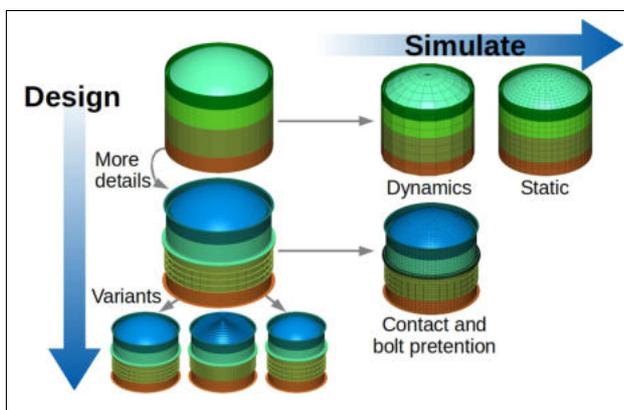


Abbildung 73: PCGen Workflow

PCGen basiert auf einer parametrisierten Bibliothek von Objekten zur Erzeugung kompletter FE Modelle

und benötigt keine CAD Daten zur Netzgenerierung. Das ermöglicht eine schnelle Erzeugung von Finite-Element-Modellen (*DAT* und *UCI* Files) zu frühen Entwurfsphasen, zu denen *CAD* Daten fehlen oder unvollständig sind, oder wenn sich Entwürfe schnell ändern. Darüber hinaus können sehr schnell Netzungsvarianten für verschiedene Anforderungen (z.B. fein für eine Beulanalyse und gröber für eine Dynamikrechnung) erzeugt werden. Optional kann die Geometrie auch im *STEP* Format für CAD exportiert werden.

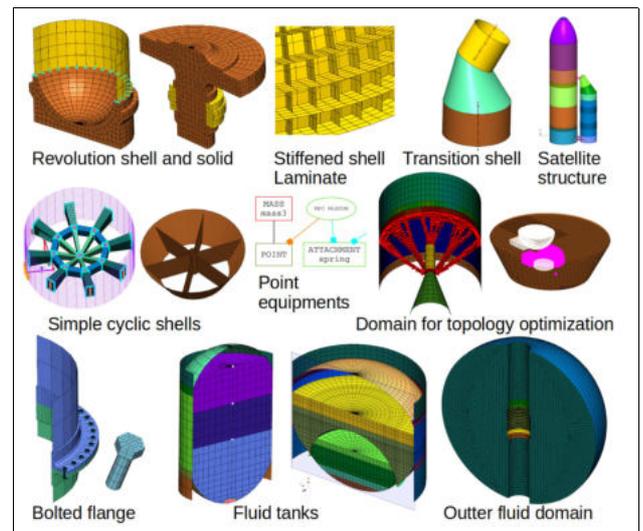


Abbildung 74: PCGen featured products

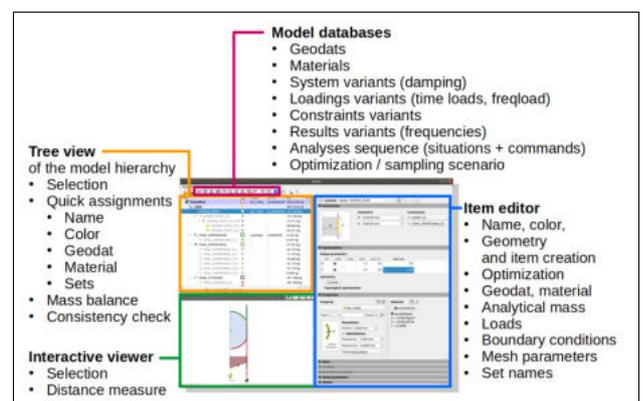


Abbildung 75: PCGen GUI

Die graphische Benutzerschnittstelle ist an den Modellierungsaufgaben orientiert. Das Modell hat eine hierarchische Organisation, die eine Vererbung von Eigenschaften zur schnellen Änderung erlaubt. PCGen stellt vielfältige Rückmeldungen für den Anwender bereit, wie zur Modellkonsistenz- und Vollständigkeit oder analytische Massen. Documentati-on und Übungsbeispiele sind verfügbar.

PERMAS Basisfunktionen

Teilstrukturtechnik

In PERMAS kann ein FE-Modell in beliebige Teilstrukturen – sogenannte **Komponenten** – zerlegt werden. Diese Komponenten lassen sich, ähnlich wie einzelne Elemente, zu einer übergeordneten Struktur – der **Konfiguration** – zusammenfügen.

- Die Anzahl der Komponenten ist nicht beschränkt und **jede Komponente kann beliebig groß bzw. komplex** sein.
- Komponenten- und Konfigurationsnamen sind frei wählbar.
- Jede Komponente besitzt ihren eigenen Namensraum für Element-, Knotenpunkt-IDs usw.
- Eine Konfiguration kann über beliebig viele Stufen zusammengebaut werden. Jede Stufe kann eigene Elemente, Lasten, Randbedingungen enthalten. Durch die Angabe der zu koppelnden Freiheitsgrade in jeder Komponente (den sogenannten 'externen' Freiheitsgraden) kann der **Zusammenbau** der gesamten Konfiguration **automatisch** erfolgen. Dabei wird jeweils eine *Kondensation* der Komponenten auf die externen Freiheitsgrade durchgeführt (*statische Kondensation*, *Guyan's Reduction*).
- Zusätzlich zur statischen Kondensation nach *Guyan* ist auch eine *dynamische Kondensation* nach der *Craig-Bampton-Methode* oder der *Craig-Bampton-Methode mit gemischten Randbedingungen* möglich.
- Spezielle Reorderingkonzepte sowie explizite und iterative Kondensationsmethoden mit automatischer Selektion der Algorithmen garantieren **höchste Effizienz**.
- Die Datenbasis kann eine unbeschränkte Anzahl von Konfigurationen enthalten.
- Verschiedene Konfigurationen können sich einzelne oder mehrere Komponenten teilen.
- Einzelne Teilstrukturen können archiviert und später mit anderen Teilstrukturen kombiniert werden. Die Archivierung kann dabei sowohl in Form der Modellbeschreibung selbst als auch in Form der kondensierten Matrizen erfolgen (siehe Kapitel Matrixmodelle auf Seite 72).
- An Stelle der tatsächlichen Geometrie können so Matrixmodelle an Zulieferer und Kunden weitergegeben werden.

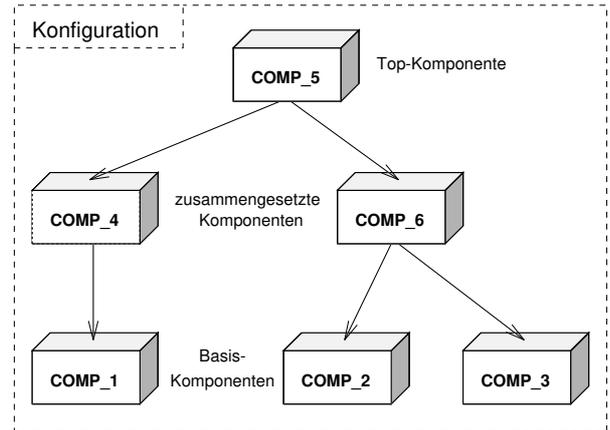


Abbildung 76: Teilstrukturtechnik in PERMAS

- Die Teilstrukturtechnik erlaubt die getrennte Modellierung und Verifikation aller Strukturteile vor dem Zusammenbau.
- Einzelmodelle aus unterschiedlichsten Quellen lassen sich in Form von Komponenten einfach zusammenfügen.
- Bereiche mit rechenintensiven Modelleigenschaften (Nichtlinearitäten, lokale Netzverfeinerungen, Geometrieänderungen) können zu eigenständigen Komponenten zusammengefasst und die Gesamtstruktur damit besonders effizient untersucht werden.

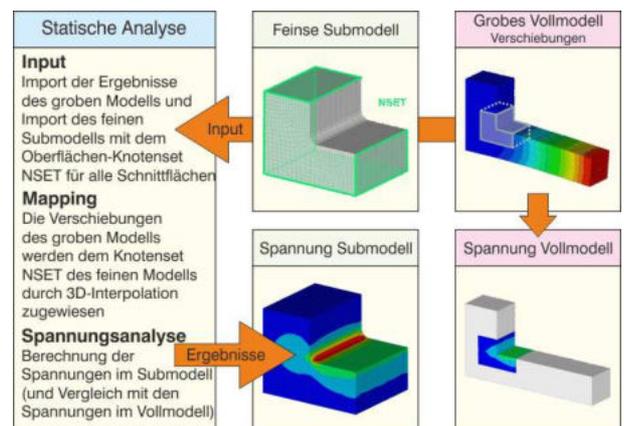


Abbildung 77: Submodell-Technik (Spannungslupe) in der Statik

Submodell-Technik

Ergebnisse, die auf einem groben (globalen) Netz berechnet wurden, können als Randbedingungen für einen feiner vernetzten Teil des Modells heran-

gezogen werden. Das erlaubt eine genauere Nachberechnung z.B. von Spannungen (siehe Abb. 77).

Im Falle einer statischen Analyse werden die Randverschiebungen des feiner vernetzten Ausschnitts aus der Vorrechnung übernommen und festgehalten.

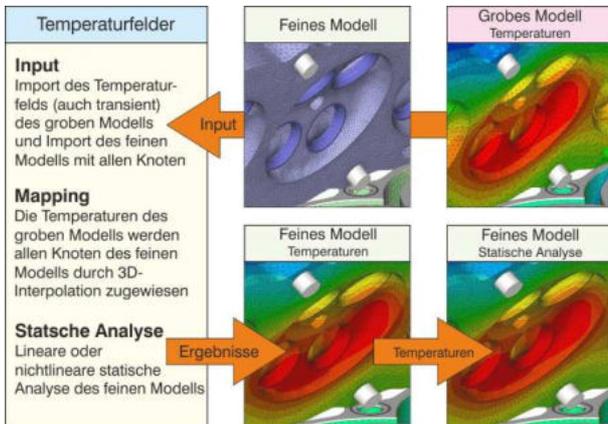


Abbildung 78: Mapping von Temperaturfeldern

Für Temperaturfelder erfolgt die Interpolation für das feine Netz in 3D (siehe Abb. 78).

Manchmal müssen Temperaturfelder auch extrapoliert werden, und zwar auf Knoten, die nicht bei der Temperaturfeldberechnung vorhanden waren (wie für Dichtungselemente oder Schrauben bei der Motorberechnung). Die Extrapolation kann durch das Mapping erledigt werden oder durch eine weitere Temperaturfeldberechnung (oder beides, wie im Beispiel der Abb. 79 gezeigt).

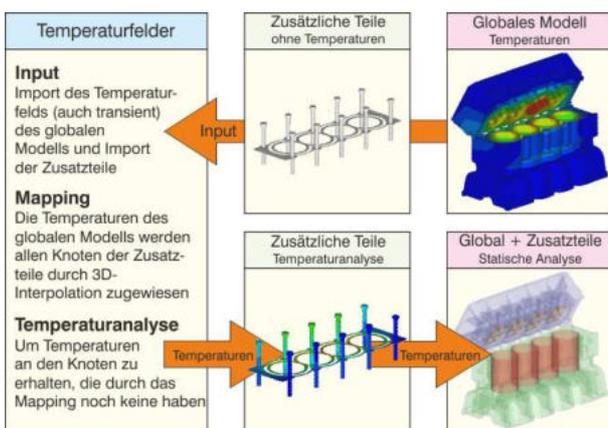


Abbildung 79: Mapping mit Extrapolation bei Temperaturfeldern

Variantenanalyse

Die Berechnung und der Vergleich von Modellvarianten ist in PERMAS sehr einfach. Variable Modelleigenschaften werden dabei in sogenannten **Varianten** abgelegt:

- **Systemvariante:**
 - Materialzuordnung der Elemente,
 - Elementeigenschaften (Dicke, Querschnitt etc.),
 - Lokale Elementkoordinatensysteme.
- **Randbedingungsvariante:**
 - Unterdrückte Freiheitsgrade,
 - Vorgeschriebene Freiheitsgrade,
 - Kontaktdefinitionen,
 - Koeffizienten allgemeiner kinematischer Zwangsbedingungen,
 - Lokale Koordinatensysteme für die Freiheitsgrade am jeweiligen Knotenpunkt.
- **Lastvariante:**
 - Dynamische Last oder eine beliebige Anzahl statischer Lastfälle bzw. Kombinationen hiervon.
- **Ergebnisvariante:**
 - Zur näheren Beschreibung der gewünschten Ergebnisse, wie
 - * die Überlagerungsvorschriften für eine Lastfallkombination,
 - * die Liste der Anregungsfrequenzen bei einer Frequenzganganalyse,
 - * die Liste von Lastschritten, an denen Ergebnisse vorliegen sollen.
- **Modifikationsvariante:**
 - Beschreibung des Entwurfsmodells für Sensitivitätsberechnung und Optimierung.

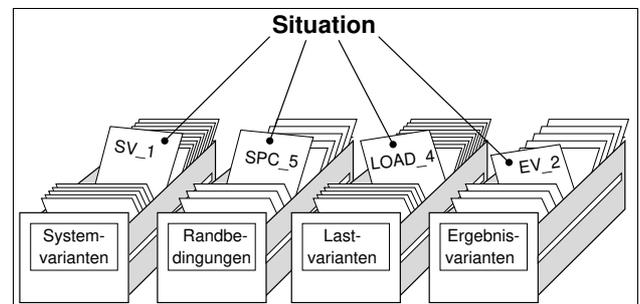


Abbildung 80: Varianten in PERMAS

Basiseigenschaften, wie Knotenpunktskoordinaten, Elementtopologie und globale Koordinatensysteme bleiben bei der Variantenbildung unverändert.

Einzelne Varianten können ausgewählt und zusammen als sogenannte **Situation** untersucht werden.

- Varianten- und Situationsnamen sind frei wählbar.
- Die Zahl der Varianten und der Berechnungssituationen unterliegt keiner Beschränkung.
- Die Variantenrechnung lässt sich mit der *Teilstrukturtechnik* beliebig kombinieren.
- Für jede Teilstruktur können eigene System-, Randbedingungs-, Last-, Ergebnis- und Modifikationsvarianten ausgewählt werden (z.B. Modelle mit Symmetrie/Antisymmetrie).
- PERMAS führt über alle bereits abgeschlossenen Berechnungsschritte Buch. Dadurch wird bei mehrfacher Verwendung einzelner Varianten die mehrfache Berechnung identischer Teilergebnisse automatisch vermieden.

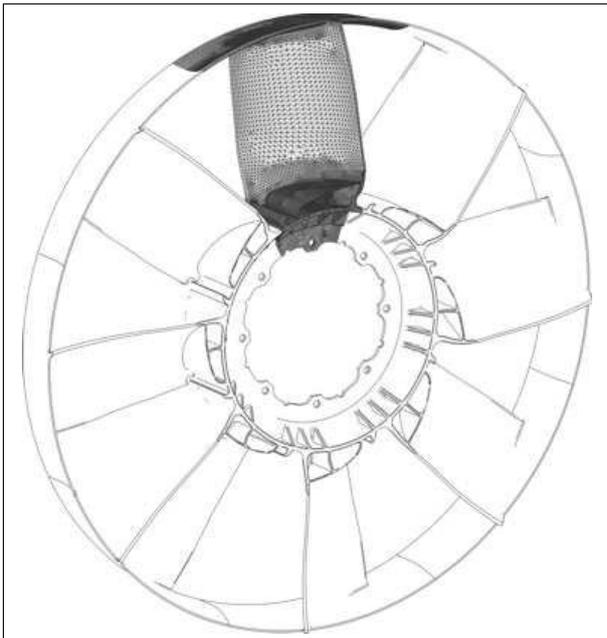


Abbildung 81: Zyklische Symmetrie eines Lüfters
Behr GmbH & Co., Stuttgart.

Zyklische Symmetrie

Zyklisch-symmetrische Strukturen wie in Abb. 81 sind dadurch gekennzeichnet, dass sie aus einer Anzahl identischer Sektoren aufgebaut sind, die um ein mehrfaches des Sektorwinkels um die Drehachse gedreht sind und so eine geschlossene Struktur bilden.

Zyklisch-symmetrische Strukturen können für statische Berechnungen unter entsprechend zyklischen Belastungen und für reelle Eigenwertberechnungen (siehe Module LS und DEV auf Seite 79 bzw. 96) verwendet werden. Dabei wird die Analyse der Gesamtstruktur durch eine Reihe von Analysen eines einzelnen Sektors unter wechselnden Randbedingungen ersetzt. Dazu wird die Anzahl der Knotendurchmesser vorgegeben, welche die Anzahl der Wellen über den Umfang beschreibt.

Die Teilstrukturtechnik kann eingesetzt werden, um den Sektor zu beschreiben. Die Berechnung der zyklischen Symmetrie wird dann in der Top-Komponente durchgeführt.

Bei der Topologie-Optimierung (siehe Modul TOPO auf Seite 112) kann durch entsprechende Randbedingungen das Ergebnis so beeinflusst werden, dass zyklisch-symmetrische Strukturen entstehen.

Die *Coleman-Transformation* oder *Multi-Blade Coordinate Transformation (MBC-Transformation)* steht für die Berechnung rotierender zyklisch-symmetrischer Rotoren zur Verfügung. Eine reelle Eigenwertanalyse auf der Basis einer statischen Berechnung wird eingesetzt, um anschließend eine komplexe Eigenwertanalyse zur Bewertung der Stabilität des Rotors mit anisotroper elastischer Lagerung durchzuführen.

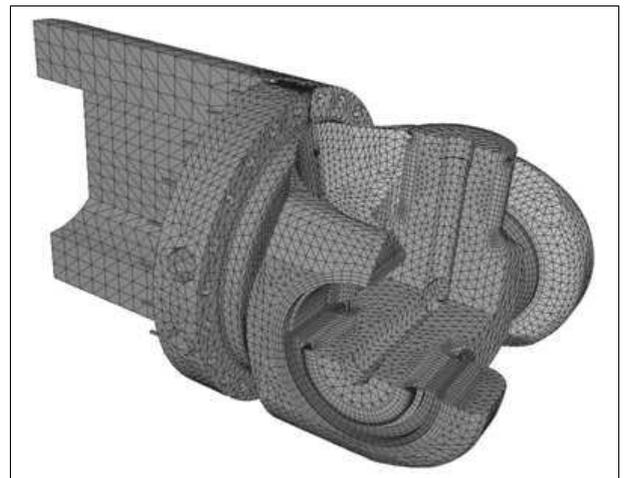


Abbildung 82: Inkompatible Netze
Gelenkwellen-Modell im Schnitt
(Voith Turbo GmbH & Co. KG)

Flächen- und Linienbeschreibung

Die Beschreibung von Oberflächen in PERMAS dient zunächst zur Spezifikation von Stellen, an denen Bauteile automatisch verbunden werden sollen (siehe nächster Abschnitt). Die Beschreibung erfolgt auf eine der folgenden Weisen:

- Angabe von Elementflächen, z.B. für ein Set von Volumenelementen (Sets siehe Seite 67),
- Verwendung von Geometrieelementen (siehe Elementbibliothek Seite 64).

Für Oberflächen werden häufig sehr genaue Koordinaten benötigt (z.B. bei Kontakt mit inkompatiblen Netzen), die aber über den Preprozessor nicht zur Verfügung stehen. Solche Oberflächen können intern nachträglich geglättet werden, um durch Korrektur von Ausreißern sehr präzise Oberflächen zu erzielen, die somit auch genauere Berechnungsergebnisse erlauben.

Bei Oberflächendefinitionen über quadratische Elemente kann eine Linearisierung erfolgen, so dass die Seitenmitten-Knoten linear abhängig von den Eckknoten geführt werden. Werden diese Oberflächen in Kontaktdefinitionen verwendet, dann kann auch der Kontaktdruck auf diesen Flächen dargestellt werden. Alle Oberflächendefinitionen können über ein spezielles Exportobjekt ausgegeben und visualisiert werden. Definition und Visualisierung von Oberflächen werden durch VisPER unterstützt.

In derselben Weise dient die Beschreibung von Linien zunächst zur Spezifikation von Stellen, an denen Bauteile entlang von Linien automatisch verbunden werden sollen (siehe nächster Abschnitt). Die Beschreibung erfolgt auf eine der folgenden Weisen:

- Angabe von Elementkanten, z.B. für ein Set von Flächenelementen (Sets siehe Seite 67),
- Verwendung von Geometrieelementen (siehe Elementbibliothek Seite 64).

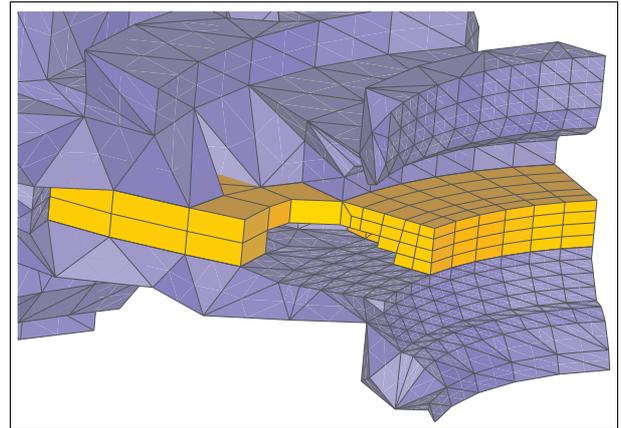


Abbildung 83: Inkompatible Netze
Übergang zwischen verschiedenen Elementtypen
(HEXE8/TET10)

Automatisierte Bauteilkopplung

Die automatisierte Kopplung von inkompatibel vernetzten Bauteilen bringt eine Reihe von Vorteilen:

- Sie erlaubt eine wesentlich flexiblere Modellbildung, in der Einzelteile auf einfache Weise verwaltet und ausgetauscht werden können.
- Damit wird ein schnellerer Änderungszyklus für den virtuellen Prototypen ermöglicht.
- Numerisch gute Netzübergänge sind möglich ohne schlechte Elemente.
- Damit werden auch Schweißpunktverbindungen und Flächenkontakt wesentlich leichter modellierbar.

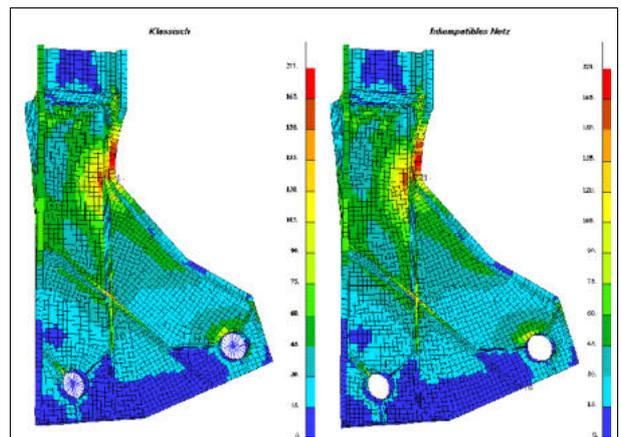


Abbildung 84: Rippvarianten
ohne Neuvernetzung
(links: kompatibel vernetzt;
rechts: Rippen unabhängig vernetzt)

Die Bauteile lassen sich wie folgt koppeln:

- Definition einer führenden Fläche und der zu

koppelnden Freiheitsgrade

- Definition einer abhängigen Fläche oder eines Knotensets

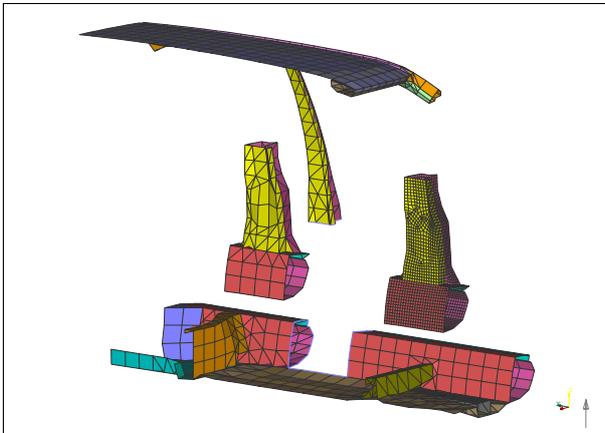


Abbildung 85: Anwendung lokaler Netzverfeinerung

Die Ermittlung der Nachbarschaftsbeziehungen und die Verbindung der Bauteile durch *MPC*-Bedingungen erfolgt automatisch. Zu Verifikationszwecken werden die ermittelten Nachbarschaftsbeziehungen dem Postprocessing zur Verfügung gestellt.

Die Kopplungsdefinition ist eine allgemeine Funktion, die auch in gekoppelten Analysen eingesetzt werden kann, wo häufig unterschiedliche Netzfeinheiten aufgrund der modellierten Physik auftreten. Ein Beispiel ist eine gekoppelte Fluid-Struktur-Akustikberechnung, in der das Akustiknetz gröber als das Mechaniknetz modelliert werden kann.

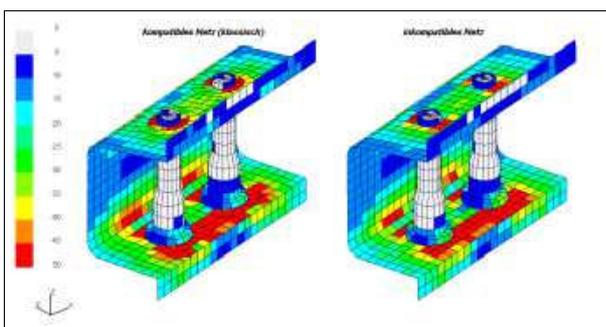


Abbildung 86: Ergebnisse bei Zusammenbau mit kompatibelem (links) und inkompatiblen (rechts) Netz

Inkompatible Netze in Verbindung mit der Formoptimierung haben einen entscheidenden Vorteil: sie erlauben die Position von Schrauben oder Rippen zu optimieren ohne dass dazu eine Änderung des Elementnetzes nötig wäre. Abb. 87 zeigt ein Beispiel, bei dem die Ausgangs- und Endlage dreier

Schrauben sehr verschieden ist. Trotzdem findet die Optimierung nach einigen Iterationen eine Lage der Schrauben, die symmetrisch ist und gleiche Schraubenkräfte aufweist.

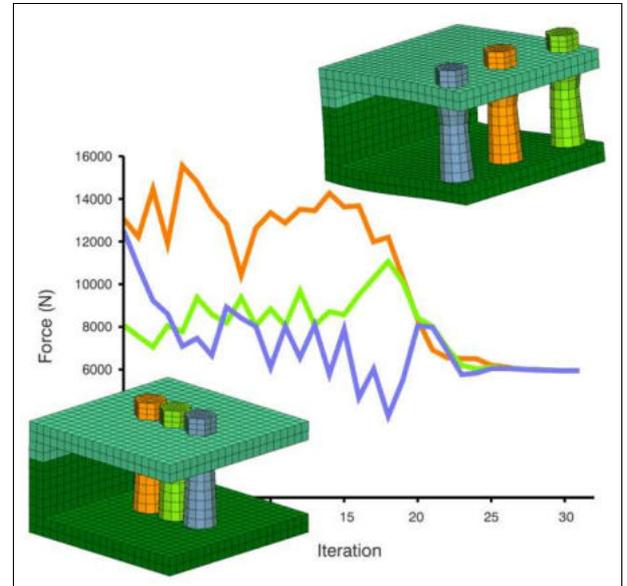


Abbildung 87: Formoptimierung mit inkompatiblen Netzen, um die kleinsten relativen Verschiebungen zwischen oben und unten mit einheitlichen Schraubenkräften zu erreichen (oben: Ausgangskonfiguration; unten: optimierte Schraubenpositionen; dazwischen: Schraubenkräfte über den Iterationen)

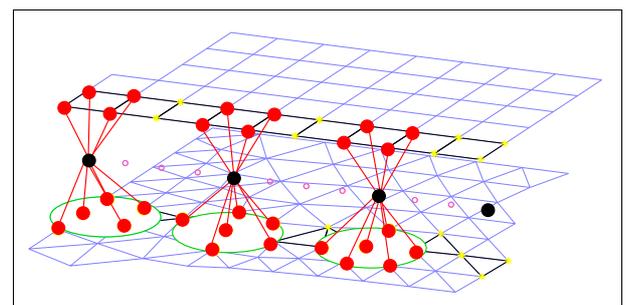


Abbildung 88: Einbindung der Schweißpunktkräfte

Automatisierte Schweißpunktmodellierung

Zur automatisierten Modellierung von Schweißpunkten lassen sich benachbarte Flächen über vorgegebene Punkte miteinander verbinden:

- Angabe der Schweißpunktpositionen

- Angabe der (inkompatiblen) Verbindungsflächen
- Angabe der Schweißpunktsteifigkeit und optional der Aufstandsfläche

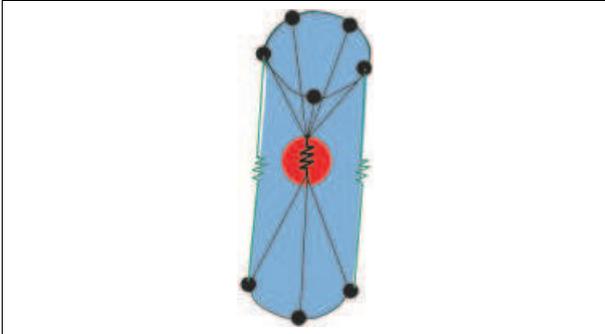


Abbildung 89: Federelement am Schweißpunkt

Die Schweißpunktsteifigkeit wird über eine Feder abgebildet, die über *MPC*-Bedingungen an die benachbarten Bauteile angebunden wird (siehe Abb. 89). Als Ergebnisse stehen somit sowohl die Federkräfte als auch die Kräfte an den Einknüpfungspunkten der Aufstandsfläche zur Verfügung.

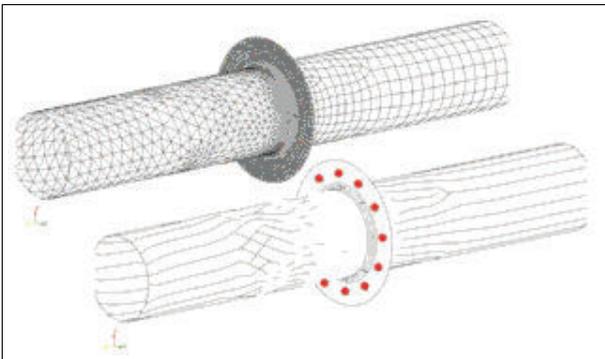


Abbildung 90: Schweißpunkte und inkompatible Netze

Zur Verifikation der generierten Schweißpunktverbindungen können die Topologie und die ermittelten Verbindungsvektoren für die grafische Auswertung ausgegeben werden (siehe Abb. 91).

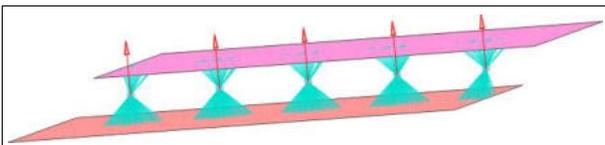


Abbildung 91: Verifikation der Schweißpunktverbindung

Eine Weiterentwicklung der Schweißpunktmodellierung wurde mit dem Modul WLDS (siehe Seite 122)

realisiert, um bei einfachster Modellierung bestmögliche Ergebnisse zu erzielen.

Lokale Koordinatensysteme

Lokale Koordinatensysteme dienen als Bezugssystem für Knotenkoordinaten und andere Koordinatensysteme, um die Modellbeschreibung zu erleichtern. Auch Rotated Basis, Lasten oder anisotrope Materialeigenschaften können über lokale Koordinatensysteme einfacher beschrieben werden. Die verschiedenen Typen von lokalen Koordinatensystemen sind aus Abb. 92 ersichtlich. Lokale Koordinatensysteme können visuell unterstützt in VisPER definiert werden.

Kinematische Zwangsbedingungen

Für die Beschreibung einfacher (absoluter) kinematischer Zwangsbedingungen stehen unterdrückte Freiheitsgrade (Verschiebung ist null) und vorgeschriebene Freiheitsgrade (Verschiebung ist ungleich null) zur Verfügung.

Für die Beschreibung von multilinearen (relativen) kinematischen Zwangsbedingungen zwischen verschiedenen Freiheitsgraden werden sog. Multi-Point-Constraints (*MPCs*) eingesetzt.

PERMAS bietet eine ganze Reihe verschiedener *MPCs* an, welche eine komfortable Modellbeschreibung unterstützen:

- Durch **einfache Zuordnung** lassen sich gleiche Werte für mehrere Freiheitsgrade erzwingen (zur Modellierung von Gelenken und Gleitflächen sowie für den Randanschluss bei zyklischer Symmetrie).
- **Starrkörper** zur Modellierung starrer Modellteile und zur Lasteinleitung. Die Führung des Starrkörpers kann dabei durch einen oder mehrere Freiheitsgrade erfolgen. Auch die Anzahl der abhängigen Freiheitsgrade ist frei konfigurierbar.
- **Interpolationsgebiete** dienen u.a. der Netzverfeinerung, der Kopplung inkompatibler Netze, der Lasteinleitung oder der Vermittlung von Ergebnissen zwischen verschiedenen Netzen:

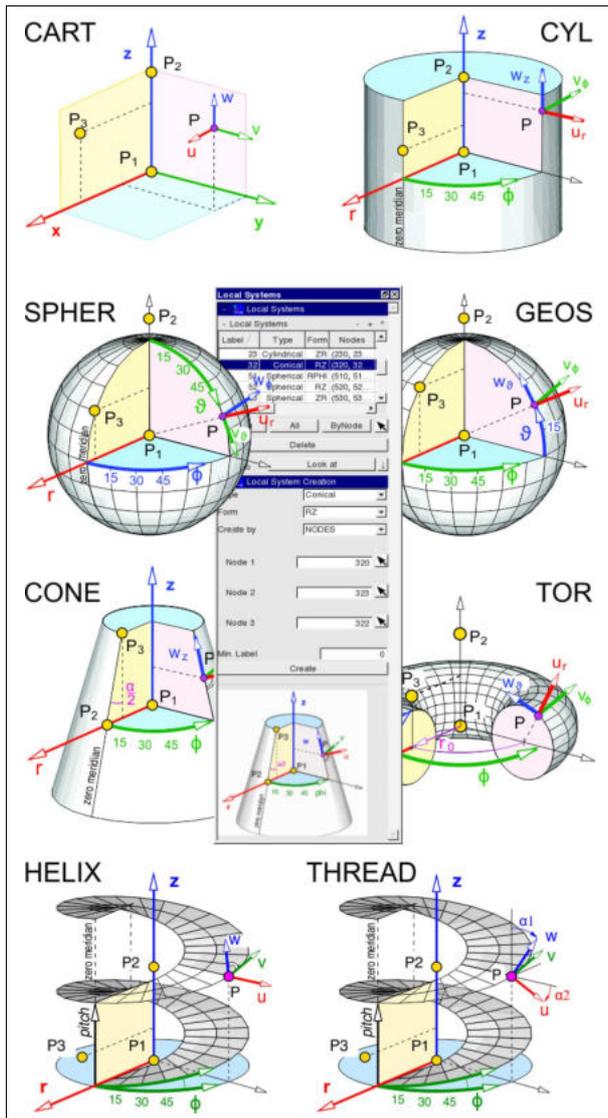


Abbildung 92: Lokale Koordinatensysteme in VisPER

- Linien mit 2 oder 3 führenden Knotenpunkten,
- Dreiecks- und Vierecksflächen mit 3 oder 6 bzw. 4, 8 oder 9 führenden Knotenpunkten,
- Volumenbereiche als Hexaeder (mit 8, 20 oder 27 Knoten), Pentaeder (mit 6, 15 oder 18 Knoten), Tetraeder (mit 4 oder 10 Knoten) und Pyramide (mit 5 Knoten).

• **Kopplung mit Flächen** dient der flächenhaften Kopplung inkompatibler Netze. Alle Freiheitsgrade an allen Knoten eines abhängigen Knotensets, einer abhängigen Fläche oder einem abhängigen Flächenset erhalten die Verschiebungen (oder Temperaturen etc.), welche über eine Interpolation der entsprechenden Knotenwerte einer führenden Fläche oder eines füh-

renden Flächensets ermittelt werden. Diese Kopplung kann auch verwendet werden, um einen **Volumen-Schale-Anschluss** zu realisieren, d.h. zum Übergang von mit Volumenelementen modellierten Bauteilbereichen auf schalenartige Bauteilbereiche (siehe Abb. 93). Wenn die abhängigen Knoten nicht auf der führenden Fläche liegen, dann werden entweder die abhängigen Knoten auf die führende Fläche projiziert oder ein starrer Hebelarm generiert, um die Kinematik korrekt abzubilden.

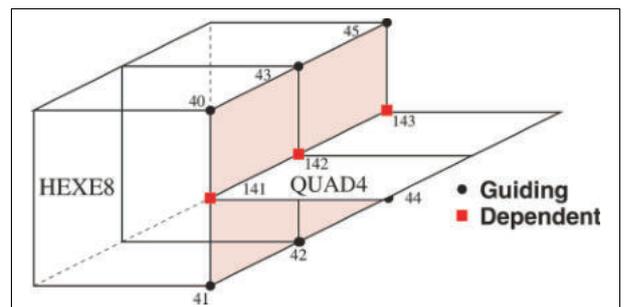


Abbildung 93: Beispiel für MPC Volumen-Schale-Anschluss

- **Kopplung mit Volumen** dienen der volumenmäßigen Kopplung inkompatibler Netze. Alle Freiheitsgrade an allen Knoten eines abhängigen Knotensets erhalten die Verschiebungen (oder Temperaturen etc.), welche über eine Interpolation der entsprechenden Knotenwerte eines führenden Volumens ermittelt werden, das über referenzierte Elemente bestimmt ist.
- **Pressverbindung** zur bequemen Modellierung von z.B. Welle-Nabe-Verbindungen, wobei der Außendurchmesser der Welle größer als der Innendurchmesser der Nabe ist. Häufig werden solche Verbindungen durch eine Kontaktbedingung abgebildet. Aber wenn eine Änderung des Kontaktzustands während einer Belastung nicht erwartet wird, dann ist es wesentlich effizienter, die Verbindung als lineare MPC-Verbindung darzustellen. Bei entsprechenden Modellen sind die Ergebnisse von Kontakt und MPCs bei dieser Verbindung identisch (siehe Abb. 94). Ein spezielles Kommando für Pressverbindungen erlaubt die automatisierte Generierung der benötigten MPC-Definitionen.
- **Allgemeine MPCs** mit beliebiger Linearkombination der beteiligten Freiheitsgrade.

Die Anzahl der jeweils abhängigen Freiheitsgrade ist nicht beschränkt. Auch mehrstufige Zwangsbe-

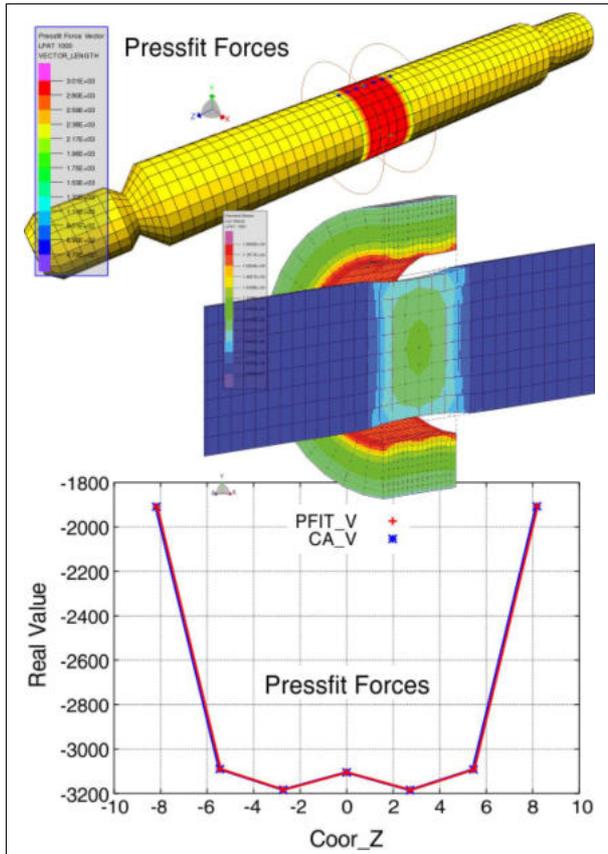


Abbildung 94: Presspassung von Welle und Nabe
Identische Spannungsergebnisse von MPC-Modellierung und Kontaktanalyse.

dingungen (hierarchische MPCs) können definiert werden.

Für die Beschreibung der Kopplung einzelner Komponenten im Rahmen der *Teilstrukturtechnik* werden 'externe Freiheitsgrade' verwendet. Diese externen Freiheitsgrade können dann in der darüberliegenden Komponente wieder Bestandteil einer einfachen oder multilinearen Zwangsbedingung sein.

Behandlung von Singularitäten

Bei statischen Berechnungen werden zwei Arten von Singularitäten automatisch erkannt und dem Anwender in geeigneter Weise mitgeteilt:

- Bei redundanten Freiheitsgraden, die keine Steifigkeit im Modell besitzen (z.B. senkrecht zu Stäben oder Membranen), erhält der Anwender eine Liste auf dem Ergebnisfile.

- Bei Starrkörper-Freiheitsgraden werden die Bewegungsformen für das Postprocessing aufbereitet und ausgegeben. Sie können unmittelbar betrachtet werden, um direkt fehlende Lagerungen oder sonstige Modellfehler zu erkennen.

VisPER stellt einen RBM-Assistenten zur Verfügung (siehe Seite 45), der die Starrkörpermoden vor der ersten Berechnung beseitigen hilft.

In dynamischen Eigenwertanalysen werden die Starrkörper-Modes automatisch ermittelt und abgespalten.

Bei der Berechnung des dynamischen Antwortverhaltens im Frequenz- und Zeitbereich werden für eine absolute Response-Analyse der elastische und der Starrkörper-Anteil automatisch überlagert.

Elementbibliothek

Die PERMAS Elemente sind für alle Typen von physikalischen Freiheitsgraden (wie Verschiebungen, Temperatur, elektromagnetisches Potential, usw.) anwendbar, neben einigen speziellen, anwendungsspezifischen Elementen. Momentan stehen folgende Elemente bereit (siehe auch Abb. 95):

- **Volumenelemente:**
 - Tetraeder mit 4 bzw. 10 Knotenpunkten mit geraden bzw. gekrümmten Kanten,
 - Pyramidenelement mit 5 Knotenpunkten,
 - Pentaeder mit 6, 15 oder 18 Knotenpunkten mit geraden bzw. gekrümmten Kanten,
 - Hexaeder mit 8, 20 oder 27 Knotenpunkten mit geraden bzw. gekrümmten Rändern.
 - Hexaeder mit 8, 20 oder 27 Knoten, Pentaeder mit 6, 15 oder 18 Knoten, Tetraeder mit 4 oder 10 Knoten sowie Pyramide mit 5 Knoten als *Fluidelemente*.
 - Zwei verschiedene Hexaeder-Elemente mit 8 Knoten für die dynamische visko-elastische Berechnung (siehe Seite 103).
- **Stab- und Membranelemente :**
 - Stabelemente mit 2 bzw. 3 Knotenpunkten,
 - Dreieckselemente mit 3 oder 6 Knotenpunkten und geraden oder gekrümmten Kanten,
 - Viereckselemente mit 4, 8 oder 9 Knotenpunkten und geraden bzw. gekrümmten Rändern,

- Schubelement mit 4 Knotenpunkten.
- **Balkenelemente** mit 2 Knotenpunkten, wahlweise jeweils mit oder ohne zusätzliche Hebelarme (Offset am Balkenende):
 - Balken mit beliebigem Vollquerschnitt,
 - Dünnwandige Profile mit offenem oder geschlossenem Querschnitt,
 - Dünnwandige offene oder geschlossene Profile mit sich verjüngendem Querschnitt,
 - Flüssigkeitsgefüllte bzw. von Flüssigkeit umgebene Rohrelemente, gerade oder als Kreisbogen.
- **Platten und Schalen** :
 - Dreiecks- bzw. Viereckselement für dünne und mäßig dicke Platten und Schalen mit homogenem Querschnitt.
 - Dreiecks- bzw. Viereckselement für *Sandwichschalen*.
 - Ein dünnwandiges Dreieckselement nach der *Kirchhoff*schen Plattentheorie.
 - Dreiecks- (mit 3 oder 6 Knoten) bzw. Viereckselement (mit 4, 8 oder 9 Knoten) mit einer dreidimensionalen Schalenformulierung für lineare *und* nichtlineare Berechnungen.
 - Dreiecks- und Viereckselement für mehrschichtige Verbundwerkstoffe (*Laminate*).
- **Diskrete Elemente**:
 - Lineare und nichtlineare Federelemente,
 - verschiedene Massenelemente,
 - lineare und nichtlineare Dämpferelemente,
 - Regelemente,
 - Elemente mit direktem Matrixinput,
 - Hystereselemente.
- **Elemente für die Kontaktanalyse**:
 - Dichtungselemente, die über eine nichtlineare Druck-Verschluss-Kurve definiert sind. Diese Kurve kann auch einen Spalt enthalten, der zum nächsten Bauteil in der unbelasteten Ausgangskonfiguration besteht.
 - Kompensationsfedern gegen Grund oder zwischen 2 Knoten mit 3 Translationsfreiheitsgraden, oder zwischen 2 Knoten mit 1 Translationsfreiheitsgrad.
- **Skalare Elemente**:
 - Federelemente zwischen 2 Freiheitsgraden oder zur Abstützung eines Freiheitsgrades gegen Grund,
 - Dämpferelemente zwischen 2 Freiheitsgraden oder für einen Freiheitsgrad gegen Grund,

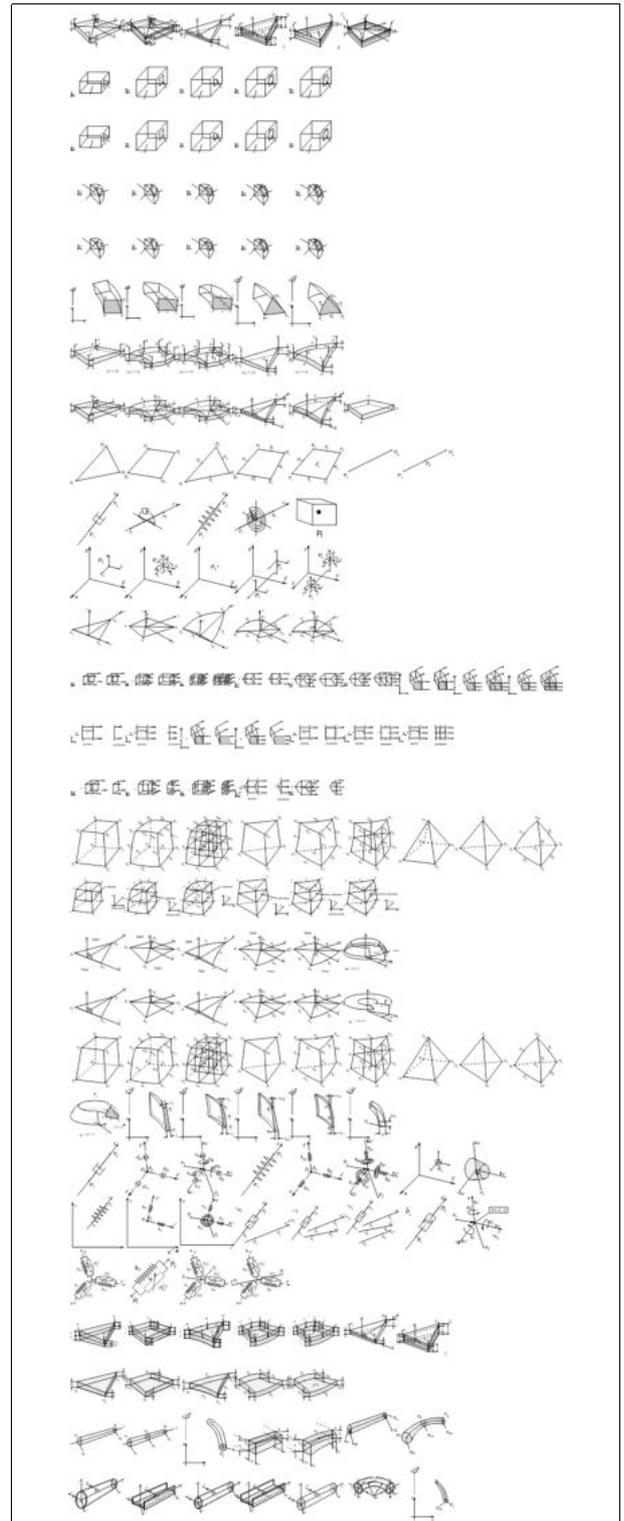


Abbildung 95: Übersicht zu den Elementtypen

- Skalare Massen für 1 oder 2 Knotenpunkte,
- Skalare Mobilität für Fluidnetze.
- **Lastelemente** für Dreiecks- bzw. Vierecksflächen zur Lasteinleitung und Spannungsauswertung.

- **Plotelemente** für Punkte, Linien, Dreiecks- bzw. Vierecksflächen zur Ergebnisdarstellung.
- **Geometrielemente** für Linien und Dreiecks- bzw. Vierecksflächen zur Beschreibung von Linien und Flächen.
- **Wärmeübergangselemente** zur Modellierung freier Oberflächen mit Wärmeübergang und Strahlung bei der Temperaturfeldanalyse
- **Fluid-Struktur Kopplungselemente** für gekoppelte Akustik und Oberflächenabsorption.
- **Oberflächenwellenelemente** für akustische Berechnungen.
- **Halbunendliche Elemente** für akustische und elektromagnetische Feldberechnungen.
- **Abstrahl-Randbedingungselemente** für die Modellierung des Abstrahlverhaltens bei akustischen Berechnungen.
- **Axialsymmetrische Elemente** für Struktur, Wärmeleitung, Akustik, Elektromagnetik.

Standard-Balkenquerschnitte

Für folgende Balkenquerschnitte werden einfache Standard-Geometrien unterstützt (siehe auch Abb. 96):

- Allgemeiner offener dünnwandiger Querschnitt,
- Dünnwandiger Kreisquerschnitt,
- Dünnwandiger Rechteckquerschnitt,
- Voller Kreisquerschnitt,
- Voller Rechteckquerschnitt.

Mit diesen Querschnitten kann man auch Spannungsergebnisse an ausgewählten Punkten der Querschnitte erhalten.

Die Querschnittsparameter können direkt als Entwurfsvariable in einer Optimierungsberechnung verwendet werden (siehe Seite 108).

Entwurfselemente für die Optimierung

Für die Zwecke der Entwurfsoptimierung (siehe Seite 108) werden die zu modifizierenden Modellteile sogenannten Entwurfselementen (Design Elements) zugewiesen. Sie werden benutzt, um die Entwurfsänderungen für alle jene finiten Elementen

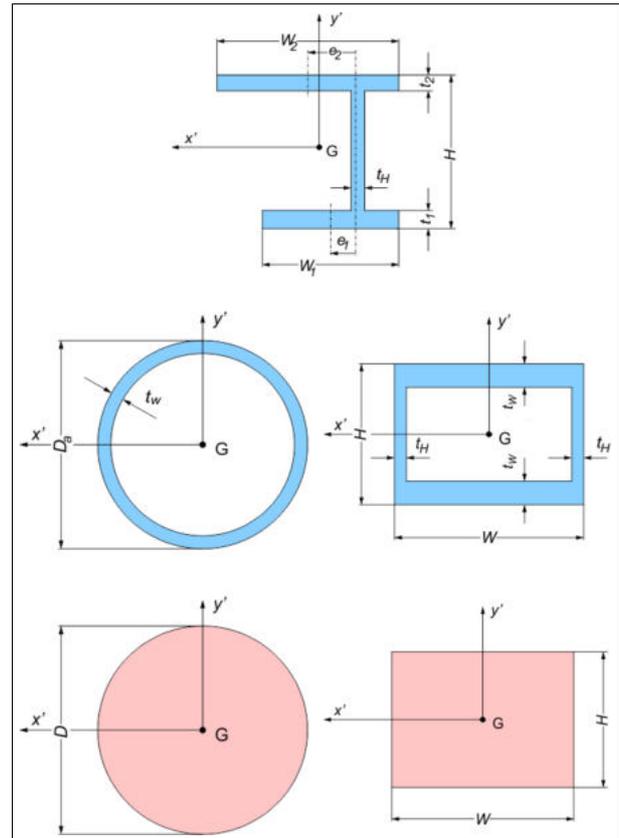


Abbildung 96: Standard-Balkenquerschnitte

ten gleichzeitig umzusetzen, die zu den Entwurfselementen gehören.

Zur einfachen Beschreibung von Formoptimierungsaufgaben stehen eine Reihe von Entwurfselementen zur Verfügung, um einzelne Elemente zu Entwurfsbereichen zusammenzufassen. Alle Arten von Finiten Elementen können dazu Teil dieser Entwurfselemente werden:

- Entwurfselement für die Formoptimierung mit einer ausgleichenden Veränderung der Elementgrößen,
- Entwurfselement für die Sicken-generierung,
- Entwurfselement für eine Freiform-Optimierung,
- Entwurfselement für die Topologie-Optimierung.

SPR Spannungen und Fehlerindikator

Die Elementgröße in Finite-Elemente-Netzen hat einen Einfluss auf die Genauigkeit der Ergebnisse (insbesondere auch auf die Spannungsergebnisse). Dabei ist aber die 'richtige' Elementgröße eine lo-

kale Eigenschaft und hängt vom Kräftefluss und seinen Gradienten ab. Insbesondere in Kerben sind die Spannungen sehr stark abhängig von der Elementgröße.

Die *SPR-Spannungen* wurden neu implementiert, um diese alternative Spannungsberechnung zu verbessern und auszubauen. Die Standard-Spannungsberechnung wurde dabei nicht verändert. Die *Smooth Patch Recovery Methode* wurde von *Zienkiewicz* angegeben. Diese Methode hat genauere Spannungen zum Ziel durch Einbeziehung mehrerer benachbarter Elemente statt jeweils nur eines Elements (siehe Abb. 97). SPR-Spannungen sind für Elementknoten (von Volumenelementen, Stabelementen, Membranelementen und Schalenelementen) und für Knotenpunkte verfügbar. Das schließt Hauptspannungen ein.

Zusätzlich zu den SPR-Spannungen werden *Spannungsgradienten* normal zu gegebenen Oberflächen berechnet. Diese Werte eignen sich auch für die Verwendung in Lebensdaueranalysen.

Zusätzlich zu den SPR-Spannungen gibt es nun einen *Absoluten Fehlerindikator* (*Absolute Error Indicator, AEI*), der die Differenz zwischen den klassischen Spannungen und den SPR-Spannungen angibt. Die Werte sind absolut, weil sie keine relative Abweichung angeben, sondern den direkten Differenzbetrag. Deshalb haben diese Werte auch dieselbe Maßeinheit wie die Spannungen.

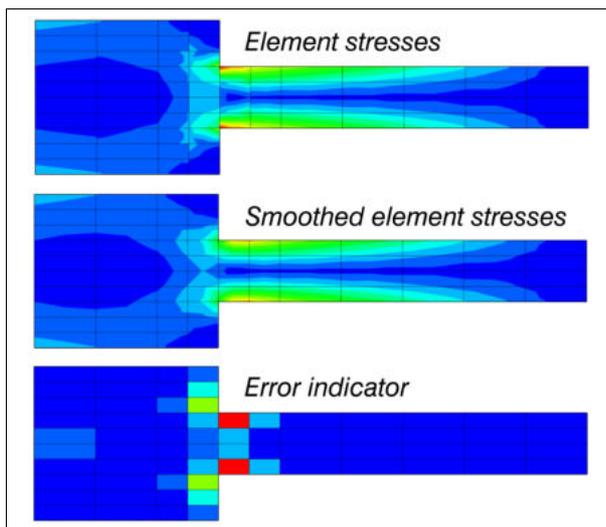


Abbildung 97: Elementspannungen, geglättete Elementspannungen und absoluter Fehlerindikator

Materialeigenschaften

Die Beschreibung des Materials erfolgt unabhängig vom übrigen Modell. Dadurch können in der Form einer Materialbibliothek die notwendigen Parameter einfach aus bestehenden Datenbeständen übernommen werden.

Neben der Isotropie können alle Arten von *Anisotropie* in einfacher und geeigneter Weise angegeben werden: transvers-isotrop, orthotrop, monoklin, allgemein (triklin).

Bedingt durch die verschiedenen Einsatzgebiete für PERMAS können sehr unterschiedliche Materialwerte angegeben werden wie Elastizität, Dichte, Kompressibilität, Dämpfung, Wärmeausdehnung, Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität, Absorption, Strömungswiderstand, elektrische Leitfähigkeit, Dielektrizität, magnetische Permeabilität. Dabei werden nur jeweils die benötigten Daten auch verwendet. Die Angabe weiterer Daten ist unschädlich.

Bei nichtlinearem Materialverhalten sind zusätzliche Eingabemöglichkeiten vorgesehen wie Spannungs-Dehnungs-Verlauf, Fließgrenze, Kriechverhalten.

Fast alle Materialwerte können temperaturabhängig definiert werden. Bei Vorgabe einer Temperaturverteilung werden die entsprechenden Materialwerte durch Interpolation aus dem angegebenen Verlauf bestimmt.

Bei der Definition der Dämpfung kann eine Frequenzabhängigkeit angegeben werden.

Geschichtete Verbundwerkstoffe (Laminate) können über die Beschreibung des Schichtaufbaus aus unterschiedlichen Materialien (wie Faserwerkstoffen) zusammengesetzt werden (siehe Seite 122).

Oftentimes, material data are confidential. In order to allow the exchange of model data without disclosing the material data, the material data can be encrypted. Then, PERMAS can read and process the material data, but they are never shown to the user.

Sets

Für eine einfache und übersichtliche Modellbeschreibung können Knoten- und Element-Sets de-

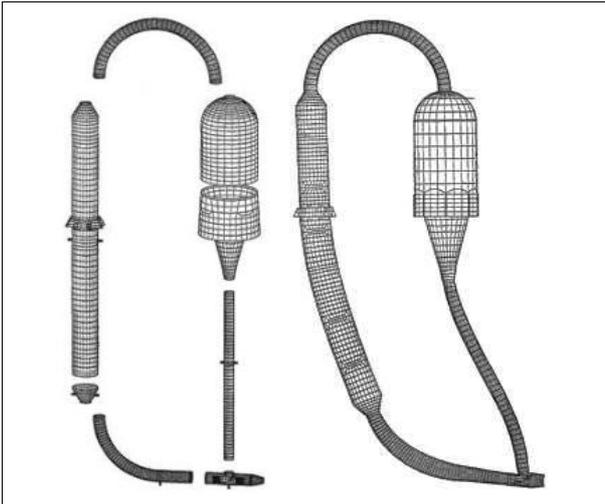


Abbildung 98: Eigenform eines Reaktors

finiert und verwendet werden. Solche Sets können auch aus anderen Sets durch Anwendung logischer Operationen zusammengesetzt werden. Darüberhinaus lassen sich mehrere Sets unter einem Oberbegriff zusammenfassen und mit einem Namen ansprechen.

Neben der Modellbeschreibung werden solche Sets auch für die Spezifikation der Ausgabe von Ergebnissen verwendet. Sowohl für die Druckausgabe der Ergebnisse als auch für die Ausgabe zu den angeschlossenen Postprozessoren kann die Menge der auszugebenden Daten durch Sets auf die jeweils wesentlichen Daten eingeschränkt werden, was insbesondere bei zeit- oder frequenzabhängigen Berechnungen die Laufzeit und den benötigten Plattenplatz erheblich reduzieren kann.

Alle Schnittstellen bewahren die Sets und ihre Identifikatoren vom Preprocessing über den Löser bis zum Postprozessor. Ein begleitender Text erleichtert dabei die nähere Bezeichnung eines Sets.

Mathematische Funktionen

Für die Beschreibung komplexer Abhängigkeiten steht eine Bibliothek von mathematischen Funktionen bereit: Polynome, trigonometrische Funktionen, exponentielle Funktionen, diskrete Funktionen. Damit werden z.B. zeitliche Belastungsverläufe oder temperaturabhängige Belastungen beschrieben.

Neben den Bibliotheksfunktionen können auch ta-

bellarische Funktionen oder Benutzerfunktionen (über Fortran- oder C-Unterprogramme) definiert und verwendet werden.

Auf all diesen Funktionen sind Summen- oder Produktbildung sowie Verkettung definierbar, um zusammengesetzte Funktionen zu beschreiben.

In VisPER ist ein Funktionsdialog verfügbar, mit dem Funktionen erstellt, verändert und dargestellt werden können (siehe Abb. 99).

Zusätzlich steht eine Funktion zur Ermittlung der *Fourier*-Koeffizienten eines Zeitsignals zur Verfügung. Damit können zeitabhängige Anregungen über eine Fourier-Transformation in frequenzabhängige Anregungskoeffizienten gewandelt werden, welche in einer Frequenzganganalyse verarbeitet werden (siehe Abb. 100).

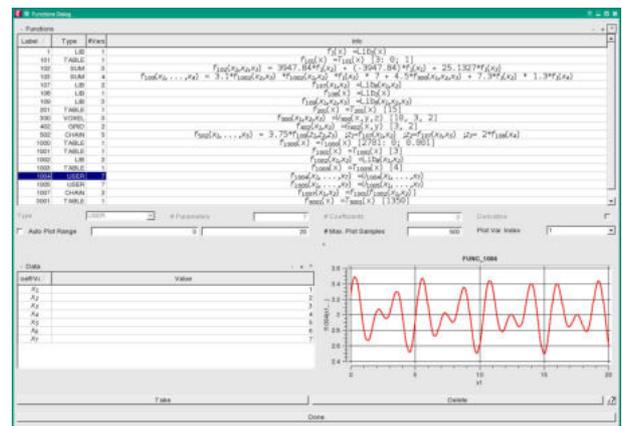


Abbildung 99: Funktionserstellung mit VisPER

Lasten

Für statische Berechnungen können die folgenden mechanischen Lasten verwendet werden:

- Globale Lasten:
 - Trägheitslasten,
 - *Inertia Relief* (quasistatische Beschleunigung).
- Knotenlasten:
 - Punktlasten,
 - verteilte Lasten,
 - vorgeschriebene Verschiebungen,
 - Temperaturlasten,
 - Kontaktparameter.

- Elementlasten:
 - verteilte Lasten,
 - Anfangsdehnungen.
- Flächenlasten:
 - verteilte Lasten,
 - hydrostatischer Druck.

Für verteilte Oberflächenlasten, die z.B. nicht an den Knoten eines Netzes spezifiziert sind, sondern einem größeren Raster folgen, können spezielle Lastelemente (siehe Seite 65) verwendet werden, die dann über Interpolation (siehe Seite 62) mit der Hauptstruktur verbunden werden.

Für Temperaturfeld-Berechnungen können die folgenden thermischen Lasten verwendet werden:

- Knotenlasten:
 - Punktwärmeflüsse,
 - verteilte Wärmeflüsse,
 - vorgeschriebene Temperaturen.
- Elementlasten:
 - verteilte Wärmeflüsse.

Temperaturverteilungen können direkt aus den Ergebnissen einer vorherigen Wärmeleitungsrechnung übernommen werden. Dabei kann angegeben werden, welche Temperaturverteilung für die Temperaturabhängigkeit des Materials verwendet wird und welche Temperaturverteilung für die Berechnung von Anfangsdehnungen bzw. als Anfangsbedingung einer instationären thermischen Berechnung eingesetzt wird.

Alle verteilten Elementlasten können ortsabhängig definiert werden.

Lastfallkombinationen können auf existierende Lastverteilungen angewandt werden.

Zeitabhängige Lasten werden auf einfache Weise als Produkt einer statischen oder thermischen Last mit einer zeitabhängigen Funktion beschrieben. Zusätzlich können Anfangsbedingungen für zeitabhängige mechanische oder thermische Berechnungen beschrieben werden. Diese lassen sich einfach aus vorhergehenden Berechnungen übernehmen.

Für frequenzabhängige dynamische Lasten gilt, dass sie als Produkt einer statischen Last mit einem Amplituden- und Phasen-Spektrum gebildet werden.

Zeitabhängige Lasten eines periodischen Prozesses können durch eine *Fourier*analyse automatisch

auf frequenzabhängige Lasten transformiert werden (siehe Abb. 100). Damit lassen sich dann ein oder mehrere Frequenzganganalysen durchführen. Durch eine Überlagerung der Ergebnisse im Zeitbereich kommt man dann wieder zu periodischen Antworten.

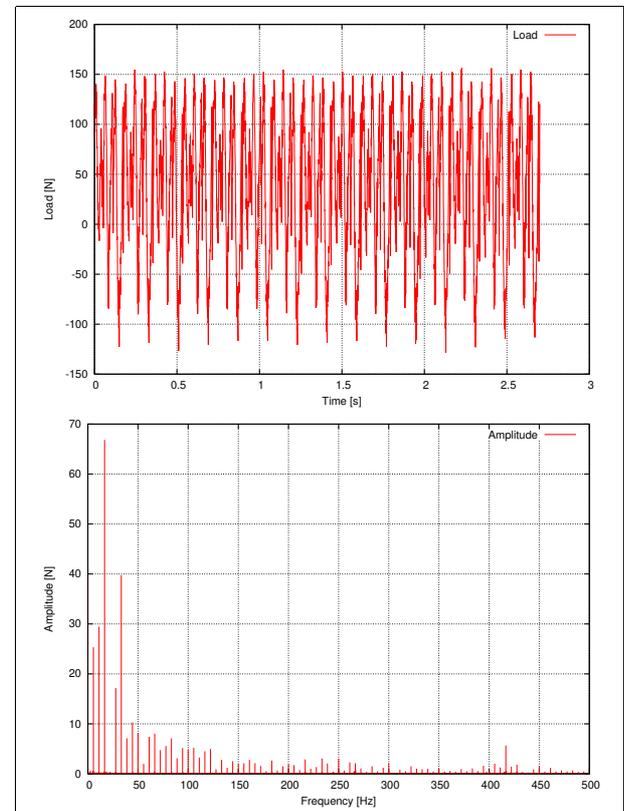


Abbildung 100: Beispiel für Fourieranalyse einer periodischen Last (oben im Zeitbereich, unten im Frequenzbereich)

Verifikation von Modellen

Mit steigender Komplexität der Modelle wächst die Notwendigkeit, die Richtigkeit der Modelle zu verifizieren. PERMAS stellt daher verschiedene Modellparameter in einer Form zur Verfügung, dass sie wie ein Ergebnis in einem Postprozessor dargestellt werden können.

Ganz allgemein ist es ein wichtiges Arbeitsprinzip, dass alle Modelldaten, die man beschreibt auch verifizieren kann, sei es durch Visualisierung oder andere Prüfungsmöglichkeiten. Das gilt um so mehr für automatisch generierte Modelldaten, welche die Modellbeschreibung deutlich erleichtern können.

Mit VisPER wird die Verifikation von Modellen sehr vereinfacht. Man kann sich das Modell und einzelne Eigenschaften genau ansehen und man kann die verschiedenen Daten, die PERMAS für die Verifikation ausgibt, entsprechend visualisieren (siehe die nachfolgenden Beispiele). Für PERMAS-Modelle ist VisPER das empfehlenswerte Werkzeug zur Verifikation.

Die nachfolgende Liste enthält einige Beispiele für Verifikationshilfen:

- Das Ergebnis der Elementtests wird exportiert, um fehlerhafte Elemente zu identifizieren.
- Die mittlere Elementdicke an den Knoten kann ausgegeben werden, um die Dickenverteilung in einer Schalenstruktur zu überprüfen.
- Starrkörper-Verschiebungsformen, die bei einer statischen Analyse gefunden werden, werden ausgegeben und können zur Verifikation der Lagerbedingungen verwendet werden.
- Für Interpolationsgebiete (siehe MPCs auf Seite 62) werden die Abstandsvektoren ausgegeben, um das Ergebnis der automatischen Interpolation zu verifizieren.
- Für Schweißpunktverbindungen werden die automatisch generierten Aufstandsvektoren ausgegeben (siehe Abb. 91).
- VisPER kann für die Überprüfung von verteilten Lasten eingesetzt werden (sogar bei solchen, die eine ortsabhängige Funktion enthalten).
- Element-Temperaturlasten und verteilte Knoten-Temperaturlasten können wie ein Temperaturergebnis zur Visualisierung exportiert werden.
- Anfangsdehnungen stehen für die Darstellung ebenfalls zur Verfügung.
- Für Kontaktmodelle stehen eine ganze Reihe von Größen zur Verifikation zur Verfügung, wie die Kontaktbeschreibung, die Kontaktgeometrie, das Kontakt-Koordinatensystem, der Anfangskontaktzustand, die Anfangsspaltbreite (siehe Abb. 101).
- Für die Schraubenvorspannung werden eine Reihe zusätzlicher Beschreibungsgrößen bereitgestellt, wie Vorspannungsbeschreibung, das Vorspann-Koordinatensystem, die Vektoren für die Gewindenvorspannung (Flankennormale, Flankentangente und Steigungsrichtung).
- In einer Wärmeleitungsrechnung mit Wärmeaustausch durch Strahlung kann die abstrahlende Oberfläche automatisch vergrößert werden. Das vergrößerte Oberflächennetz kann zur

Überprüfung ausgegeben werden.

- Bei der Fluid-Struktur-Kopplung können die Kopplungselemente und ihre Ausrichtung überprüft werden.
- In der Optimierung können die Entwurfselemente mit VisPER überprüft werden (siehe Seiten 46 und 47). Daneben kann auch die Zuweisung von finiten Elementen zu den Entwurfselementen verifiziert werden.

Für eine Reihe von Eingabedaten kann PERMAS Postscript-Dateien mit *gnuplot* zur Visualisierung erzeugen (wenn *gnuplot* auf der verwendeten Maschine verfügbar ist). Ansonsten werden *gnuplot*-Kommandodateien generiert und die Tabelle mit den xy-Werten wird auf einer Datei bereitgestellt. Diese Möglichkeit zur Visualisierung besteht für die Eingabe der Lastgeschichte (siehe Seite 81), für Spannungs-Dehnungs-Kurven und für transiente Lastkurven einer Schwingungsberechnung im Zeitbereich.

Schnittstellen

Die Integration des Solvers in die Pre- und Postprozessorumgebung steht in der Schnittstellenentwicklung an erster Stelle. Deshalb sind in PERMAS die Schnittstellen direkt und ohne Zusatzprogramme integriert. Sie werden 'Doors' genannt und ermöglichen einen möglichst direkten Zugriff zu den Originaldaten. Über die Modellbeschreibung hinaus werden für bestimmte Schnittstellen auch Standard-Lösungen unterstützt, welche die Arbeitsumgebung noch komfortabler gestalten.

Neben den eigenen Ein- und Ausgabeformaten bietet PERMAS Doors sowohl zu verschiedenen Pre- und Postprozessoren als auch zu Modelldaten fremder FE-Programme:

- VisPER (Seite 41)
- MEDINA (Seite 127)
- PATRAN (Seite 127)
- I-DEAS (Seite 127)
- ADAMS (Seite 128)
- SIMPACK (Seite 128)
- EXCITE (Seite 128)
- MOTIONSOLVE (Seite 129)
- HYPERVIEW (Seite 129)
- VAO (Seite 129)

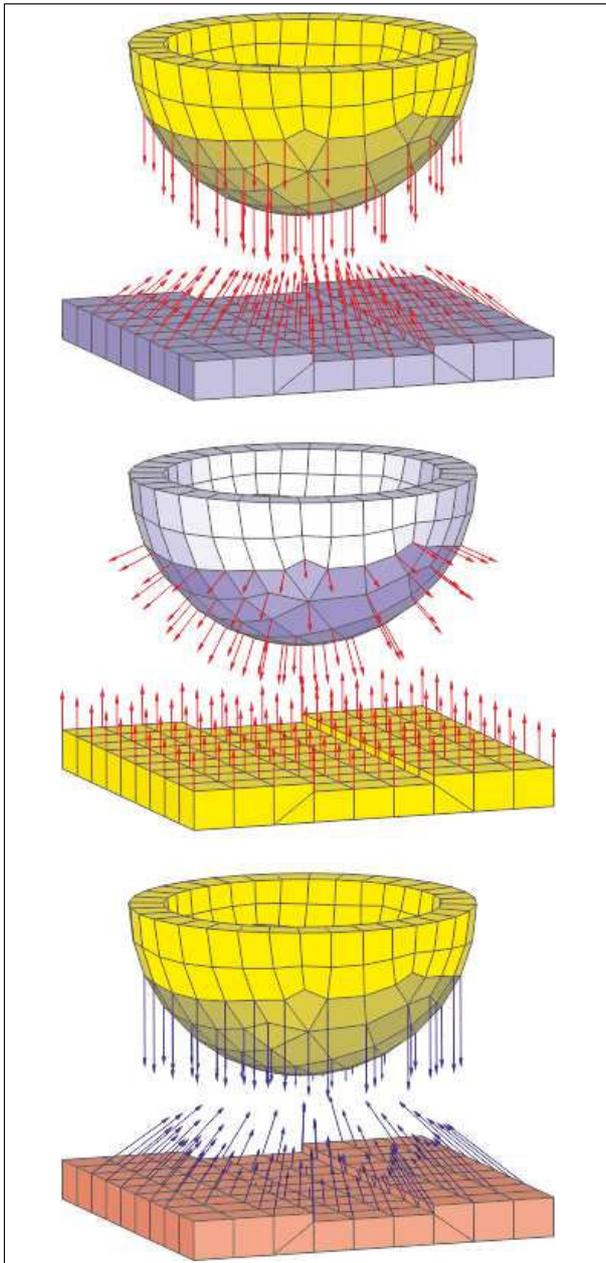


Abbildung 101: Verifikation eines Kontaktmodells
 Oben: Kontakt-Normalenvektor
 Mitte: Flächen-Normalenvektor
 Unten: Fußpunktvektor

- Virtual.Lab (Seite 129)
- ADSTEFAN (Seite 130)
- MATLAB (Seite 130)
- NASTRAN (Seite 130)
- ABAQUS (Seite 131)
- MpCCI (Seite 132)

Außerdem ist eine wachsende Anzahl von weiteren Schnittstellen verfügbar, die von INTES oder Partnerfirmen angeboten werden (siehe Seite 133).

Die hervorragende Anbindung an andere CAE-Produkte bietet besondere Vorteile für alle Anwender, die mit einer heterogenen Pre- und Postprozessor-Umgebung arbeiten müssen.

Auf der **Eingabeseite** werden die kompletten FE-Modelle als eigenständige PERMAS-Struktur eingelesen. Einzelne Teile lassen sich bei Bedarf mittels eines zusätzlichen PERMAS Datenfiles kombinieren oder ergänzen.

Auf der **Ausgabeseite** können die Berechnungsergebnisse in verschiedener Form ausgegeben werden (Listing, xy-Plotfiles, verschiedene Postprozessor-Formate). Darüber hinaus lässt sich auch das gesamte FE-Modell – unabhängig von der Modelleingabe – als PERMAS Datenfile oder als Darstellungsmodell in den verschiedensten Pre- und Postprozessor-Formaten ausgeben.

Für den direkten Export von PERMAS-Modell und -Ergebnissen steht ein ASCII- und ein Binärformat zur Verfügung. Die exportierten Modelldaten und Ergebnisse können dann mit VisPER zum Postprocessing gelesen werden, aber auch PERMAS selbst kann zumindest Modell und Primärergebnisse in diesen Formaten lesen.

Das ASCII-Format wird in einem (mit *gzip*) komprimierten Format geschrieben. Für den Export von PERMAS-Ergebnissen im Binärformat wird die vielfach genutzte *HDF5*-Bibliothek verwendet (siehe <https://www.hdfgroup.org/HDF5/>). Der Haupteffekt dieses Binärformats ist die Zeitersparnis beim Exportieren der Ergebnisse. Außerdem reduziert sich auch die Dateigröße verglichen mit dem komprimierten ASCII-Format.

Die Auswertung auch größter Modelle wird durch umfangreiche Selektionsmöglichkeiten beim Datenexport unterstützt. Neben der Auswahl von Lastfällen, Zeitschritten und Frequenzpunkten kann durch Angabe eines Knoten- oder Elementsets die Teilmenge der exportierten Daten spezifiziert werden.

Das hochstufige Door-Konzept bietet mehrere **Vorteile**:

- Hoher Komfort:
 - Keine externen Wandler notwendig,
 - Gleichartige Abstimmung für alle Schnittstellen,
 - kein Zwischenformat notwendig.
- Der Übersetzungsvorgang ist sehr schnell.

- Einfaches **Mischen möglich**:
 - Mehrere Einzelmodelle können zu einem großen Gesamtmodell zusammengesetzt werden, unabhängig davon, durch welches Input-Door die Modellfiles eingelesen wurden.
 - Die Definition eines FE-Modells kann auf mehrere Files verteilt werden, um so alle Möglichkeiten verschiedener Eingabeformate auszunutzen.
- Eingaben anderer FE-Formate können auch dann umgesetzt werden, wenn das PERMAS-eigene DAT-Format keine direkte Entsprechung bietet.

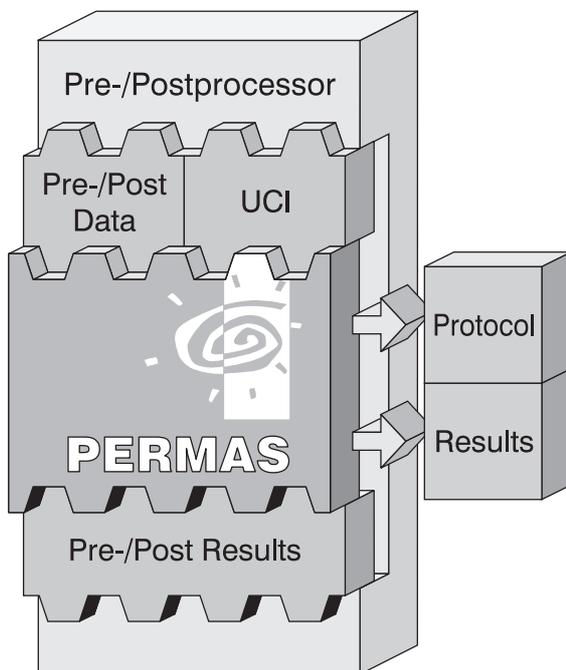


Abbildung 102: Integration von PERMAS im Pre- und Postprozessor

- Die Qualitätssicherung wird erleichtert:
 - Gemeinsame Konsolidierung der gesammelten Eingabedaten (sorgfältige Modelltests).
 - Externe Identifikatoren bleiben über den ganzen PERMAS-Lauf erhalten.
 - Zusätzliche Eingaben können auf einem eigenen File angegeben werden – der Originalfile bleibt unverändert.
 - Durch das Mischen verschiedenartiger Files kann der Benutzer für einzelne Definitionen jeweils das Eingabeformat verwenden, das ihm am besten geeignet erscheint. Normalerweise ist dies auch diejenige Definitionsart, bei der Eingabefehler am besten vermeidbar

sind.

- Da das Exportformat unabhängig vom Input-Door gewählt werden kann, ist PERMAS in der Lage, jedes Preprozessor-Format in ein beliebiges anderes Postprozessor-Format umzuwandeln.

Matrizenmodelle

PERMAS Datenobjekte wie Ergebnisse und Matrizen können auf verschiedene Weise binär oder im ASCII-Format auf externe Dateien geschrieben oder von dort eingelesen werden.

Diese Möglichkeit kann zum einen genutzt werden, um selbst einen Datenaustausch mit Drittprogrammen zu organisieren. Zum anderen können auch z.B. Matrizen zu einem späteren Gebrauch in PERMAS selbst zwischengespeichert werden, um Rechenzeiten zum Erstellen der Matrizen zu sparen.

Eine typische Anwendung ist die Zwischenspeicherung kondensierter Modelle. Dabei kann zusätzlich zu den kondensierten Matrizen auch das kondensierte Modell erstellt und exportiert werden, um es in einem späteren Lauf wiederzuverwenden. Für eine detaillierte Nachverarbeitung können die Ergebnisse danach wieder auf die Modelle rücktransformiert werden. Dabei können Matrizengrößen und Ergebnisumfänge im Voraus durch Sets eingeschränkt werden.

Kondensierte Matrizen für Teilstrukturen kommen z.B. neben statischen Analysen vor allem bei Eigenwertanalysen und Schwingungsanalysen im Zeit- und Frequenzbereich zum Einsatz. Dort werden neben Steifigkeits- und Massenmatrizen auch Eigenwerte, Eigenformen, Lasten und Dämpfungsmatrizen bereitgestellt. Zusätzliche statische Verschiebungsformen können ebenfalls berücksichtigt werden.

Eine weitere Anwendung besteht in der Generierung von modalen Modellen (z.B. durch *verallgemeinerte modale Kondensation*, siehe Seite 97). Diese modalen Modelle können für eine Berechnung des dynamischen Antwortverhaltens außerhalb von PERMAS verwendet werden.

Alle Standard-ASCII-Ausgabedateien können als

komprimierte Dateien erzeugt werden (gzip) und sparen so Plattenplatz und Zeit (bei großen Dateien). Da auch die Eingabe direkt von solchen komprimierten Dateien erfolgen kann, müssen Ein- und Ausgabedateien nicht mehr explizit in vollem ASCII-Format gespeichert werden.

Spezielle Formate für die Ausgabe von Matrizen sind das MATLAB-Format und das *Rutherford-Boeing*-Format.

Kombination von Ergebnissen

Verschiedene Primär- und Sekundär-Ergebnisse können nach der Berechnung zu neuen Ergebnissen kombiniert werden. Dafür stehen verschiedene Summationsregeln oder mathematische Funktionen (siehe Seite 68) zur Verfügung. Die kombinierten Ergebnisse können dabei auch aus verschiedenen Variantenlösungen stammen.

Die erzeugten Ergebnisse können bestehende Ergebnisse überschreiben oder neue generieren. Die Ausgabe der neuen Ergebnisse ist genauso möglich wie diejenige der ursprünglichen Ergebnisse.

In VisPER sind eine Vielzahl von arithmetischen Operationen auf Ergebnis-Kombinationen möglich (wie die Differenz von kinetischer Energiedichte und Dehnungsenergiedichte). Jede einzelne Spalte kann als Operand verwendet werden. Alle PERMAS-Funktionen mit übereinstimmender Anzahl von Eingabedaten können ebenso verwendet werden (wie die Logarithmusfunktion zur Auswertung von Schallpegeln).

Transformation von Ergebnissen

Alle Knotenergebnisse liegen nach der Berechnung im Koordinatensystem der jeweiligen Komponente vor. Aus diesem System können folgende Transformationen vorgenommen werden:

- In das Verschiebungs-Koordinatensystem des jeweiligen Knotens.
- In ein spezifisches Koordinatensystem für alle Knoten (kartesisch, zylindrisch, sphärisch).
- Mit einer speziellen Transformation für jeden

einzelnen Knoten.

Alle durchgeführten Transformationen lassen sich wieder in das Komponentensystem zurückführen.

Neben der Transformation reeller Ergebnisse können auch komplexe Ergebnisse einer Frequenzganganalyse in ein anderes Koordinatensystem transformiert werden.

Vergleich von Ergebnissen

Für den Vergleich von Ergebnissen in der Dynamik stehen folgende Möglichkeiten zur Verfügung:

- **MAC**: Modal Assurance Criterion
Vergleicht zwei Eigenwertberechnungen mit gleicher Knotenzahl aus verschiedenen Situationen auf Übereinstimmung der Eigenformen. MAC-Faktoren werden wie folgt berechnet:

$$MAC = \frac{(\mathbf{X}_1^t \mathbf{X}_2)^2}{diag(\mathbf{X}_1^t \mathbf{X}_1) diag(\mathbf{X}_2^t \mathbf{X}_2)}$$

- **CoMAC**: Coordinate Modal Assurance Criterion
Vergleicht zwei Eigenwertberechnungen mit gleicher Knotenzahl aus verschiedenen Situationen auf Übereinstimmung der Eigenformen. CoMAC-Faktoren werden wie folgt berechnet:

$$COMAC = \frac{diag(\sum_{m=1}^M |\mathbf{X}_1^m \mathbf{X}_2^m|)^2}{diag(\sum_{m=1}^M \mathbf{X}_1^m)^2 \quad diag(\sum_{m=1}^M \mathbf{X}_2^m)^2}$$

Das Ergebnis gibt ein Maß für die Übereinstimmung der Vektorsätze in jeder Freiheitsgradrichtung.

- **COF**: Cross Orthogonality Factors
Vergleicht zwei Eigenvektorsätze mit gleicher Anzahl von Freiheitsgraden aus verschiedenen Situationen. COF-Faktoren werden wie folgt gerechnet:

$$COFM = \mathbf{X}_1^t \mathbf{K} \mathbf{X}_2; \quad COF = COFM^t COFM.$$

Alle Vergleiche können zwischen zwei Varianten eines Modells erfolgen, wobei für die zu vergleichenden Modellteile entsprechende Knotensets ausgewählt werden können.

Eine mögliche Anwendung der MAC-Faktoren ist der Vergleich von Ergebnissen einer *Experimentellen Modal-Analyse* und einer FE-Berechnung. (siehe Seite 39).

XY-Ergebnisdaten

Auf der Basis von Element- oder Knotensets können direkt xy-Daten erzeugt und auf den angeschlossenen Ausgabedateien zur grafischen Ausgabe bereitgestellt werden.

Üblicherweise werden xy-Daten so erzeugt, daß die Abszisse durch die Spalte gegeben ist (wie Lastfall, Iteration) und die Ordinate den jeweiligen Wert repräsentiert. Sind die Spalten mit bestimmten Werten (wie für Frequenzen, Zeit, Lastfaktoren) hinterlegt, werden diese Werte für die Abszisse verwendet.

Als Sonderfall ist es für Knotenergebnisse auch möglich, die Koordinatenwerte für die Abszisse zu verwenden (um z.B. die Steifigkeit eines Bauteils zu bewerten). Dabei werden die Koordinaten der ausgewählten Knoten in aufsteigender Reihenfolge angeordnet. Ein lokales Koordinatensystem kann dabei für die Auswahl der Richtung verwendet werden.

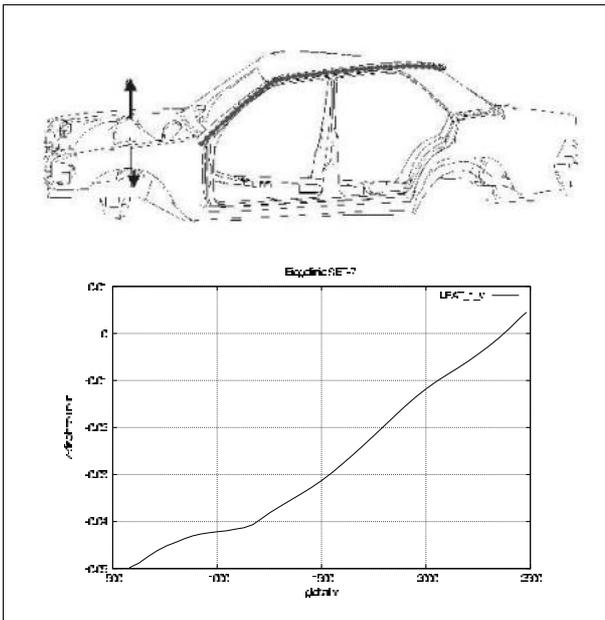


Abbildung 103: Ermittlung einer Biegelinie unter Torsion (Verschiebung für die markierten Knoten)

Für eine Reihe von Eingabedaten kann PERMAS Postscript-Dateien mit *gnuplot* zur Visualisierung erzeugen (wenn *gnuplot* auf der verwendeten Maschine verfügbar ist). Ansonsten werden *gnuplot*-Kommandodateien generiert und die Tabelle mit den xy-Werten wird auf einer Datei bereitgestellt. Diese Möglichkeit zur Visualisierung besteht für die Eingabe der Lastgeschichte (siehe Seite 81),

für Spannungs-Dehnungs-Kurven und für transiente Lastkurven einer Schwingungsberechnung im Zeitbereich.

Innerhalb der *PERMAS Tools* können XY-Graphen mit *PERMASgraph* erstellt werden (siehe Seite 139).

Schnittkräfte

Auf der Basis von Element- und Knoten-Sets können die Schnittkräfte in einem Bauteil an nahezu beliebiger Stelle ermittelt und für das Postprocessing ausgegeben werden. Außerdem wird die Summe der Kräfte und Momente in bezug auf einen ausgewählten Punkt berechnet und ausgegeben (siehe Abb. 104).

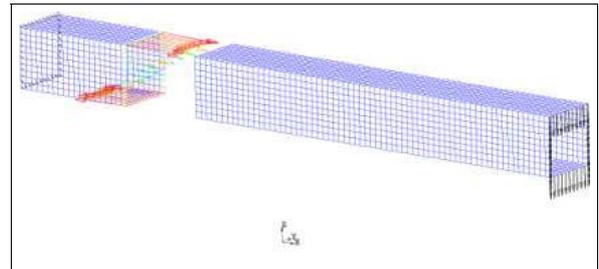


Abbildung 104: Ermittlung von Schnittkräften

Maßeinheiten

Die Verwendung konsistenter Maßeinheiten für alle Eingabedaten liegt in der Verantwortung des Anwenders.

Bei der Verarbeitung spielen Toleranzen für Längenmaße (wie Koordinatenabweichungen, Spaltgrößen) eine große Rolle. Als Standard werden dabei Modelle in Millimeter vorausgesetzt. Alle diese Längentoleranzen können z.B. auf Metermaße durch Angabe eines Umrechnungsfaktors (z.B. 1.E-3) angepasst werden, so dass die Toleranzen ihren absoluten Wert behalten.

Restart

Jede PERMAS-Berechnung legt eine Datenbasis an, welche für Folgeäufe verwendet werden kann. Dabei steht jeweils der zuletzt vorhandene Zustand nach dem Restart zur Verfügung. So sind auch alle Zwischenergebnisse vorhanden, welche vielleicht nur sehr rechenintensiv zu erstellen waren.

Auf diese Weise können z.B. verschiedene Lastvarianten in mehreren Folgeäufen bearbeitet werden, ohne dass die Steifigkeitsmatrix jedesmal neu erstellt und zerlegt werden muß.

Offenes Softwaresystem

PERMAS ist ein offenes System in dem Sinne, dass benutzereigene Programme in jeden einzelnen Programmablauf eingebunden und während des Laufs aufgerufen werden können.

Dies wird zum einen dazu verwendet, dem Benutzer alle Freiheiten bei der Definition von Datenabhängigkeiten zu geben, z.B. bei benutzerdefinierten mathematischen Funktionen (siehe Seite 68).

Zum anderen kann PERMAS als Unterprogramm-Bibliothek verwendet werden, um eigene Lösungen oder Daten-Auswertungen zu programmieren. Diese werden dann an der angegebenen Stelle des Programmablaufs ausgeführt.

Als Programmiersprache steht auf jeden Fall Fortran 77/90 und auf manchen Anlagen auch C zur Verfügung. Die PERMAS Bibliotheksroutinen liegen als Fortran-Programme vor.

Um unabhängig von einem Compiler zu sein, besteht auch die Möglichkeit für bestimmte Operationen Skripte auf der Basis von *Python* während einer Berechnung zu verwenden.

Gekoppelte Analysen

PERMAS erlaubt verschiedene gekoppelte Analysen in einer Berechnung, z.B.:

- Anfangswerte für eine zeitabhängige dynamische Analyse aus einer vorher durchgeführten

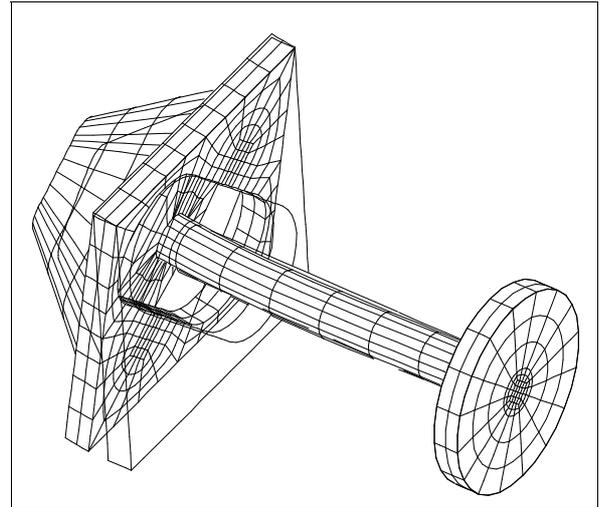


Abbildung 105: Kupplungselement
statische Verformung

statischen Analyse.

- Anfangswerte für eine transiente Wärmeleitungsrechnung aus einer vorhergehenden Berechnung gleicher Art.
- Eine Wärmespannungsberechnung auf der Basis einer zuvor durchgeführten Wärmeleitungsrechnung.
- Eine Wärmeleitungs- oder Mechanikrechnung nach einer elektromagnetischen Analyse.
- Eine (voll) gekoppelte Fluid-Strukturanalyse.
- Alle Optimierungsberechnungen, wenn dabei verschiedene Analysearten (wie Statik und Eigenwerte) gleichzeitig einbezogen werden.

Für alle Arten von gekoppelten Analysen gilt, dass die gleichen Elementtypen für alle Teilanalysen verwendet werden können. Soweit das sinnvoll ist, steht jedes Element für alle Analysetypen zur Verfügung.

Kopplung zu CFD

Eine Strukturmechanik-Fluiddynamik-Kopplung wurde im Rahmen des ESPRIT Projektes CIPAR über einen iterativen Kopplungsansatz realisiert.

Dazu wurde im Rahmen des Projektes von FhG/SCAI eine Kopplungsbibliothek (COCOLIB) entwickelt, welche eine lose Kopplung eines Strukturmechanik-Programms (CSD) und eines Fluiddynamik-Programms (CFD) ermöglicht. Dabei

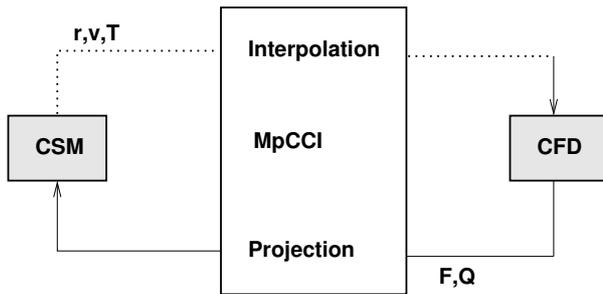


Abbildung 106: Kopplung von CFD und CSM

laufen beide Software-Pakete gleichzeitig und unabhängig voneinander, und der Datenaustausch geschieht zur Laufzeit nach vorher festgelegten Kriterien und bestimmten Algorithmen (Gauss-Seidel, Jacobi). Diese Software wurde weiterentwickelt unter dem Namen *MpCCI* (mehr Informationen unter www.mpcci.org).

Die übertragenen Randbedingungen umfassen thermische und mechanische Größen (Kraft \mathbf{F} bzw. Druck, Wärmestrom \mathbf{Q} , Verschiebung \mathbf{r} , Geschwindigkeit \mathbf{v} , Temperatur \mathbf{T}). Dabei sorgt die Kopplungsbibliothek für die notwendige Interpolation bzw. Projektion dieser Werte bei in der Regel inkompatiblen Netzen für Struktur und Fluid.

Die Aufrufe zur *MpCCI* wurden in PERMAS integriert. Somit kann mit jedem CFD-Programm, das an MpCCI angeschlossen ist, eine entsprechende CFD-Kopplung für rein mechanische, thermische oder thermisch-mechanische Anwendungen erfolgen. Mit dem Modul PERMAS-CCL stehen alle Funktionen zur Verfügung, um die CFD-Kopplung durchzuführen.

PERMAS Berechnungsmodule

PERMAS-MQA – Modell Qualitätssicherung

Das Basismodul PERMAS-MQA ist die Grundlage für alle weiterführenden Programm-Module.

Dieser *Systemkern* enthält u.a. das Datenverwaltungssystem, die Kommandosprache UCI, die Standard-Ein/Ausgabe für PERMAS Daten- bzw. Ergebnisfiles, die Modellkonsolidierung, die *Teilstrukturtechnik*, zahlreiche Elementtypen sowie das *Sampling* für Parameterstudien.

Das besondere Merkmal von PERMAS-MQA sind jedoch die in ihm verwirklichten Konzepte und Werkzeuge zur **Qualitätssicherung** des Berechnungsprozesses und zur Untersuchung von Einflüssen verschiedener Modellparameter durch **Sampling**.

Der **Qualitätssicherung** kommt auch im Rahmen von FE-Berechnungen eine immer größere Bedeutung zu.

- FE-Berechnungen werden heute vorwiegend in der Produktentwicklungsphase eingesetzt, um frühzeitig verschiedene Entwurfsvarianten zu bewerten und damit den Entwicklungsprozess zu beschleunigen.
- Der Benutzerkreis wandelt sich vom FEM-Experten hin zu Anwendern mit allgemeinerem Hintergrund.
- Die Anwendungen werden immer komplexer.

Unter **Sampling** (als *Design Exploration*) versteht man dabei die wiederholte Ausführung von Analysen, wobei die zu untersuchenden Parameter explizit vorgegeben werden. Ein Beispiel ist in Abb. 31 zu sehen. Das Sampling kann wie die Optimierung oder die Zuverlässigkeitsanalyse verwendet werden. Alle möglichen Entwurfsvariablen (siehe Seite 108) oder Basisvariablen (siehe Seite 118) können für das Sampling verwendet und alle Berechnungen, die von der Optimierung (siehe Seite 108) oder der Zuverlässigkeitsanalyse (siehe Seite 118) unterstützt werden, können beim Sampling eingesetzt werden. Für die gewünschten Ergebnisse sammelt das Sampling alle Daten ein und bereitet die Ausgabe von entsprechenden XY-Daten vor. Als Beispiele für geeignete Modellparameter kommen z.B. geometrische Parameter, E-Moduln für Steifigkeitsuntersuchungen oder verschiedene Lastparameter

in Frage. Um bei einer größeren Anzahl von Werten mehrerer Parameter die Anzahl von Analysen so klein wie möglich zu halten, steht eine spezielle Sampling-Methode (*LHC Latin Hypercube Sampling*) zur Verfügung.

Neben der Qualität der Software (siehe Seite 18) hängt die Zuverlässigkeit von FE-Ergebnissen auch von folgenden Punkten ab:

- **Modelltests mit VisPER:**
PERMAS-MQA ist auch das Basismodul von VisPER, so dass alle Tests in diesem Modul auch mit VisPER verfügbar sind. Dort stehen aber zusätzlich Visualisierungsmöglichkeiten zur Verfügung, die das Verständnis der gemeldeten Probleme und ihre Behebung deutlich erleichtern.
- **Umfangreiche Modelltests:**
PERMAS führt sehr intensive Tests der Eingabedaten durch. Mit mehreren Tausend verschiedener Systemmeldungen im Klartext wird selbst auf komplexe Widersprüchlichkeiten reagiert. Insbesondere die automatische Ermittlung von Singularitäten kann dem Anwender viel Zeit sparen (siehe Seite 64).
- **Vermeidung von Berechnungsfehlern:**
Um Fehlläufe zu vermeiden besitzt PERMAS einen **Task-Scanner**:
 - Einzelne Berechnungsschritte werden gruppiert und die Durchführbarkeit der Gesamtrechnung wird vor Berechnungsstart überprüft.
 - Ressourcen (Rechenzeit und Plattenplatz) werden schon am Anfang abgeschätzt.
 - Die eingelesenen Modelldaten und deren Bezug zu den angeforderten Berechnungsschritten werden auf Vollständigkeit und Verträglichkeit überprüft.
 - Mit dem Task-Scanner können Abstimmung und Dateneingabe auch von solchen PERMAS-Modulen getestet werden, welche auf der aktuell genutzten Plattform nicht lizenziert sind.
 - Die Modellprüfungen können in interaktiver Arbeitsweise ergänzend zu den Tests im Preprozessor durchgeführt werden.
- **Entlastung des Benutzers:**
Die komfortablen Eingabemöglichkeiten, direkte Schnittstellen und die genannten Testwerkzeuge nehmen lästige Routinearbeit ab und verbes-

sern die Übersichtlichkeit. Dadurch kann sich der Anwender vermehrt auf sein eigentliches Berechnungsziel und die Ergebnisauswertung konzentrieren.

Insbesondere die komfortablen Schnittstellen sorgen für eine reibungslose Datenübernahme aus dem Preprocessing (siehe Seite 70).

Für eine verbesserte Kommunikation mit *SDM* (*Simulation Data Management*)-Systemen gibt es die Möglichkeit, jede Größe der Modellbeschreibung in beliebiger Ausführlichkeit zu erläutern. Die Texte werden so entweder direkt Teil der Modell-Dateien oder sie können mit externen Dateien verknüpft sein (auch mit *XML*-Dokumenten).

PERMAS Paket TM / Thermo-Mechanik

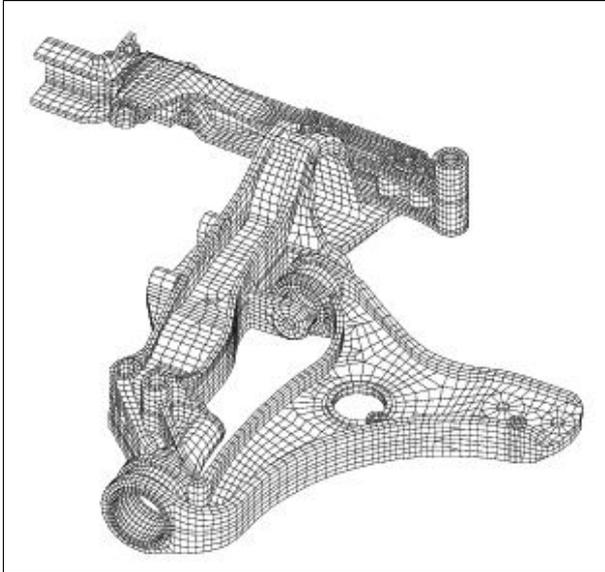


Abbildung 107: Vorderachsmodell
Porsche AG, Weissach

PERMAS-LS – Lineare Statik

Dieses Modul erlaubt alle linearen elasto-statischen Berechnungen unter der Voraussetzung von kleinen Dehnungen und linearem Materialverhalten (isotrop oder anisotrop). Es bildet daher meist den Einstieg in die FE-Anwendungen.

- Für die Definition von kinematischen Randbedingungen werden unterschieden:
 - unterdrückte Freiheitsgrade,
 - vorgeschriebene Verschiebungen und
 - lineare Zwangsbedingungen (*MPCs*) (siehe Seite 62).
- Für freie oder nur teilweise gelagerte Strukturen kann eine quasistatische Analyse durchgeführt werden (*Inertia Relief*). Dabei werden auf der Basis einer Starrkörper-Entkopplung jene Massenkräfte ermittelt, welche den aufgebrachten Lasten das Gleichgewicht halten. Anschließend wird eine statische Berechnung unter der Wirkung der aufgebrachten Lasten und der Massenkräfte durchgeführt.
- Für die Modellierung statischer Lasten stehen vielfältige Möglichkeiten zur Verfügung (siehe Seite 68).
- Als Primärergebnisse werden berechnet:
 - Verschiebungen,

- Masse und Trägheitsmomente.
- Daraus lassen sich weitere Ergebnisse ableiten:
 - Reaktionskräfte,
 - Spannungen bzw. Schnittgrößen,
 - Dehnungen,
 - Residuen,
 - Dehnungsenergiegedichte, d.h. massen- oder volumenbezogene Dehnungsenergie.

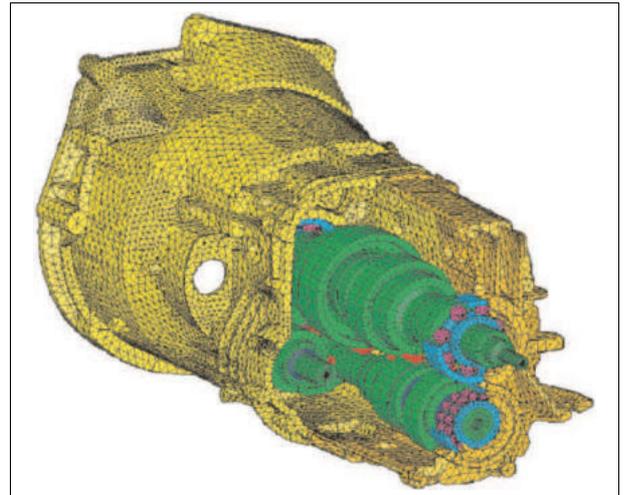


Abbildung 108: Getriebegehäuse ZF AG

PERMAS-CA – Kontaktanalyse

Dieses Funktionsmodul wird zur Untersuchung von statischen Aufgabenstellungen unter Berücksichtigung nichtlinearer Randbedingungen (Kontaktbedingungen) eingesetzt.

Kontaktbedingungen sind zwischen elastischen Teilkörpern oder zwischen elastischen Teilkörpern und starrem Grund möglich. Dabei können die Teilkörper sich auch nichtlinear verhalten.

Zusätzlich wird auch *Selbstkontakt* von der Kontaktanalyse unterstützt (siehe Abb. 120). Dabei handelt es sich um Kontaktmodelle, wo eine Oberfläche mit sich selbst in Kontakt kommt, z.B. durch Verzug oder eine andere Art großer Deformation, wobei keine Voraussage über die voraussichtlichen Kontaktzonen möglich ist.

Die Modellierung der Kontaktbedingungen kann erfolgen über:

- die Zuordnung der einzelnen Knotenpaare.

- die Zuordnung von Knotensets (die einzelnen Paare werden aus der Geometrie ermittelt).
- die Zuordnung von Knoten/Knotensets zu Flächen (inkompatible Netze).
- den generellen Fläche-zu-Fläche-Kontakt (inkompatible Netze).

Mit der Möglichkeit, Kontakt auch mit inkompatiblen Netzen durchzuführen, können die Kontaktpartner unabhängig voneinander vernetzt werden. Damit wird die Modellierung komplexer Kontaktflächen (wie bei Zahneingriffen in Getrieben) wesentlich vereinfacht.

Bei einem Kontakt Fläche-zu-Fläche werden mehr Kontakte berücksichtigt als bei einem Kontakt Fläche-zu-Knoten. Mehr Kontakte heißt genaueres Ergebnis und mehr Rechenzeit. Weniger Kontakte muss nicht heißen, dass die Ergebnisse ungenau sind, aber es ist möglich, z.B. bei grob vernetzten Kontaktflächen. Um nun das Beste aus einer Kontaktberechnung herauszuholen und dabei nur moderat mehr Rechenzeit zu investieren, wurde ein wählbarer Automatismus (*Option COMPLEMENT*) entwickelt, der beim Kontakt Fläche-zu-Fläche die Anzahl der Kontakte so reduziert, dass die Genauigkeit erhalten bleibt (siehe Abb. 109).

Die Kontakttrichtung und die Anfangsspaltbreite kann explizit vorgegeben oder automatisch aus der Geometrie ermittelt werden. *Pressverbindungen* werden einfach durch Eingabe des entsprechenden Übermaßes modelliert. Eine gegebene Spaltbreite kann mit einer benutzerdefinierten Funktion skaliert werden, eine sog. *Kontaktspaltfunktion*. Diese Funktion kann von der Position im Raum und auch von topologischen Gegebenheiten abhängen.

Die Modellierung einer *Pressverbindung* kann alternativ auch mit MPC-Bedingungen durchgeführt werden, wenn das Öffnen eines Spalts während der Belastung nicht zu erwarten ist (siehe Seite 63).

Die Kontaktanalyse berechnet isotrope und anisotrope *Haft- und Gleitreibung* nach dem *Coulomb'schen Reibgesetz*.

Für große Kontaktprobleme und für komplexere Reibungsaufgaben steht mit dem Modul PERMAS-CAX eine geeignete Erweiterung zur Verfügung (siehe nächster Abschnitt). Beide Module zusammen decken einen breiten Einsatzbereich der Kontaktanalyse ab. Zusätzlich ergänzt wird diese Kombination durch das Modul PERMAS-CAU (siehe über-

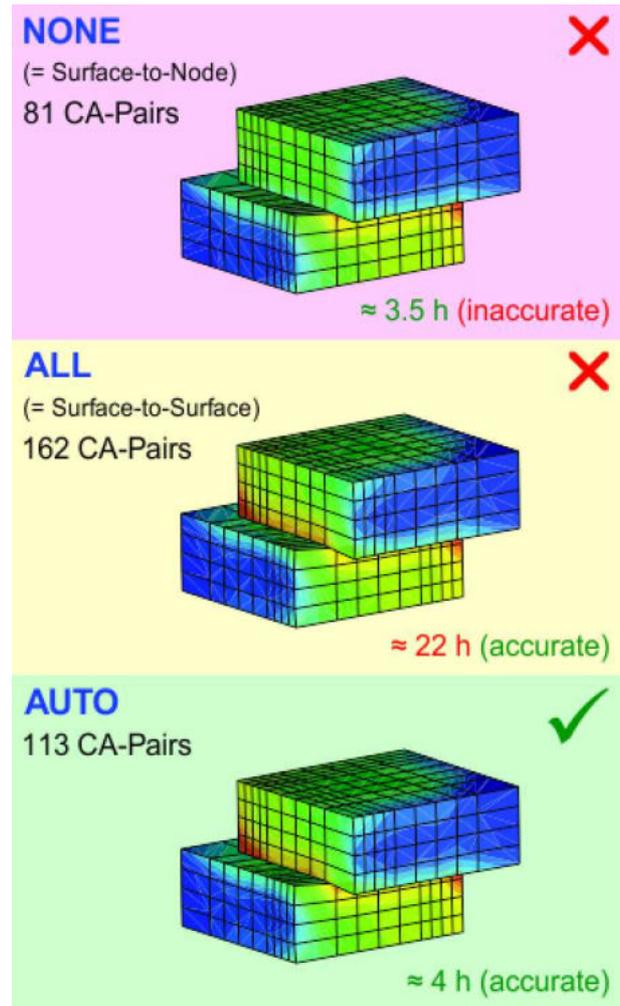


Abbildung 109: Flächenkontakt mit Option COMPLEMENT: Bester Kompromiss zwischen Genauigkeit und Rechenzeit (gezeigt sind die von Mises Spannung an den Knoten). Die angegebenen Werte beziehen sich auf einen industriellen Anwendungsfall.

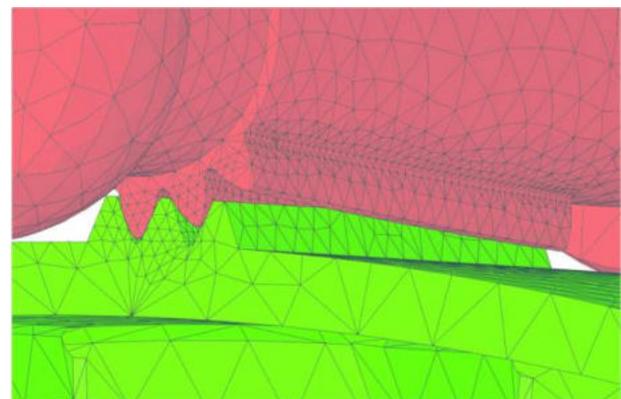


Abbildung 110: Kontakt mit inkompatiblen Netzen

nächster Abschnitt), welches große Relativverschiebungen im Kontakt berücksichtigt.

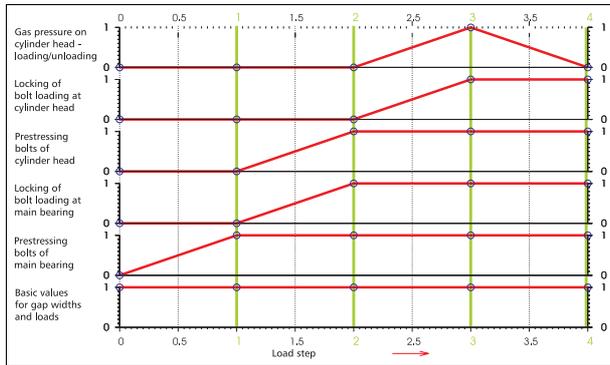


Abbildung 111: Darstellung der Lastgeschichte

Die Angabe einer Lastgeschichte erlaubt das korrekte Nachfahren jeder Kontaktsituation mit Gleit- und Haftreibung unter Montage und Betriebslasten. Dies ermöglicht die komfortable Untersuchung solcher Situationen als quasistatische Berechnung. Eine Postscript-Datei kann ausgegeben werden, um die Lastgeschichte auch grafisch darzustellen (siehe Abb. 111).

Die Lastgeschichte kann durch Vorspannungen ergänzt werden (z.B. in Schrauben), wobei die Kontaktanalyse verwendet wird, um die Vorspannung einzustellen. So wird auch das Schraubenanzugsmoment über eine bekannte Kontaktkraft im Schraubenschaft abgebildet.

Ein verallgemeinertes Konzept für die **Schraubenvorspannung** ist verfügbar. Neben dem klassischen Weg, den Schaft durchzuschneiden und die Vorspannung senkrecht dazu vorzugeben, ist ein neuartiger Weg möglich, bei dem die Vorspannung direkt über die Kopplung am zylindrischen Gewinde in axialer Richtung vorgeschrieben wird. Dieser sehr innovative Weg ermöglicht eine bequeme Beschreibung selbst detaillierter Effekte wie radiale Bohrungsaufweitung und axiale Verdrillung durch Gewindeflanken und Gewindesteigung, und zwar ohne dass das Gewinde über finite Elemente abgebildet werden müsste (siehe Abb. 112). Dazu zeigt Abb. 113 eine Anwendung zum Festziehen und Lösen einer Schraube.

Bauteile in Kontakt sind oft nur durch Kontaktkräfte gehalten. Um ihnen eine elastische Bettung zu geben, kann eine Familie von *Kompensationsfedern* (auch *Nullkraftfedern* genannt) verwendet werden, wobei die Federkraft durch zusätzliche Kontaktkräfte

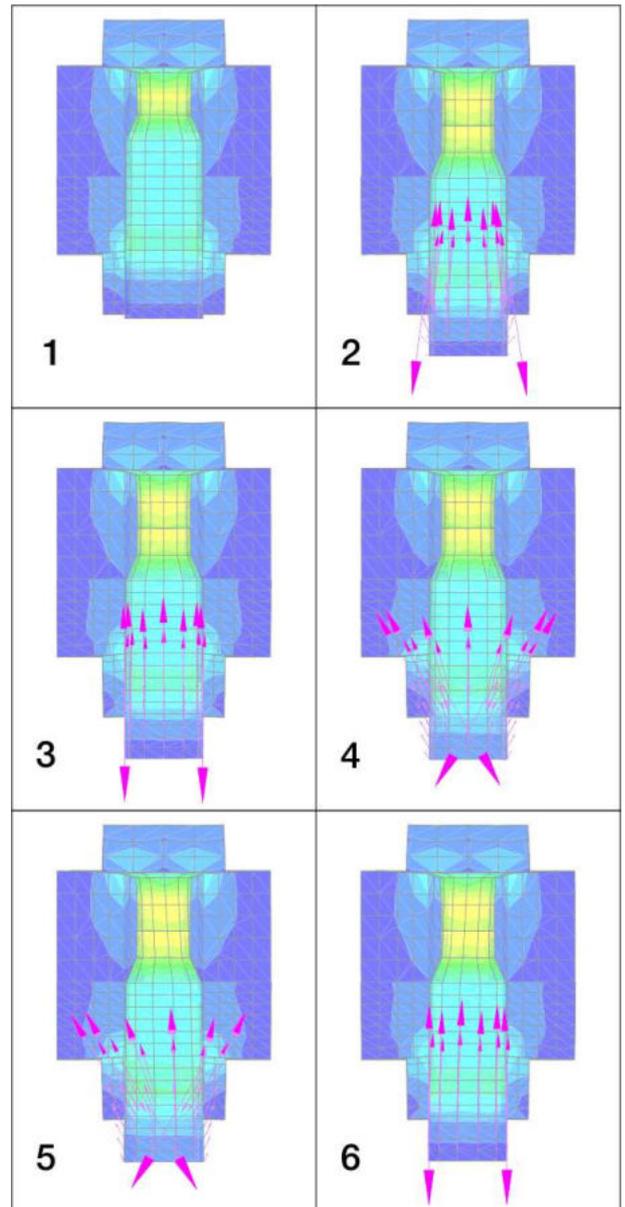


Abbildung 112: Schraubenvorspannung Knotenspannungen und Vorspannkraftverläufe für eine mittelgroße Schraube mit Mutter:
 (1) mit Schnittebene im Schaft
 (2) mit radial gekoppeltem Gewinde
 (3) mit Gewinde ohne radiale Kopplung
 (4) mit Gewindeflanke aber ohne Steigung
 (5) mit Gewindeflanke und Steigung (Standard M10)
 (6) mit Linksgewinde, Steigung, aber ohne Flankenwinkel

te kompensiert wird (siehe Abb. 114). Dadurch wird es möglich, *kraftgeführte Kontakte* zu verwenden. Zusätzlich erleichtert der *RBM-Assistent* in VisPER die Platzierung und Definition dieser Elemente (siehe Seite 45).

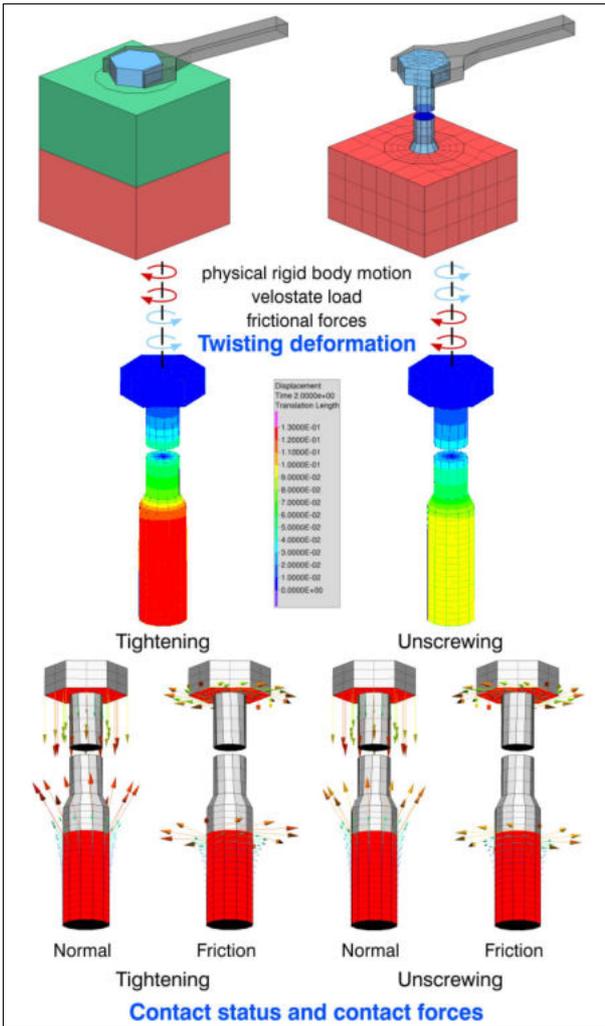


Abbildung 113: Gewindebeschreibung auf einem glatten Bolzen.

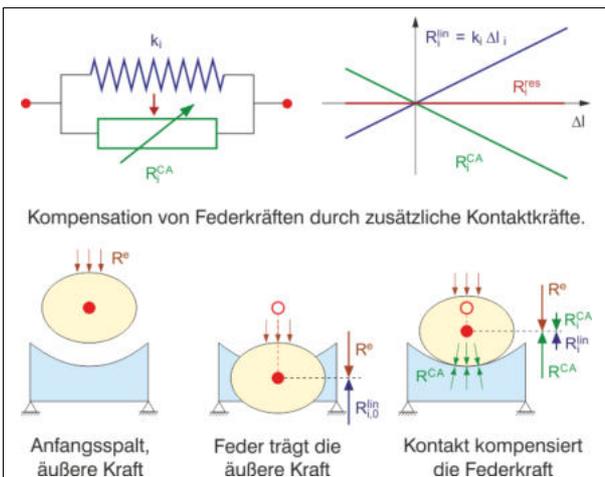


Abbildung 114: Kraftgeführter Kontakt mit Hilfe von Kompensationsfedern

Für die Kontrolle der Kontaktmodelle gibt es um-

fangreiche Verifikationsmöglichkeiten zur Art des Kontakts, seiner Geometrie (wie Spalt und Fußpunktsvektor, siehe auch Fig. 101) sowie der Normalen- und Reibrichtung. Außerdem stehen für alle Iterationen die zugehörigen Kontaktzustände für Prüfungszwecke zur Verfügung.

Für Reibkontakte ist die Qualität der Oberflächen von entscheidender Bedeutung. Daher erlaubt PERMAS die Glättung von Kontaktflächen, was eine wesentliche Verbesserung des Reibverhaltens bewirkt.

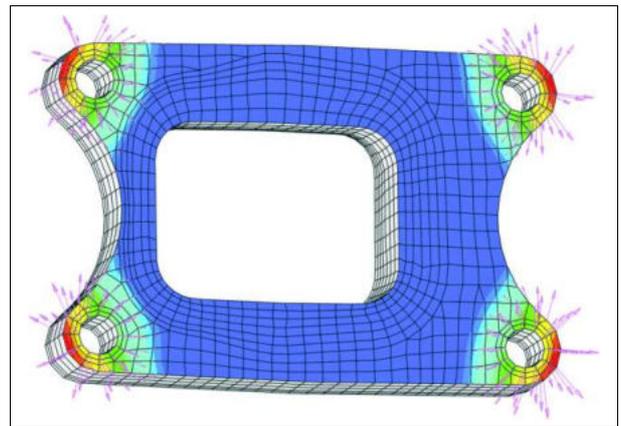


Abbildung 115: Kontaktdruck und Schubvektoren

Das verwendete Lösungsverfahren basiert auf der Flexibilität der potentiell beteiligten Kontaktfreiheitsgrade. Dies birgt klare Vorteile:

- Die durchgeführte Iteration auf dieser Flexibilität ist **sehr effizient** und deshalb **selbst für größte Modelle** geeignet.
- Die Kondition der Steifigkeitsmatrix bleibt erhalten, da der Kontakt nicht über künstliche Steifigkeitsänderungen erfasst wird.

Die Berechnung kann für **beliebig viele Lastfälle** durchgeführt werden, wobei sich für jeden Lastfall die Kontaktparameter (Spaltbreite und Reibungskoeffizienten) ändern können. Die Kontaktbedingungen werden im statischen Lösungsschritt automatisch berücksichtigt, so dass sich die Steuerbefehle für die Kontaktrechnung von denen einer linearen oder nichtlinearen statischen Analyse nicht unterscheiden.

Für eine noch effizientere Berechnung von aufeinander folgenden Kontaktvarianten stehen **Kontaktstatus-Dateien** zur Verfügung, die sowohl das Wiederaufsetzen von Kontaktanalysen erleichtern als auch die Rechenzeiten beträchtlich verkürzen.

Neben den Ergebnissen der statischen Analyse stehen hier der Kontaktstatus, die Kontaktkräfte, der Kontaktdruck (Pressung, siehe Abb. 115), die Spaltbreite und die Relativverschiebung als zusätzliche Ergebnisse zur Verfügung.

Bei Kontakt-Oberflächen von TET10-Netzen besteht eine Option, die Mittenknoten zu interpolieren, was die Rechenzeiten stark verkürzen kann. Um die Spannungsergebnisse auf diesen Oberflächen zu verbessern, wird eine weitere Interpolation für die Mittenknoten eingesetzt. Die erreichte Verbesserung ist in Abb. 116 gezeigt, wo die Spannungen mit und ohne Mittenknoten fast gleich sind.

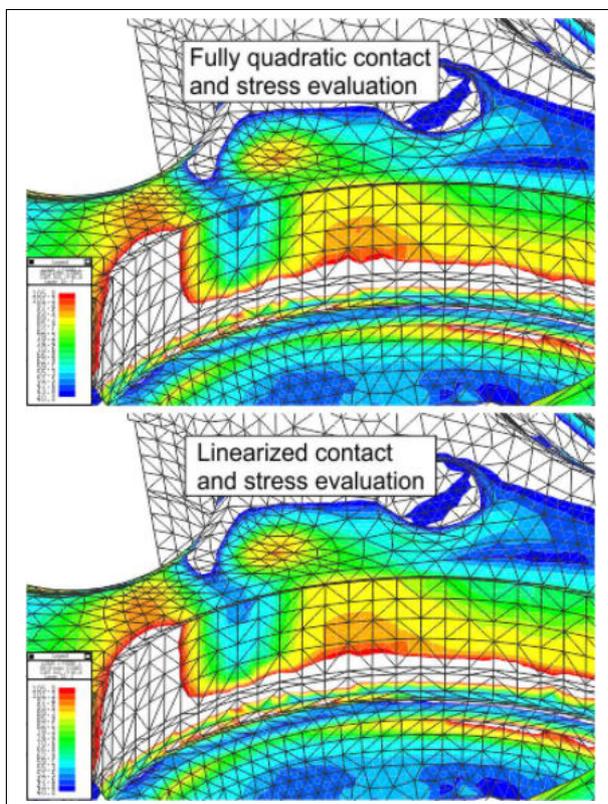


Abbildung 116: Knotenspannungen auf einer Oberfläche mit Linearisierung (unten), und ohne Linearisierung als Referenz (oben).

Für jede Kontaktbeschreibung, bei der die Summe der Kontaktkräfte nicht Null ist, existiert eine *Wirkungsrichtung* (Line of Action) mit dem kleinsten Torsionsmoment aus den wirkenden Normal- und Reibungskräften. Der Punkt auf der Wirkungslinie, der am nächsten zu einem gegebenen Schwerpunkt liegt (z.B. dem Schwerpunkt der Koordinaten der Kontaktknoten), wird als der *Druckmittelpunkt* (Center of Pressure, COP) bezeichnet. Die Koordinaten des COP sowie die Summe der Kräfte und Momente

werden auf Anforderung auf der Ergebnisdatei ausgegeben. Dieses Ergebnis ist für alle Lastschritte einer linearen oder nichtlinearen Kontaktberechnung verfügbar.

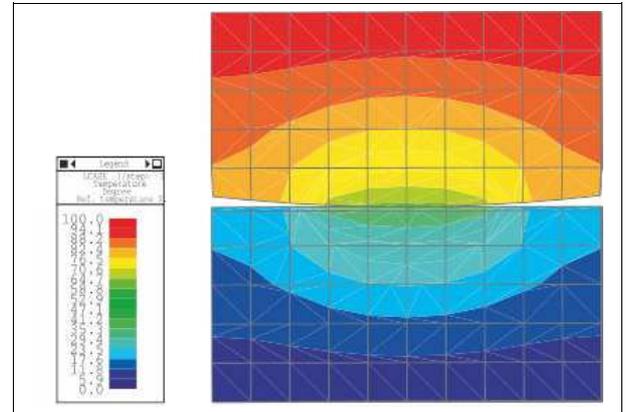


Abbildung 117: Temperaturverteilung in zwei Bauteilen bei Kontakt

Der Kontaktzustand kann eingefroren werden, um nachfolgende Analysen zu ermöglichen. Dieses Einfrieren (*Contact Locking*) geschieht durch automatische Umwandlung der aktiven Kontakte in kinematische Zwangsbedingungen (MPCs). Damit werden nachfolgende Berechnungen von Eigenwerten, zur Wärmeleitung (siehe Abb. 117) oder zur *Teilmodellanalyse* (*Spannungslupe*) möglich.

PERMAS-CAX – Erweiterte Kontaktanalyse

Dieses Modul wurde entwickelt, um neue Lösungsverfahren für kritische Reibungsfälle und die Analyse sehr großer Kontaktmodelle (mehr als 10000 Kontaktknotenpaare) anzubieten und dabei die Rechenzeit nochmals deutlich zu reduzieren (um wenigstens einen Faktor 3). Das Modul wird als Ergänzung zu PERMAS-CA eingesetzt (siehe voriger Abschnitt).

Folgende Funktionen sind enthalten:

- Iterative Hochleistungsalgorithmen zur Beschleunigung von Kontaktanalysen mit Normal- und Reibungskontakt.
- Eine zusätzliche Iterationsmethode für kritische Reibungsprobleme (wenn alle Kontakte ins Gleiten geraten, siehe Abb. 119).

Dichtungselemente werden nun standardmäßig mit

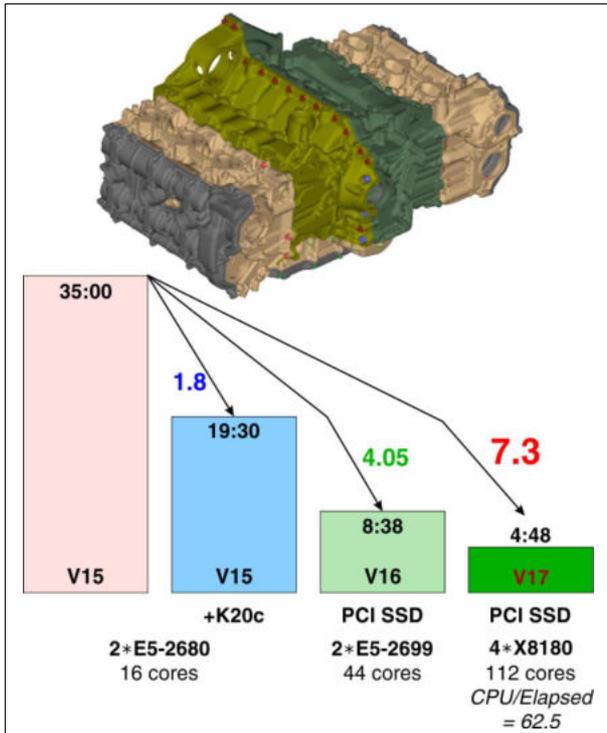


Abbildung 118: Kontaktanalyse eines Motors mit 56 MDOF, 37 Zeitschritten, 2 verschiedenen Temperaturzuständen und CAS-Dateien, direkter I/O mit PCI SSD.

der Methode der kontakt-gesteuerten nichtlinearen Dichtungsberechnung (*CCNG-Analyse* - Contact Controlled Nonlinear Gasket Analyse) berechnet. Dies führt zu erheblichen Rechenzeitvorteilen verglichen mit der klassischen Berechnungsmethode mit nichtlinearem Materialverhalten. Besonders hoch wird der Rechenzeitvorteil, wenn Kontakt und Dichtungselemente die einzigen Nichtlinearitäten in einem Modell sind. Eine immer noch signifikante Reduktion der Rechenzeit kann man bei weiteren zusätzlichen Nichtlinearitäten erwarten.

Die Gleitreibung zwischen bewegten Teilen kann über ein Geschwindigkeitsfeld beschrieben werden, um es bei einer quasi-statischen Kontaktanalyse zu berücksichtigen (siehe Kapitel Bremsenquietschen aus Seite 29).

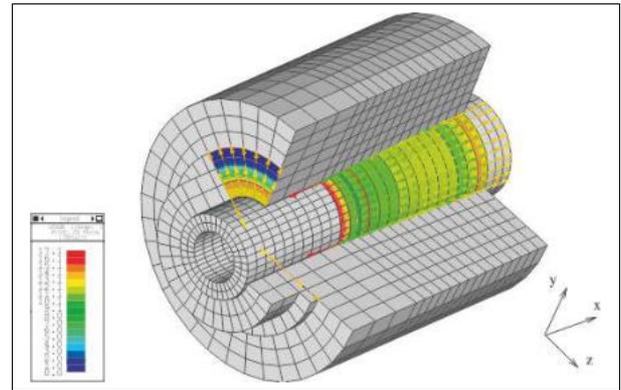


Abbildung 119: Kegel-Pressverbindung (Gleitreibungskräfte nach Montage)

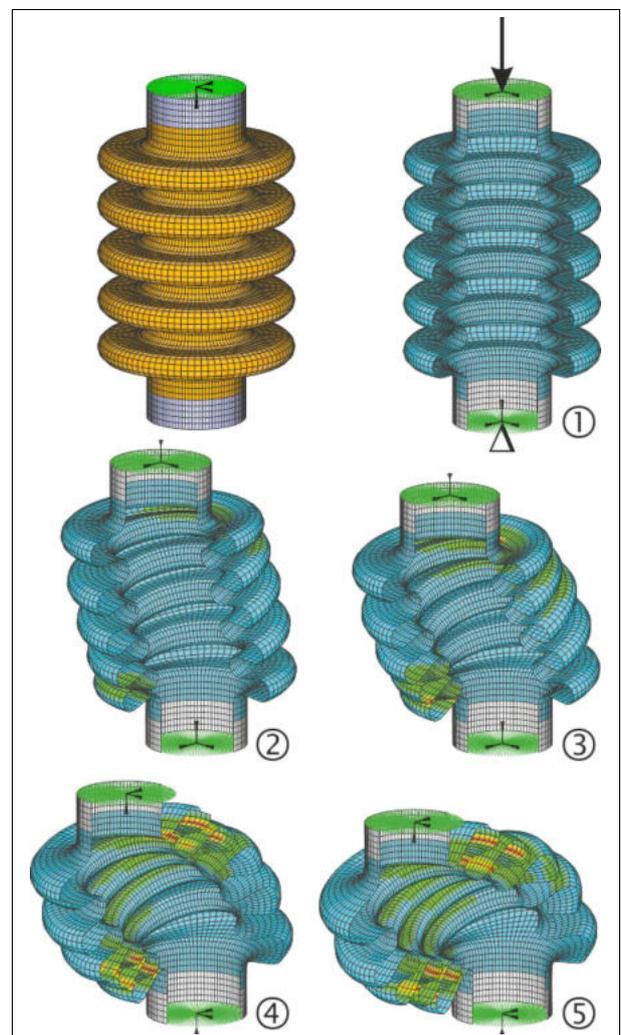


Abbildung 120: Selbstkontakt eines Balgs

PERMAS-CAMG – Kontakt Mehrgitterverfahren

Dies repräsentiert die dritte Generation von Kontakt-

lösern in PERMAS (siehe Abb. 121) und ermöglicht große Laufzeitgewinne für größere Kontaktmodelle durch Nutzung eines innovativen **Contact-Multigrid-Solvers** ermöglicht. Dieser Solver besteht aus zwei orthogonalen Ansätzen, die beide die Ordnung der

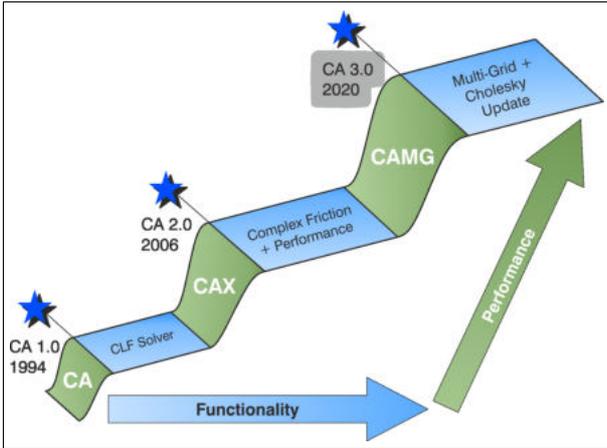


Abbildung 121: Evolution der Kontaktlöser

erforderlichen Numerikoperationen signifikant reduzieren und damit umso größere Laufzeitvorteile bieten, je größer das Kontaktproblem ist.

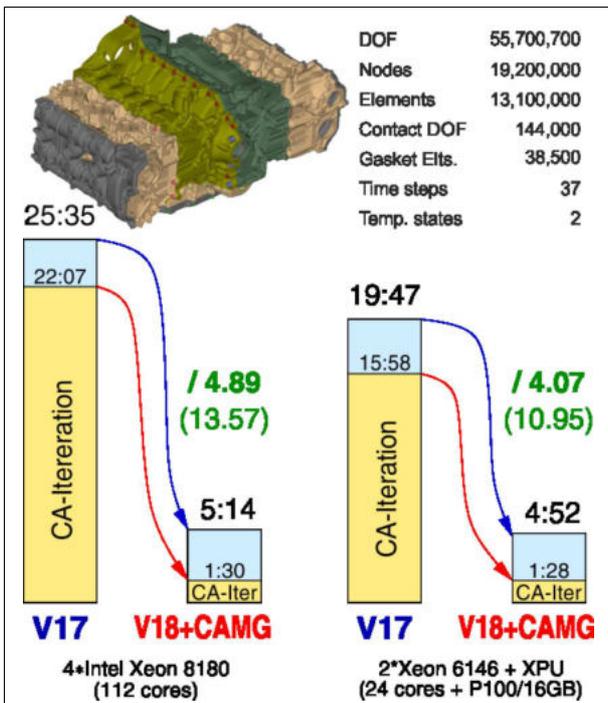


Abbildung 122: Kontaktanalyse eines Motors mit 56 MDOF, 37 Zeitschritten, 2 verschiedenen Temperaturzuständen

- Cholesky Update:**
 Die innovative Löserstrategie basiert auf einem Update des Cholesky Faktors der Flexibilitätsmatrix anstatt auf einer Zerlegung in jeder Iteration. Der Cholesky Faktor des aktuell aktiven Sets der Kontaktfreiheitsgrade wird durch einen effizienten Update des Cholesky Faktors des letzten aktiven Sets gebildet. Damit ist eine ko-

stenintensive komplette (Wieder-)Zerlegung in jedem Iterationsschritt nicht länger erforderlich. Da nur der Lösungsschritt des linearen Gleichungssystems in jeder Iteration für das aktive Set beschleunigt wird, ändert sich der Kontaktalgorithmus an sich nicht. (mathematisch identische Iteration, gleiche Iterationsfolge, gleiches Ergebnis, da ausschliesslich Änderungen in der Numerik erfolgen. Dieser neue Ansatz ist hochgradig für effiziente Parallelisierung adaptiert und wird automatisch gewählt, sobald die CAMG Lizenz verfügbar ist.

- Mehrgittervergrößerung:**
 Dieser Ansatz basiert auf einer hierarchischen Vergrößerung der Kontaktfreiheitsgrade. In einem ersten Schritt wird angenommen, dass nur ein Teil der Kontaktfreiheitsgrade betrachtet wird um ein reduziertes Problem zu lösen, das (nach geeigneter Abbildung) als initiale (caso-file ähnliche) Lösung für den (feinen) Original-Level dient. Das Kontaktproblem auf dem reduzierten Level kann ebenfalls mittels des Cholesky Updates effizient gelöst werden. Im Gegensatz zum reinen Update ändert dieser Ansatz das Kontaktproblem. Somit können mehr (aber billigere) Iterationen nötig sein.

Abbildung 123 zeigt Rechenzeiten und Speedup (total und für die Kontaktiteration) für ein großes Kontaktmodell mit Reibung mit 119 000 Kontakt-DOFs (total 226 900 00 DOFs), 9 000 000 Knoten und 5 800 000 Elementen. Die Berechnung wurde auf einer 48 Kern Maschine (2*Intel Xeon 8260L) durchgeführt. Es ergibt sich eine Beschleunigung von 7.43 (8.37 für die Kontaktiteration) für die Gesamt-rechenzeit mit dem neuen CAMG Modul. Ohne die neue Lizenz ergibt sich mit V18 ein Speedup von 1.58 zur PERMAS Version 17.

PERMAS-CAU – Update der Kontaktgeometrie

Dieses Modul bietet einen neuen Kontaktalgorithmus, der es erlaubt, wesentliche Änderungen der Kontaktgeometrie während der Belastung zu berücksichtigen. Dazu gehören Änderungen der Kontaktpunkte (d.s. die Projektionen der Kontaktknoten einer Seite auf die gegenüberliegende Kontakt-

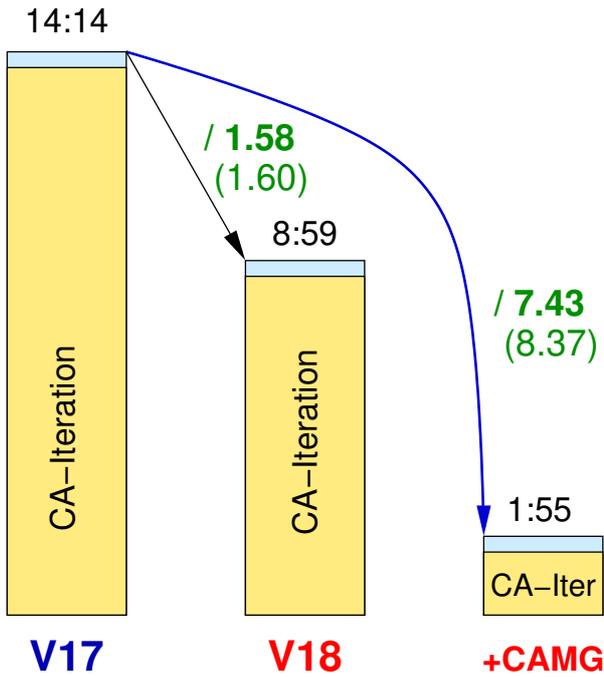


Abbildung 123: Rechenzeit (Stunden) und Speedup für ein großes Kontaktmodell für V18 und V18+CAMG verglichen mit V17

fläche) und Änderungen der Kontaktnormalen (d.i. die Normale auf der Kontaktfläche an jedem Kontaktknoten). Damit lassen sich folgende Anwendungen berechnen:

- Wenn es zu großen Relativverschiebungen zweier Körper in Kontakt kommt, dann berücksichtigt der Update diese Änderung der geänderten Position im Kontakt (siehe Abb. 124 und Abb. 125).
- Wenn sehr präzise Kontaktergebnisse benötigt werden, dann werden durch den Update der Kontaktgeometrie selbst kleine Änderungen im Kontakt berücksichtigt und so genaue Ergebnisse erzielt für Kontaktkräfte, Verschiebungen, Spannungen, usw..

Das Modul hat die folgenden Eigenschaften:

- Eine spezielle Modellierung ist nicht erforderlich. Weil aber der Update die Partnernetze gegeneinander verschiebt, muss die Kontaktgeometrie über Flächen definiert werden (wie Fläche-zu-Fläche oder Fläche-zu-Knoten). Somit werden Knoten-zu-Knoten-Kontakt und Kontakt gegen Grund durch den Update nicht geändert.
- Der Kontakt-Update geht mit und ohne Reibung.
- Der Kontakt-Update geht mit linearer und nicht-

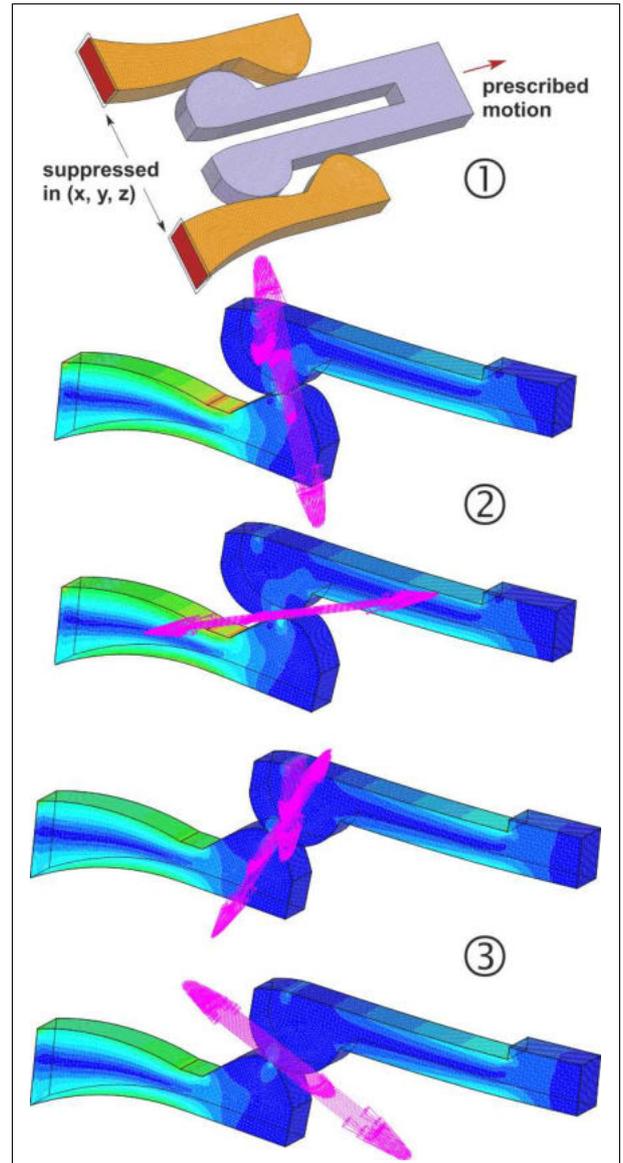


Abbildung 124: Kontakt-Update eines Clips
 Große Relativverschiebungen: Bild 1 zeigt das Modell; Bild 2 zeigt den Kontaktdruck (oben) und den Reibschub (unten) mit Knotenspannungen vor der Engstelle; Bild 3 zeigt den Kontaktdruck (oben) und die Reibschub (unten) mit Knotenspannungen nach der Engstelle.

linearer statischer Analyse.

Der Update der Kontaktgeometrie ist in Abb. 126 prinzipiell erklärt. Die Schritte 1 und 2 zeigen die typische Vorgehensweise beim Kontakt und die Schritte 3 und 4 zeigen die erste Iteration des Update-Prozesses, der solange wiederholt wird bis eine vorgegebene Anzahl von Iterationen erreicht ist oder eine vorgegebene Genauigkeit erzielt wurde.

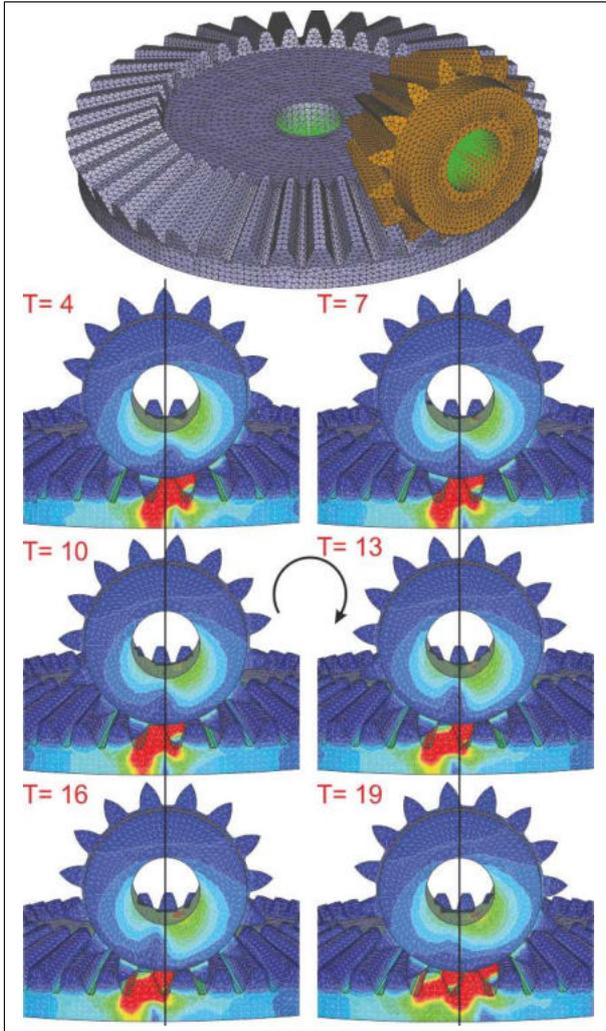


Abbildung 125: Angetriebenes Zahnradpaar

PERMAS-NLS – Nichtlineare Statik

Geometrisch nichtlineares Verhalten

Dieser Modulteil erlaubt die geometrisch nichtlineare Berechnung von Modellen im Rahmen der *Co-Rotational* Methode. Unter der Annahme kleiner Dehnungen (linearer Verzerrungstensor) ist die Betrachtung von großen Verschiebungen und Rotationen möglich. Zur effizienten Lösung des nichtlinearen Gleichungssystems wird das *Newton-Raphson* Verfahren mit einem *Line Search* kombiniert. Die Lastschrittsteuerung kann dabei manuell oder automatisch erfolgen. Die nichtlineare Charakteristik des Lösungspfad kann durch xy-Darstellungen von Last vs. Verschiebung verdeutlicht werden.

Für nichtlineare Beulprobleme steht außerdem ein *Bogenlängenverfahren* zur Verfügung, welches die Bestimmung des Lösungspfad über Beul- oder

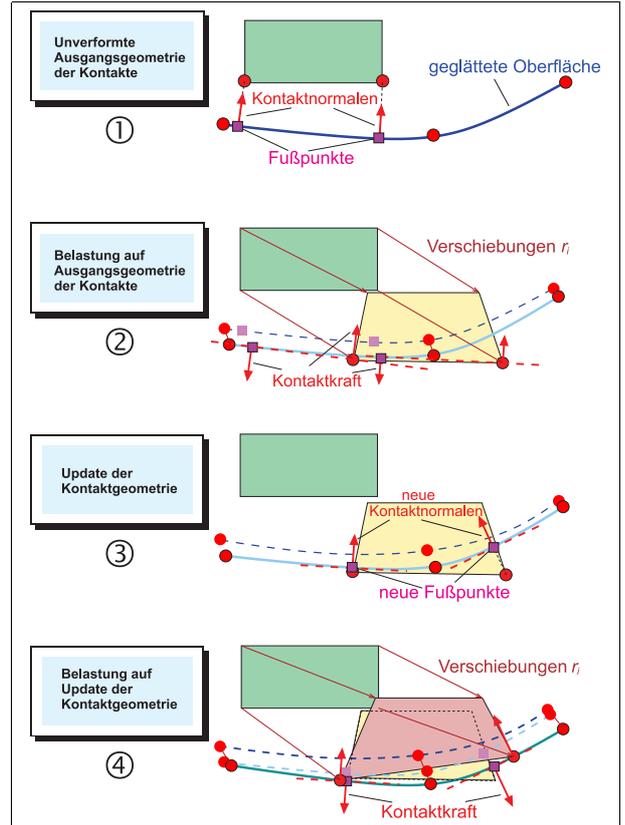


Abbildung 126: Erste Schritte beim Kontakt-Update

DOF	40,000,000	Xeon 8260 @ 2.0 Ghz (2x24 cores)
Contacts	70,000	Out-of-core job (2.54 TiB disk I/O)
Nodes	13,400,000	
Elements	10,200,000	
With plasticity		

Abbildung 127: Parallele nichtlineare Spannungen (für Elemente) eines Motors mit 10.2 Mio Elementen

Verzweigungspunkte hinaus ermöglicht. Auch hier bietet PERMAS eine Schrittweitensteuerung, welche kritische Bereiche automatisch erkennt und so eine effiziente Lösung erlaubt. Beispiele für elastisches Beulen zeigen Abb. 128 und Abb. 182, während elastoplastisches Beulen in Abb. 129 zu sehen ist. Um kritische Punkte und Beulmoden zu identifizieren, ist es außerdem möglich nach jedem konvergierten Lastschritt der nichtlinearen Analyse eine lineare Beulanalyse durchzuführen, welche auf der aktuellen Steifigkeit basiert.

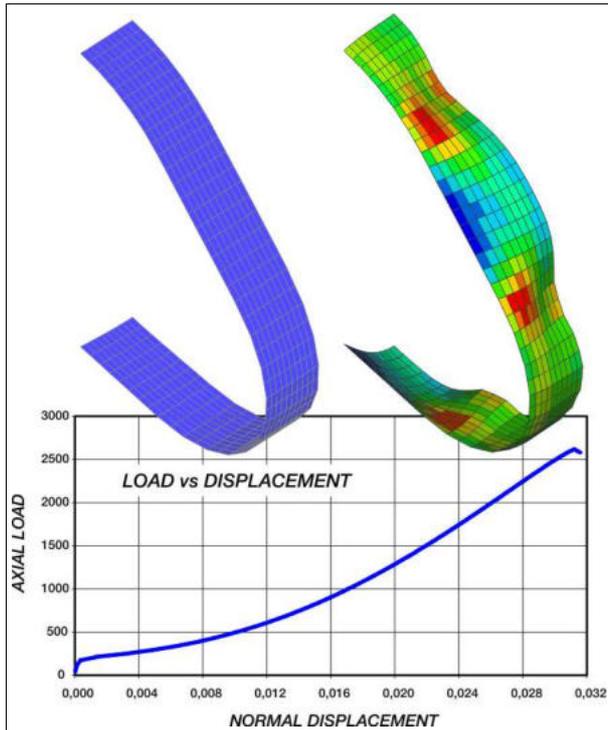


Abbildung 128: Nichtlinearer NAFEMS-Test

Lineares aber temperaturabhängiges Materialverhalten

Wenn sich die Temperatur in einer nichtlinearen Lastgeschichte ändert, dann verlangt der notwendige Update von Steifigkeit und Last eine nichtlineare Lösung. Wenn aber geometrische und Materialnichtlinearitäten vernachlässigt werden können, dann steht ein spezieller Algorithmus zur Verfügung, der ein hohes Potential zur Verkürzung der Rechenzeit hat. Dieser Algorithmus kann auch mit der nichtlinearen Dichtungsberechnung der *CCNG-Analyse* kombiniert werden (siehe Seite 84), um speziell eine sehr effiziente Berechnung von Verbrennungsmotoren zu ermöglichen (siehe Motorbeispiel in Abb. 118).

Nichtlineares Materialverhalten

Dieser Modulteil ermöglicht die Analyse nichtlinearen Materialverhaltens unter der Annahme kleiner Dehnungen bei isotropem Material:

- Nichtlinear elastisches Material (*Cauchy*-Typ)
- Plastizität (*von Mises, Tresca, Drucker-Prager, Mohr-Coulomb*)
- *Viskoplastisches Material* mit einem Potenzgesetz auf der Basis der von Mises-Fließregel.
- Kriechen mit
 - nichtlinearer Elastizität oder

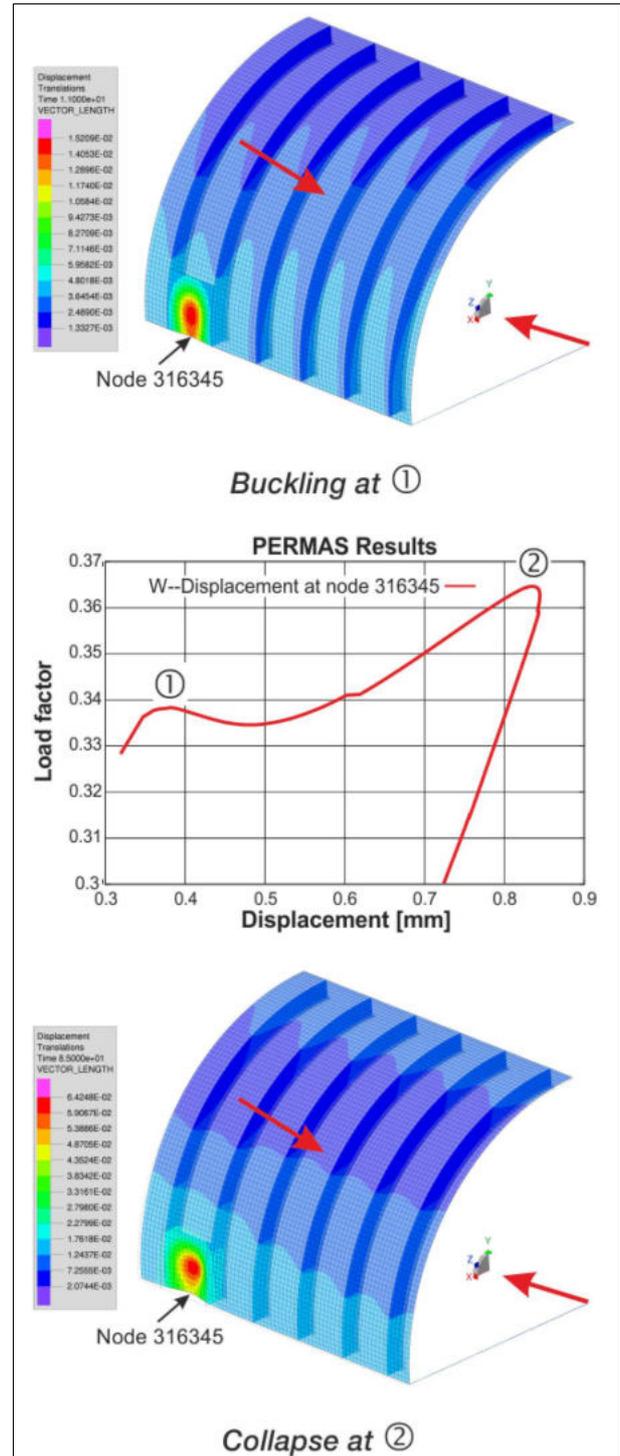


Abbildung 129: Plastisches Beulen mit Nachbeulverhalten

– Plastizität

Dabei kann das Material temperaturabhängig sein in Bezug auf den Elastizitätsmodul, die Fließgrenze und die Spannungs-Dehnungs-Beziehung. Beim Kriechen kommt noch eine zeitabhängige Charak-

teristik hinzu. Bei der Plastizität kann eine *isotrope* oder *kinematische Verfestigung* oder auch eine *gemischte* Verfestigung berücksichtigt werden.

Speziell für den Einsatz bei nichtlinearem Materialverhalten wurde eine Familie von Schalenelementen mit einer dreidimensionalen Formulierung entwickelt, die sich auch für lineare Analysen eignet. Diese Elementfamilie (Dreiecke und Vierecke mit linearen und quadratischen Ansatzfunktionen) eignet sich für den Einsatz bei bestehenden Schalenmodellen, für die zu einer linearen Analyse auch eine nichtlineare Aussage gefragt ist.

Für die Modellierung von Dichtungen steht eine Familie von *Dichtungselementen (Gasket-Elemente)* zur Verfügung. Dabei wird das nichtlineare Elementverhalten in einer Vorzugsrichtung direkt mit der gemessenen Kraft-Verschiebungskurve der realen Dichtung beschrieben.

Die verwendete inkrementelle und iterative Lösungsstrategie basiert auf *Newton-Raphson*, Modified Newton-Raphson und *Thomas*. Außerdem ist eine automatische Lastschrittsteuerung implementiert, für die Anfangslastschritte und aufzubringende Gesamlast (oder Zeit) zusätzlich spezifiziert werden können. Die Materialgesetze können in tabellarischer Form oder als Unterprogramm (Fortran oder C) definiert werden.

Anwendungen mit *Inertia Relief* (siehe Seite 79) können ebenfalls mit nichtlinearem Materialverhalten durchgeführt werden.

Das Strukturverhalten kann auch durch eine Vorbehandlung (wie *Gießen* oder *Walzen*) beeinflusst werden. Die zugehörigen Anfangsdehnungen können als Anfangsbedingung (verschiebungsfrei) verwendet werden.

Benutzerdefiniertes Materialverhalten ist möglich. Dazu sind benutzereigene Programme vorgesehen. Diese Unterprogramme stellen Spannungen und Dehnungen bereit, sowie die jeweilige mit dem Materialgesetz assoziierte Tangentenmatrix.

Neben der isotropen Plastizität wird auch transvers-isotrope Plastizität unterstützt. Typische Anwendungen bestehen für *Kurzfaserverwerkstoffe*. Abb. 130 vergleicht zwei einfache Balkenmodelle mit gleichem Material und gleicher Last aber unterschiedlicher Faserrichtung.

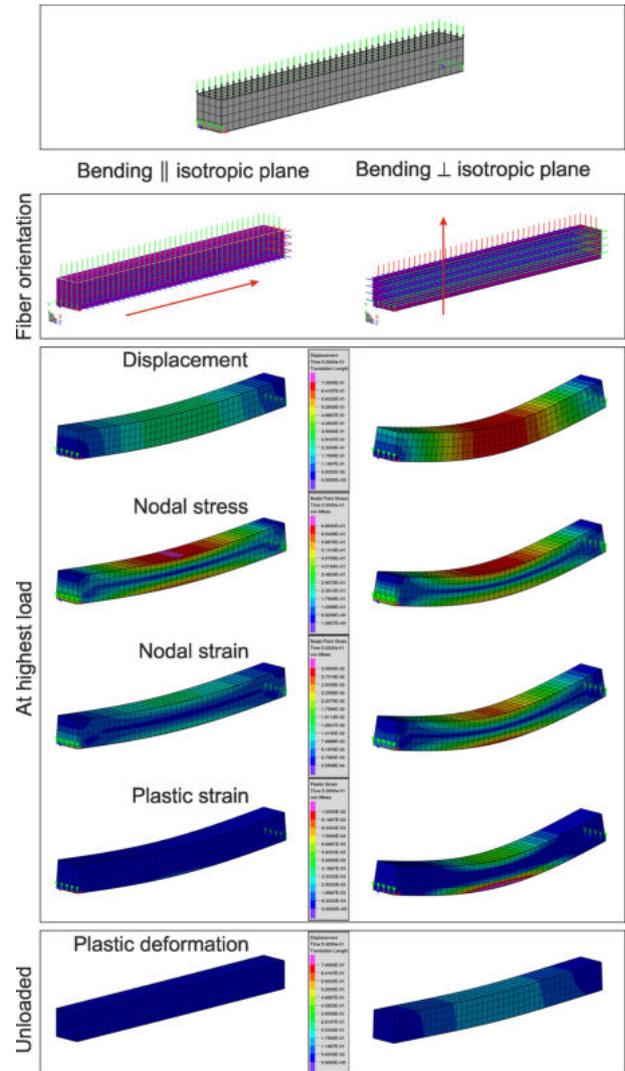


Abbildung 130: Transvers-isotrope Plastizität

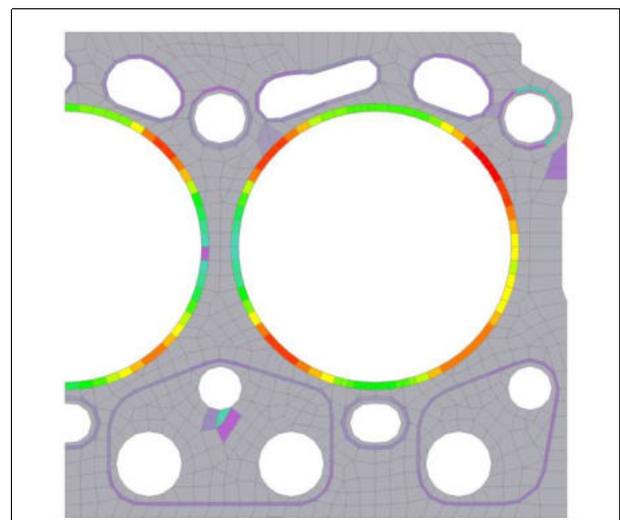


Abbildung 131: Druck in einer Zylinderkopfdichtung

Kombination von nichtlinearem Materialverhalten mit geometrischen Nichtlinearitäten

Bei Berechnungen mit nichtlinearem Materialverhalten kann auch der geometrisch nichtlineare Effekt mit berücksichtigt werden. Hierbei werden auch Folgelasten wie Druck, Temperatur und Trägheitslasten berücksichtigt.

Ein Anwendungsbeispiel ist das Nachbeulverhalten von gewölbten Schalen, d.h. eine statische Analyse kann auch nach einem plastischen Beulen weiter belastet werden (siehe Abb. 129 und Abb. 182). Zusätzlich kann nach der nichtlinearen Analyse eine lineare Beulanalyse durchgeführt werden, um alle Beulmöglichkeiten an diesem Belastungspunkt zu untersuchen (siehe Modul BA auf Seite 92).

Allgemein

Falls bei der nichtlinearen Berechnung Kontaktbedingungen modelliert wurden, werden auch diese automatisch im Rahmen einer nichtlinearen Kontaktanalyse berücksichtigt.

Ein Anfangszustand, wie er sich z.B. bei rotierenden Strukturen ergibt, kann bei nichtlinearen Berechnungen mit berücksichtigt werden.

Die Nichtlinearitäten können als Ausgangszustand für nachfolgende Analysen (z.B. einer Eigenwertanalyse) verwendet werden.

In vielen Fällen ist der größere Teil eines Modells linear. Das ist eine ideale Voraussetzung, um die *Teilstrukturtechnik* einzusetzen (siehe Seite 57). Dabei werden die linearen Teile in Unterkomponenten gelegt und die nichtlinearen Teile in die Top-Komponente. Dieses Vorgehen führt bei großen linearen Anteilen zu einer deutlichen Reduktion der Rechenzeit.

Falls mehrere Lastzyklen für realistische Modelle berechnet werden sollen (z.B. mit Kriechen bei Motormodellen), dann ist es empfehlenswert, die *Submodell-Technik* zu verwenden, um das Modell auf den interessanten Bereich einzuschränken. Die Ergebnisse des globalen Modells werden durch Mapping auf das Submodell übertragen (siehe den Abschnitt über Submodell-Technik auf Seite 57). Dann kann die nichtlineare Analyse für das Submodell alleine durchgeführt werden. Verkürzungen der Laufzeit hängen dabei von der Reduktion des Modells ab. Der Zeitgewinn kann entsprechend für auf-

wändige nichtlineare Analysen im Submodell verwendet werden.

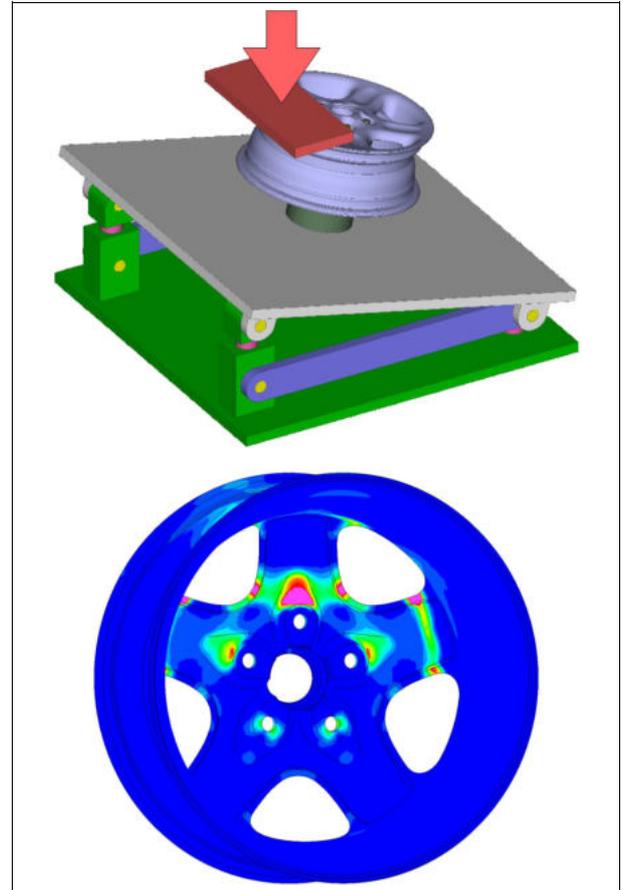


Abbildung 132: Einschlagtest einer Aluminiumfelge mit bleibender plastischer Dehnung.

PERMAS-NLSMAT – Weitere Materialgesetze

Dieses Modul fasst eine Reihe von zusätzlichen Materialgesetzen zusammen, welche die in NLS standardmäßig vorhandenen Materialgesetze ergänzen:

- Es ist ein Materialgesetz für *Gussmaterial* verfügbar, welches das unterschiedliche Verhalten unter Zug und Druck berücksichtigt (siehe Abb. 133).
- Des Weiteren ist ein Materialgesetz für *nicht-lineare kinematische Verfestigung* vorhanden (nach *Armstrong-Frederick*), mit dem vor allem zyklisch-belastete Bauteile berechnet werden können.

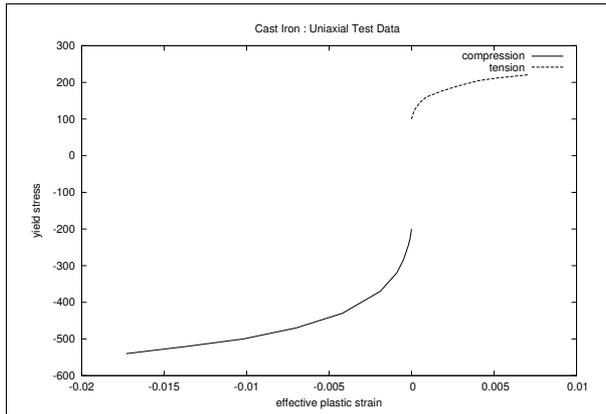


Abbildung 133: Einachsige Testdaten für ein Gusseisen-Material

PERMAS-NLSA – Erweiterte nichtlineare Statik

Dieses Funktionsmodul ermöglicht *hyperelastisches Materialverhalten* (quasi-inkompressiblem) in Kombination mit Elementen für *große Dehnungen* in nichtlinearen Analysen

- Die komplette Familie der Volumenelemente wurde auf große Dehnungen und hyperelastisches Materialverhalten erweitert (siehe Abb. 134). Wenn Elementen, hyperelastische Materialeigenschaften zugewiesen werden, werden die nichtlinearen Statik-Löser automatisch die Formulierung mit großen Dehnungen verwenden. Für alle anderen Analysen, oder ohne Zuweisung von hyperelastischem Material wird die klassische Formulierung mit kleinen Dehnungen verwendet.
- Neue hyperelastische Materialbeschreibung zur Berücksichtigung nichtlinearer Spannungs-Dehnungsbeziehungen (und nahezu inkompressiblem Materialverhalten). Mit der Auswahl eines Ansatzes für das Dehnungspotential stehen folgende Materialmodelle zur Verfügung:
 - Polynomial Modell
 - Reduced polynomial Modell
 - Neo-Hooke Modell
 - Mooney-Rivlin Modell
 - Yeoh Modell
 - Ogden Modell
- Zur Kontrolle des linearisierten, kleinen Dehnungsverhaltens werden für jede hyperelastische Materialdefinition die Größen auf den Res-File gedruckt:

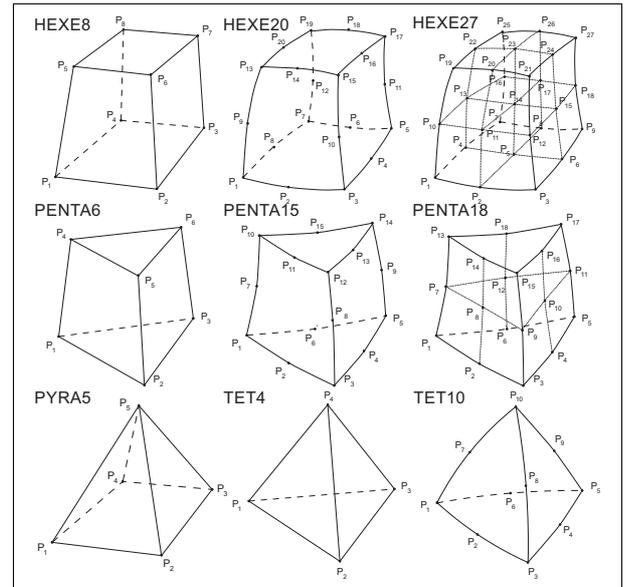


Abbildung 134: Elemente mit großen Dehnungen

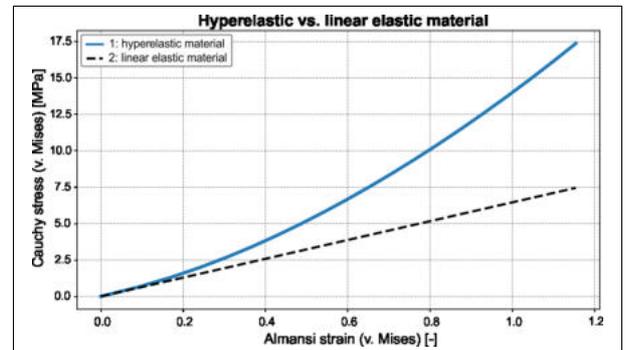


Abbildung 135: Hyperelastisches Material mit nichtlinearer Spannungs-Dehnungsbeziehung (blaue Kurve) und linear elastischem Verhalten (gestrichelt)

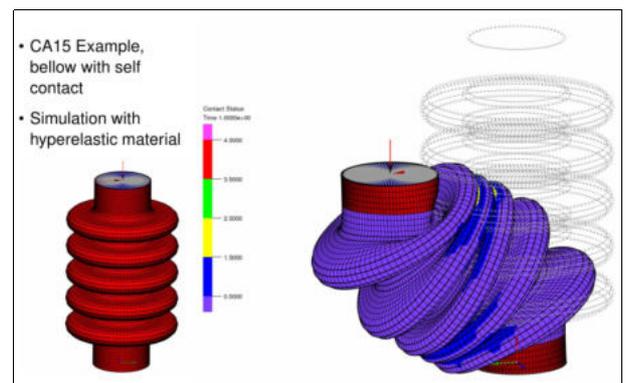


Abbildung 136: Faltenbalg mit Selbstkontakt

```

SENTER MATERIAL
|
$MATERIAL_NAME=MAT_NEOHOOKE TYPE=ISO
SHYPERELASTIC SPTYPE = NEO_HOOKE
1.e4 3.e-5 ! C_10 D_1
SEND MATERIAL
|
$MATERIAL_NAME=MAT_MOONEY
    
```

```

HYPERELASTIC SPTYPE = MOONEYRIVLIN
1.5e4 0.5e4 3.e-5 ! C_10 C_01 D_1
SEND MATERIAL
!
SEXIT MATERIAL
    
```

> Linearization of hyperelastic material for zero strains

Linearized Hyperelastic Material Data (Reftemp = 0.0E+00)		
Material	E	nu
MAT_NEOHOOKE	54.545E+03	363.636E-03
MAT_MOONEY	100.000E+03	250.000E-03

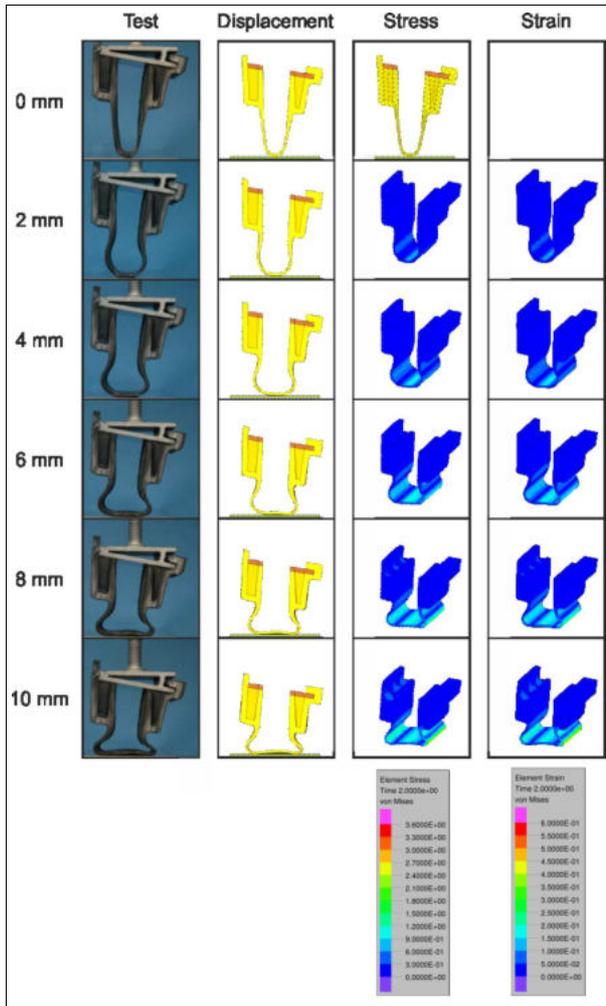


Abbildung 137: Simulation großer Dehnungen (mit freundlicher Genehmigung der Mahle Behr GmbH, Stuttgart, Germany)

folgt auch eine Bewertung der Nichtlinearität des *Vorbeulverhaltens*.

Lastfaktoren und Beulformen stehen als Ergebnisse einer Eigenwertanalyse für das Postprocessing zur Verfügung. Für die Lastfaktoren kann ein Limit oder ein Intervall vorgegeben werden. Für die Eigenwertanalyse steht ein modernes *Shift-Verfahren* zur Verfügung.

Sampling, Topologie-Optimierung und Formoptimierung können nun auch für lineare Beulberechnungen verwendet werden (siehe Abb. 138).

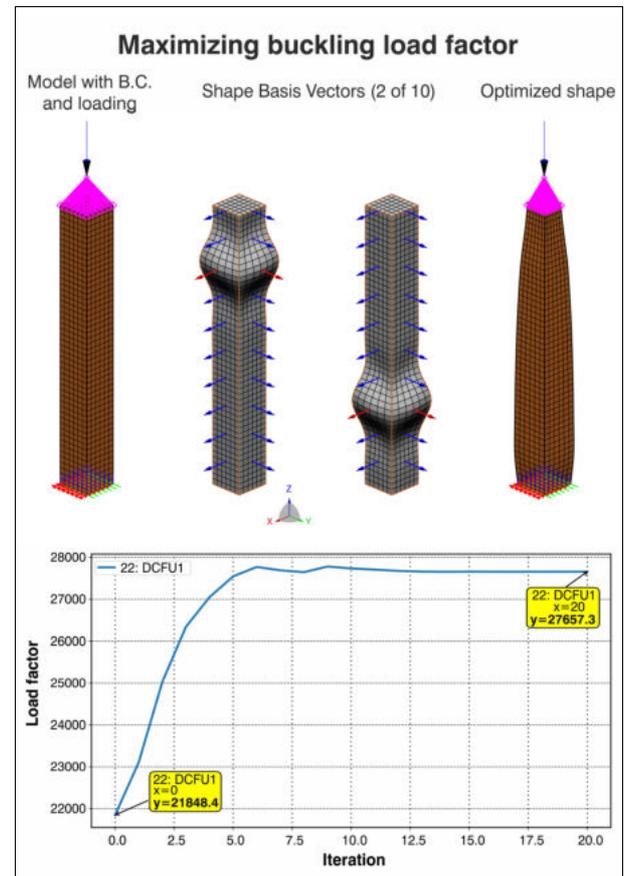


Abbildung 138: Maximierung von Beulfaktoren mit parametrischer Formoptimierung.

PERMAS-BA – Lineare Beulanalyse

Auf der Basis einer linearen statischen Berechnung können unter der aufgebracht Last die Beul-Lastfaktoren und die Beulformen ermittelt werden.

Über die Berechnung *modaler Anteilsfaktoren* er-

PERMAS-HT – Wärmeleitung

Für die Untersuchung von *Temperaturfeldern* stehen die Module PERMAS-HT und PERMAS-NLHT (siehe nachfolgenden Abschnitt) zur Verfügung.

- Die Temperaturfelder können stationär oder instationär sein.

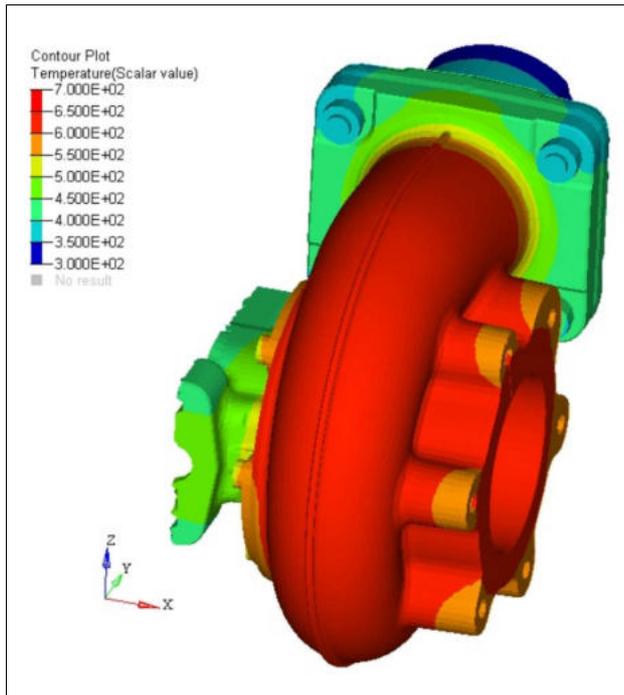


Abbildung 139: Temperaturfeld eines Turboladers

- Nichtlineare Werkstoffkennwerte für Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität werden über eine tabellarische Eingabe spezifiziert.
- Temperatur- und ortsabhängige Wärmeübergangszahlen werden ganz allgemein über Funktionen beschrieben (siehe Seite 68).

Für den Wärmeübergang an der Oberfläche steht ein vollständiger Satz an *Wärmeübergangselementen* zur Verfügung. Diese erlauben auch die Berechnung der Oberfläche eines Elementsets und damit die Bestimmung des Wärmeübergangs durch eine bestimmte Teiloberfläche. Außerdem besitzen diese Elemente eine optionale Filmdicke, so dass eine eventuell vorhandene Grenzschicht näherungsweise abgebildet werden kann. Der Grenzschicht kann auch eine Wärmekapazität zugewiesen werden.

Alle finiten Elemente der statischen Analyse sind auch für Temperaturfeldberechnungen vorhanden. Für Schalenelemente ist ein Temperaturgradient zwischen Schalenunter- und oberseite möglich.

Die Kopplung zur statischen Analyse ist vollständig vollzogen, d.h. die Berechnung von Verschiebungen und davon abgeleitet Dehnungen und Spannungen aufgrund eines Temperaturfeldes ist in einfachster Weise möglich. Dabei können die Werkstoffdaten für die statische Analyse (Elastizitätsdaten und Daten zum thermischen Ausdehnungsverhalten) eben-

falls temperaturabhängig sein.

Zusätzlich können mit PERMAS-CCL thermische Randbedingungen aus einer CFD-Analyse übernommen bzw. gekoppelte Berechnungen durchgeführt werden (siehe Seite 75).

Transiente Analysen können sehr einfach durch direkte Kopplung zu den Ergebnissen des Vorlaufs fortgesetzt werden. Dadurch lassen sich ganze Wärmebehandlungszyklen, selbst mit unterschiedlichen Umgebungsmedien, im gleichen Berechnungslauf durchführen.

Eine *Modalanalyse* erlaubt die Berechnung von Eigenwerten und Eigenformen für Temperaturfeldprobleme.

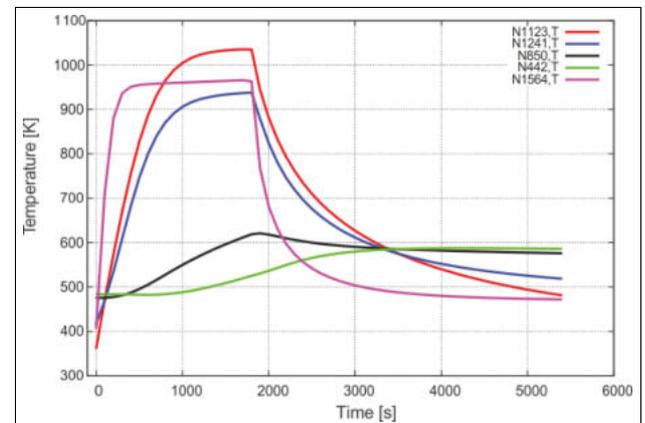


Abbildung 140: Temperaturverlauf an Knoten über der Zeit

Für die Randbedingungen gilt:

- Als stationäre 'Lasten' können sowohl punktförmige Wärmeflüsse als auch linienförmig, flächig oder übers Volumen verteilte Wärmeflüsse definiert werden.
- Transiente 'Lasten' entstehen bequem durch die Kombination von stationären 'Lastverteilungen' mit zeitabhängigen Funktionen (siehe Seite 68).
- Als weitere Randbedingungen lassen sich vorgeschriebene Temperaturen angeben. Zusätzlich ist bei den Wärmeübergangselementen die Umgebungstemperatur zu spezifizieren.

Primäresultate einer Temperaturfeldanalyse sind das Temperaturfeld und der Wärmefluss an Knoten und Elementen. Als abgeleitete Ergebnisse stehen zur Verfügung:

- das Gradientenfeld der Temperaturverteilung,
- der Wärmefluss durch eine beliebige innere Fläche,

- mittels beliebig zusammenstellbaren Elementsets lassen sich die flächenbezogenen oder absoluten Wärmeflüsse durch eine bestimmte Teiloberfläche ermitteln.

Bei transienten Analysen können primäre und abgeleitete Ergebnisse zur Erstellung von xy-Graphen ausgegeben werden.

PERMAS-NLHT – Nichtlineare Wärmeleitung

Die mit PERMAS-HT möglichen nichtlinearen Berechnungen finden bei stärkeren Nichtlinearitäten hier ihre Ergänzung. Eine Reihe moderner Algorithmen unterstützt dabei stationäre und instationäre Berechnungen.

Im Unterschied zu den im vorigen Abschnitt beschriebenen Methoden wird im stationären Fall ein automatisches Lastschrittverfahren verwendet und im transienten Fall ein automatisches Zeitschrittverfahren. Zusätzlich können dabei explizite Zeitpunkte (bzw. Lastniveaus) vorgegeben werden.

Zeitpunkte und Lastschritte, an denen die Ergebnisse ausgegeben werden, können explizit vorgegeben werden.

Strahlung mit Wärmeaustausch

Wärmeübertragung durch Strahlung wird maßgebend mit steigender Temperatur für Bauteile mit Hohlräumen und Selbstabschattung wie in Bremsanlagen, Verbrennungsmotoren und Kühlkörpern. Ziel ist die Berechnung des Wärmetransports durch Strahlung und Konvektion an der Bauteiloberfläche, gekoppelt mit der Wärmeleitung der Struktur.

Die hier zu beachtenden Annahmen sind, dass der Wärmeaustausch zwischen Oberflächen erfolgt (keine Strahlung aus dem Inneren von Körpern), dass die Strahlung von grauen Körpern ausgeht (keine Abhängigkeit von der Wellenlänge), und dass die Abstrahlung diffus erfolgt (keine Abhängigkeit von der Abstrahlungsrichtung).

Die Strahlungsberechnung hat folgende Eigenschaften:

- Die Strahlung ist in der Berechnung der Wärmeübertragung integriert.

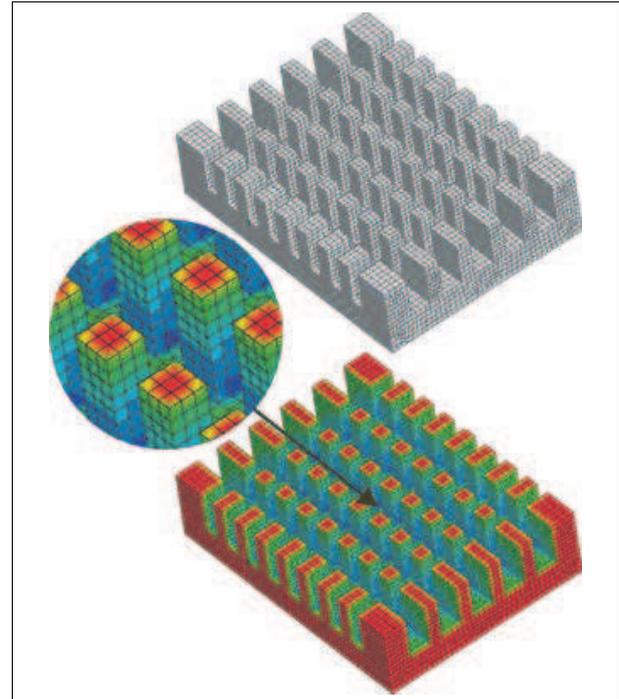


Abbildung 141: Berechnung eines Kühlkörpers mit Strahlung

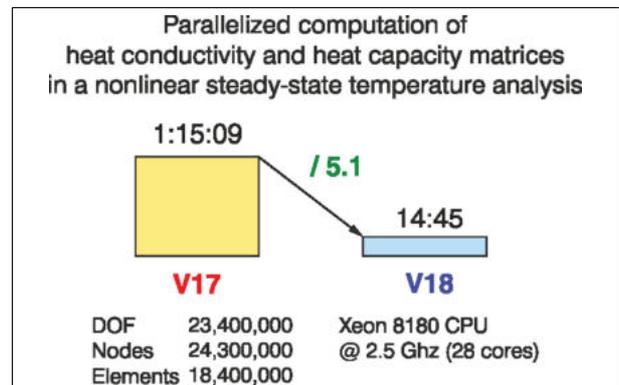


Abbildung 142: Parallelisierung der Berechnung von Leitfähigkeits- und Kapazitätsmatrizen.

- Die Konvektionselemente wurden erweitert um damit strahlende Oberflächen zu modellieren, d.h. alle Oberflächenelemente, die bei der Strahlung berücksichtigt werden sollen, müssen mit Konvektionselementen belegt werden.
- Die *Sichtbarkeitsfaktoren* werden direkt über die beteiligten Oberflächenelemente integriert und nicht über Mittelwerte berücksichtigt.
- Um bei einer sehr großen Anzahl von Oberflächenelementen die Rechenzeit für die Sichtbarkeitsfaktoren zu reduzieren, steht eine automatische (und wählbare) Vergrößerungsfunktion

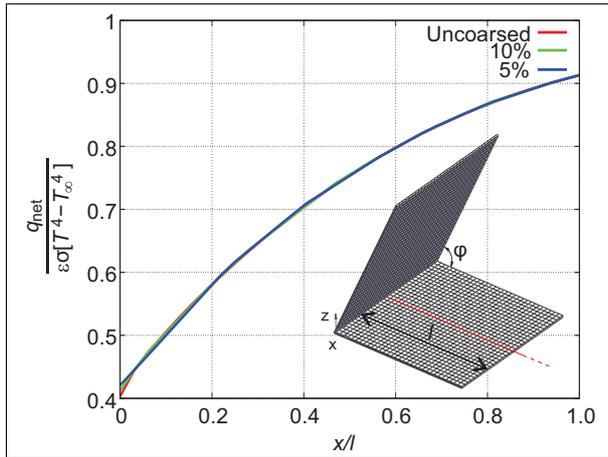


Abbildung 143: Wärmestrahlung
zwischen angewinkelten Platten

on zu Verfügung, welche die Anzahl der Oberflächenelemente reduziert.

- Um die Effizienz der Berechnung zu erhalten, wird auch die *Parallelisierung* eingesetzt.
- Die gekoppelte Lösung der nichtlinearen Wärmetransportgleichung mit Strahlungsrandbedingungen wird in ein paar Iterationen ermittelt, sowohl stationär als auch transient.

PERMAS Paket VA / Vibro-Akustik

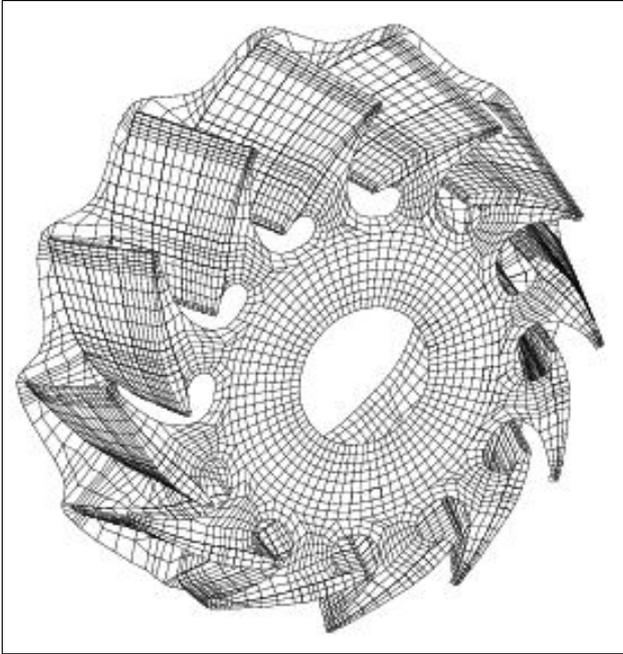


Abbildung 144: Halbmodell einer Turbine
Halbmodell einer Turbine, achte Eigenform bei
antisymmetrischen Randbedingungen

PERMAS-DEV – Dynamik (Eigenwerte)

Das Modul PERMAS-DEV (Dynamik Eigenwerte und -vektoren) ermöglicht die Berechnung von *reellen Eigenwerten* und Eigenformen der Struktur (*Modalanalyse*). Zur Eingrenzung des berechneten Frequenzbereichs kann eine Anzahl von Eigenformen oder eine untere und obere Frequenzschranke angegeben werden. Der hierfür verwendete, sehr effiziente Algorithmus zur *Unterraumiteration* ist zur Lösung selbst größter Eigenwertaufgaben geeignet. Starrkörpereigenformen werden automatisch gefunden oder können auch explizit definiert werden. In jedem Fall werden sie vor der Eigenwertanalyse entkoppelt.

Mit steigender Anzahl von Moden beobachtet man eine überproportionale Zunahme der Rechenzeit für die Eigenwertanalyse, weil die letzten Moden mehr Zeit benötigen als die ersten. Deshalb wurde eine *Shift-Methode* eingeführt, um den Frequenzbereich in mehrere Teile aufzuteilen und jeden Teil für sich zu lösen. Damit können die letzten Moden genauso schnell ermittelt werden wie die ersten, was ins-

gesamt zu einer Laufzeitreduktion führt. Die Shift-Methode wird automatisch verwendet, wenn eine große Anzahl von Moden gesucht wird (> 5000) oder wenn die Standardmethode zu lange für das Erreichen der Konvergenz benötigt. Außerdem sorgt die Shift-Methode für eine verbesserte Genauigkeit der Eigenformen.

Die Steifigkeitsmatrix kann vor einer Eigenwertberechnung durch zusätzliche Effekte modifiziert werden:

- *Geometrische Steifigkeit* für beliebige Belastungen,
- *Zentrifugalfeldsteifigkeit* für rotierende Bauteile unter konstanter Drehgeschwindigkeit in einem mitrotierenden Bezugssystem,
- *Konvektive Steifigkeit* für rotierende Bauteile unter konstanter Drehgeschwindigkeit in einem Inertialsystem,
- *Drucksteifigkeit* für Schalenelemente und flüssigkeitsgefüllte Rohrelemente unter Druckbelastung.

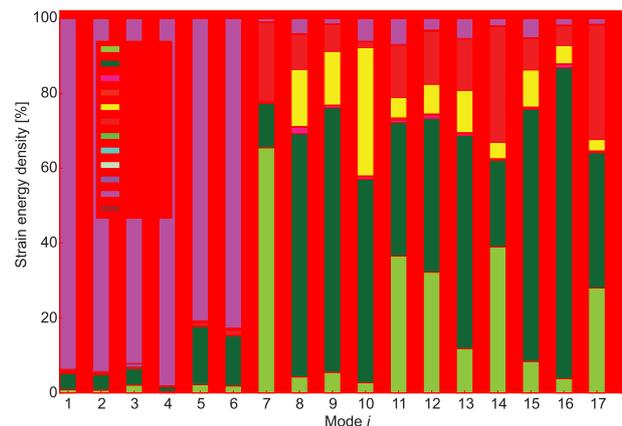


Abbildung 145: Analyse der Dehnungsenergie
in Elementsets für mehrere Moden

Für die weitere Bearbeitung von Eigenformen stehen zusätzliche Hilfsmittel zur Verfügung:

- Aus den Verschiebungsformen der Eigenformen können modale Spannungen abgeleitet werden.
- Außerdem können modale potentielle und kinetische Energien berechnet und ausgegeben werden (siehe Abb. 145).
- Zur Bewertung der Eigenformen z.B. hinsichtlich lokaler oder globaler Eigenformen können Energiebilanzen über alle Sets einer Struktur ermittelt und ausgegeben werden.
- Zum Vergleich der Eigenformen aus verschiedenen Eigenwertanalysen können *MAC-Faktoren*

(Modal Assurance Criterion) und weitere Faktoren berechnet und ausgegeben werden (siehe Seite 73).

- Zur Beurteilung der Vollständigkeit eines modalen Modells eignen sich *effektive Massen*, die in geeigneter Weise auf der Ergebnis-Datei ausgegeben werden.

Eine *verallgemeinerte modale Kondensation* ermöglicht den Aufbau aller erforderlichen Systemmatrizen im Modalraum, um die Berechnung außerhalb von PERMAS durchzuführen. Der Export dieser Matrizen wird entweder durch spezielle Schnittstellen (z.B. zu MKS-Systemen) durchgeführt oder durch explizite Angabe der auszugebenden Matrizen.

PERMAS-DEVX – Erweiterte Eigenwertanalyse

Dieses Modul umfaßt zusätzliche Methoden für die Ermittlung dynamischer Eigenwerte und -formen:

- *Dynamische Kondensation*
- Komplexe Eigenwertberechnung
- Eigenwertverlauf über Drehzahlbereich für drehende Systeme

Dynamische Kondensation

Zwei Verfahren stehen für die dynamische *Kondensation* zur Verfügung:

- Verfahren nach Craig-Bampton (CB-Kondensation),
- Verfahren nach Craig-Bampton mit gemischten Randbedingungen (MBCB-Kondensation).

Craig-Bampton-Verfahren:

Das Verfahren von *Craig-Bampton* verwendet die Eigenschwingungsformen von Teilstrukturen bei festgehaltenem Rand und zusätzliche statische Verschiebungsformen aufgrund von Einheitsverschiebungen am Rand der Teilstrukturen (*CB-Kondensation*). Wie für die *statische Kondensation* stehen auch hier explizite und iterative Verfahren für die Kondensation zur Verfügung, um kurze Rechenzeiten sicherzustellen (vergleiche auch Seite 57).

Die bereitgestellte Funktionalität läßt sich wie folgt beschreiben:

- **Einsatzgebiete**
 - Strukturdynamik

- Akustik
- gekoppelte Fluid-Struktur Akustik

Zwei Optionen stehen für die *Kondensation* bei der gekoppelten Fluid-Struktur Akustik zur Verfügung (siehe auch Seite 103):

- **„Trockene“** Kopplung
 - Lösung des gekoppelten Eigenwertproblems für eine Teilkomponente, d.h. das Fluid wird von der Teilkomponente eingeschlossen und keine Druckfreiheitsgrade koppeln nach außen. Somit sind die externen Moden der Teilkomponente selbst gekoppelte Moden.
 - Die Gesamtlösung kann damit eine reine Strukturschwingungsanalyse sein.
- **„Benetzte“** Kopplung
 - Die mechanischen und akustischen Moden werden in getrennten Teilkomponenten berechnet.
 - Die Gesamtlösung ist somit selbst eine gekoppelte Fluid-Struktur-Berechnung.
 - Dies erfordert eine zusätzliche Kondensation der Koppellemente zwischen Fluid und Struktur.

Craig-Bampton-Verfahren mit gemischten Randbedingungen:

Das *Craig-Bampton-Verfahren mit gemischten Randbedingungen* erlaubt auch freie (oder gemischte) Randbedingungen zur Ermittlung der Schwingungsmoden (*Mixed-Boundary Craig-Bampton, MBCB-Kondensation*). Die entsprechenden statischen Verschiebungen werden über eine quasistatische Analyse (d.h. *Inertia Relief*) ermittelt. Dieses Verfahren hat Vorteile für Strukturen, die freie Randbedingungen haben, weil die Kondensation mit entsprechenden Randbedingungen arbeiten kann. Dabei können weniger Moden zu einer höheren Genauigkeit des kondensierten Systems führen verglichen mit dem klassischen Verfahren.

The oben beschriebene „trockene“ Kondensation von Teilen mit eingeschlossenen Fluiden kann auch mit dem Craig-Bampton-Verfahren mit gemischten Randbedingungen durchgeführt werden.

Komplexe Eigenwertanalyse

Dies umfasst die Berechnung komplexer Eigenwerte und Eigenvektoren im Modalraum. Das verwendete Verfahren basiert auf einer zuvor durchgeführten Berechnung der reellen Eigenwerte.

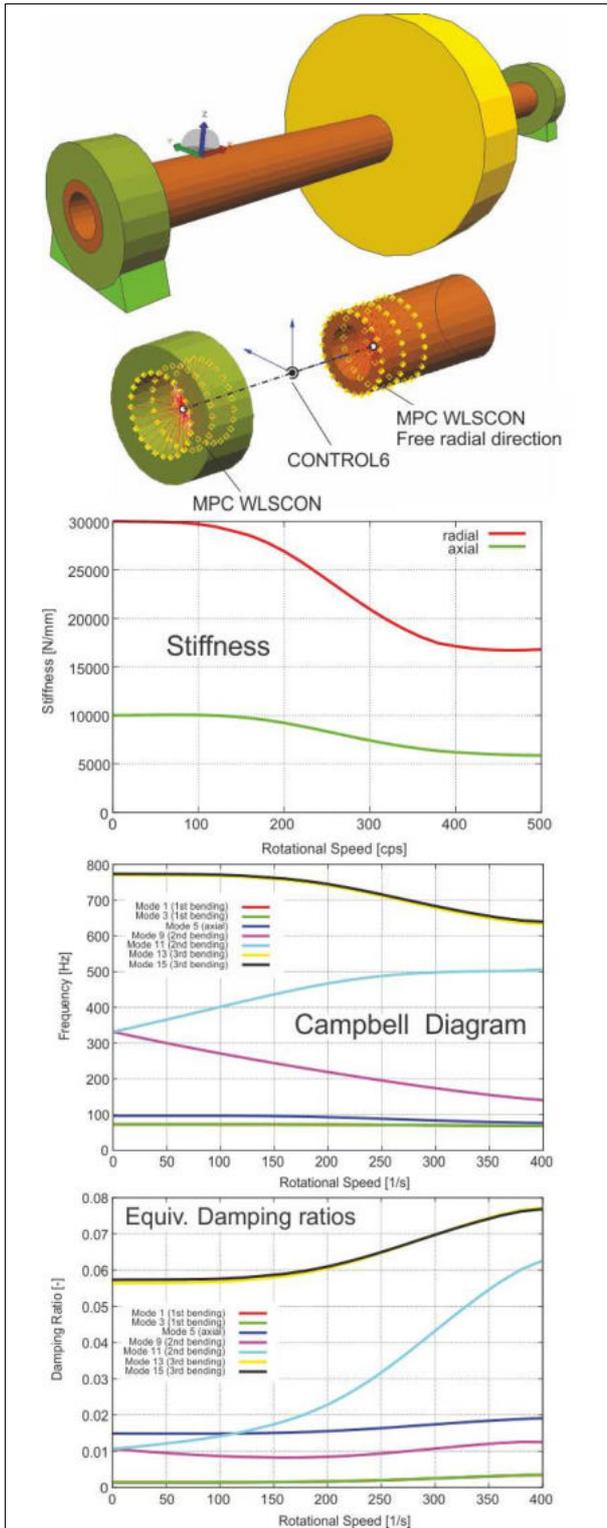


Abbildung 146: Rotor mit drehzahlabhängigen Lagern

Die damit ermittelten Ergebnisse sind wie folgt:

- Frequenzen
- **Komplexe Eigenwerte**
- Komplexe Eigenfrequenzen (jede mit Kreisfre-

quenz und Dämpfung)

- Äquivalente viskose Dämpfungsverhältnisse
- Komplexe Eigenformen in physikalischer und modaler Darstellung. Die modalen Verschiebungen der komplexen Eigenformen stellen die modalen Anteile der zu Grunde liegenden reellen Eigenformen dar.

Mit einem geeigneten Postprozessor (wie VisPER) können die komplexen Eigenformen auch animiert dargestellt werden.

Eigenwerte rotierender Systeme

Für rotierende Systeme (siehe auch Seite 31) stellt sich oft die Aufgabe, den Verlauf der Eigenfrequenzen über der Drehzahl darzustellen (in einem **Campbell-Diagramm**). Dieser Verlauf lässt sich in einem einzigen Rechenlauf automatisch erstellen. Damit können die interessanten Punkte für eine nachfolgende Frequenzgangberechnung einfach ermittelt werden.

Für rotierende Strukturen kann eine beliebige Anzahl von Drehgeschwindigkeiten in einer eigenen Eingabe spezifiziert werden. Eine Referenzgeschwindigkeit wird in einem statischen Vorlauf verwendet, um die erforderlichen Zusatzmatrizen zu ermitteln. Diese werden dann mit jeweiligen Drehgeschwindigkeiten skaliert. Damit wird die Erstellung von Campbell-Diagrammen sehr effizient und die Berechnung des Antwortverhaltens drehender Strukturen erleichtert.

PERMAS-MLDR – Eigenwerte mit MLDR

Die Ermittlung von Eigenwerten mit den Modulen DEV (Seite 96) und DEVX (Seite 97) wird durch eine weitere Methode ergänzt. Diese Methode kann auch bei der Ermittlung von gekoppelten Fluid-Struktur-Moden verwendet werden.

Die Anwendung dieser Methode ist vorteilhaft, wenn die Laufzeiten einer Eigenwertanalyse hauptsächlich durch I/O bestimmt werden. Dies ist vor allem bei großen Modellen der Fall, für die auch eine große Anzahl von Moden gerechnet werden muss. Je größer die Modelle werden und je größer die Anzahl der Moden wird, um so größer wird auch der Rechenzeitvorteil durch die Anwendung der MLDR-Methode.

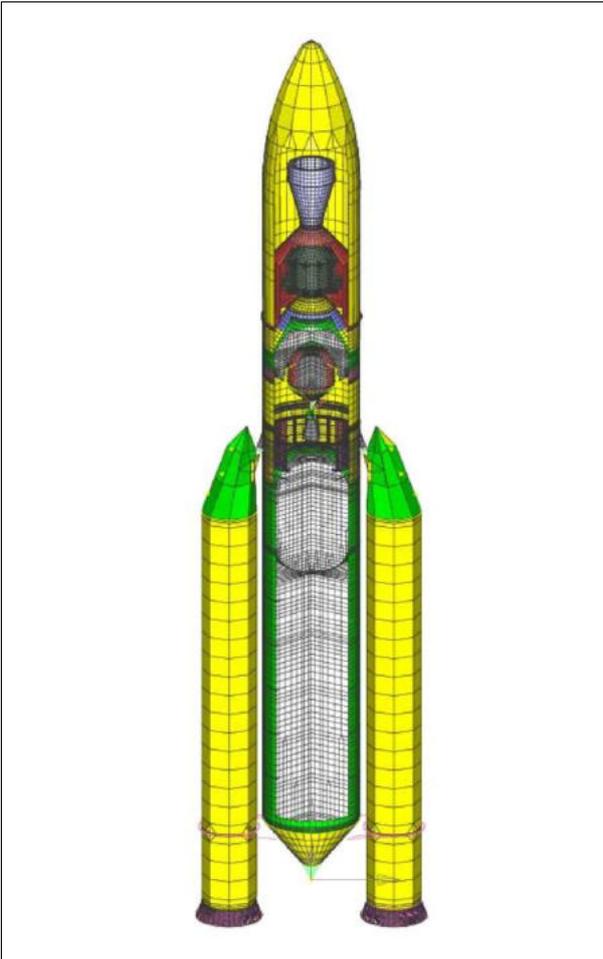


Abbildung 147: Modell der Ariane 5 Trägerrakete von ASTRIUM Space Transportation, Les Mureaux

Dieser Laufzeitvorteil kann sich noch erheblich steigern, wenn der Eigenwertanalyse eine dynamische Simulation folgt, bei der es auf Frequenzgänge oder Zeitverläufe nur einiger relativ weniger Knoten ankommt. In diesen Fällen kann die Ermittlung der globalen Moden für alle Freiheitsgrade unterbleiben, was einen erheblichen Rechenzeitgewinn bedeutet.

Die MLDR-Methode basiert darauf, dass das Modell automatisch in Teile aufgespalten wird, die eine gewisse vorgegebene Größe nicht überschreiten. Dabei wird auf eine geringe Kopplung dieser Teile untereinander geachtet. Diese Teile werden dann als Teilstrukturen durch Anwendung der *dynamischen Kondensation* (siehe Teilstrukturtechnik Seite 57 und Modul DEVX Seite 97) gruppenweise zusammengefasst. Dieses Verfahren wird hierarchisch solange fortgesetzt, bis die Gesamtstruktur in einer Komponente repräsentiert ist. Dabei verbleiben lediglich eine Reihe von Knoten und Elementen in der Hauptkomponente und das dy-

namische Verhalten wird vor allem durch die von den Teilstrukturen übernommenen Eigenfrequenzen und Eigenformen bestimmt, welche nach den Regeln der dynamischen Kondensation verbunden werden. Diesem mehrstufigen dynamischen Reduktionsverfahren verdankt die Methode ihren Namen *MLDR (Multi-Level Dynamic Reduction)*.

Um nachfolgend das Antwortverhalten berechnen zu können, werden auch verbundene Situationen (siehe Seite 102) und statische Verschiebungsformen (siehe Seite 102) berücksichtigt. Ebenso können auch statische Verschiebungsformen einer quasistatischen Analyse (siehe Seite 79) verwendet werden. Auch temperaturabhängige Steifigkeiten können berücksichtigt werden.

Sollen ganz bestimmte Knoten und Elemente in der Hauptkomponente präsent sein, so kann dies der Anwender direkt angeben. Damit können ausgesuchte Modellteile in die Hauptkomponente gezwungen werden, was die weitere Verarbeitung der Moden auf einem relativ kleinen System sehr vorteilhaft gestaltet. So lassen sich anschließend dynamische Simulation, Anbindung an MKS, Optimierung auf dem verbleibenden System oder die Einbindung von Nichtlinearitäten mit äußerst niedrigen Rechenzeiten realisieren.

Da die Methode vollständig parallelisiert ist, können weitere Rechenzeitvorteile durch die Nutzung von Mehrprozessormaschinen erzielt werden. Insgesamt ist daher mit dem Einsatz von MLDR ein wesentlicher Fortschritt in der Produktivität verbunden und erlaubt somit z.B. auch Berechnungen bis in einen höheren Frequenzbereich hinein als vorher und dies auch mit feineren Netzen.

PERMAS-DRA – Dynamik (Response)

Mit PERMAS-DRA (Dynamic Response Analysis) kann die dynamische Antwort der Struktur im Zeit- oder Frequenzbereich ermittelt werden.

Die Lösung der dynamischen Gleichung kann dabei jeweils direkt (mit physikalischen Freiheitsgraden) oder modal (nach Transformation in den Modalraum) erfolgen.

- Die **Antwort im Zeitbereich** (*Transient Response*) wird durch Integration der Bewegungsglei-

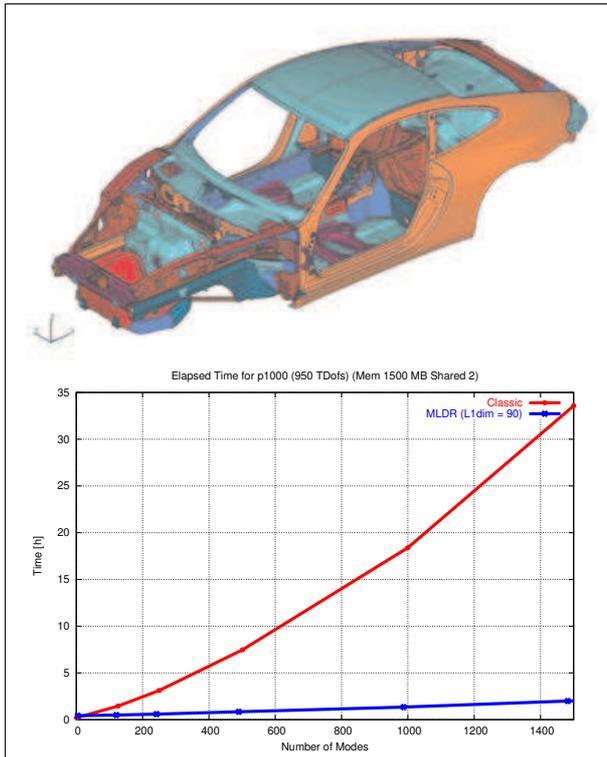


Abbildung 148: Vergleich von Rechenzeiten für Unterraumiteration (obere Kurve) und MLDR (untere Kurve) bei wachsender Zahl von Eigenwerten (157412 Knoten, 164301 Elemente (QUAD4), 944472 Unbekannte)

chung ermittelt:

- Transiente Antwort als absolute Antwort oder als rein elastische Antwort ohne Starrkörperanteil.
 - Direkte Integration der Bewegungsgleichungen oder Integration nach Transformation in den Modalraum. Als Löser stehen *Newmark* β und HHT (*Hilber-Hughes-Taylor*) zur Verfügung.
- Die Berücksichtigung konzentrierter nichtlinearer Struktureigenschaften ist möglich über
- nichtlineare Federelemente,
 - nichtlineare Dämpferelemente und
 - nichtlineare Regelemente.
- Die **Antwort im Frequenzbereich** (*Frequency Response*) wird durch Lösen des linearen, komplexen Gleichungssystems für jede geforderte Frequenz ermittelt:
 - Absolute Antwort oder als elastische Antwort ohne Starrkörperanteil.
 - Direkte Lösung des Gleichungssystems oder

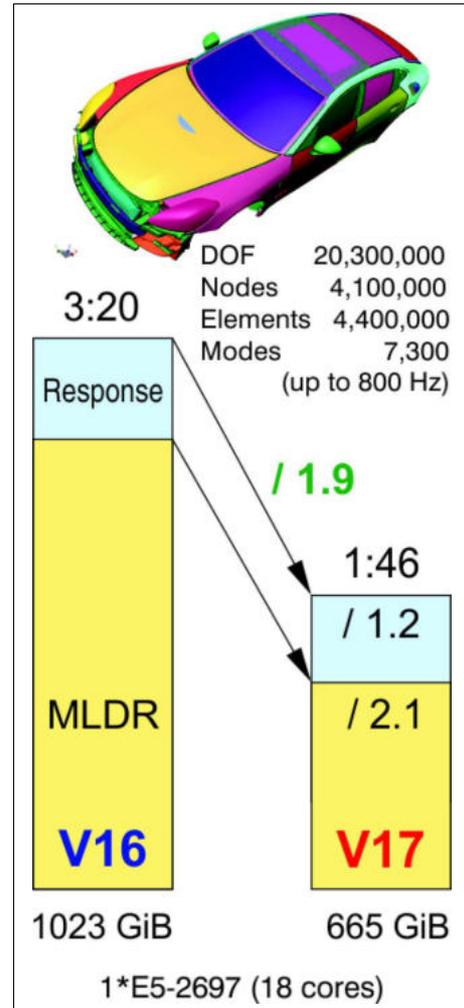


Abbildung 149: Dyn. Karosserieberechnung

Lösung nach Transformation in den Modalraum.

Frequenz- und drehzahlabhängige Steifigkeit und Dämpfung kann über das CONTROL6-Element berücksichtigt werden (siehe die Beispiele in Abb. 150 und Abb. 146).

- Ohne den Einschwingvorgang durchlaufen zu müssen, kann die **stationäre Antwort** (*Steady-State Response*) berechnet werden. Dabei werden Ergebnisse von Frequenzganganalysen im Zeitbereich überlagert. Dazu kann noch ein statischer Lastfall berücksichtigt werden. Dies ist für alle periodischen Anregungen mit bekannter harmonischer Zusammensetzung möglich.

Durch Angabe eines Knoten- oder Element-Sets (siehe Seite 67) kann bei der modalen Lösung die Ermittlung der Ergebnisse auf den angegebenen Bereich beschränkt werden. Diese **Reduktion**

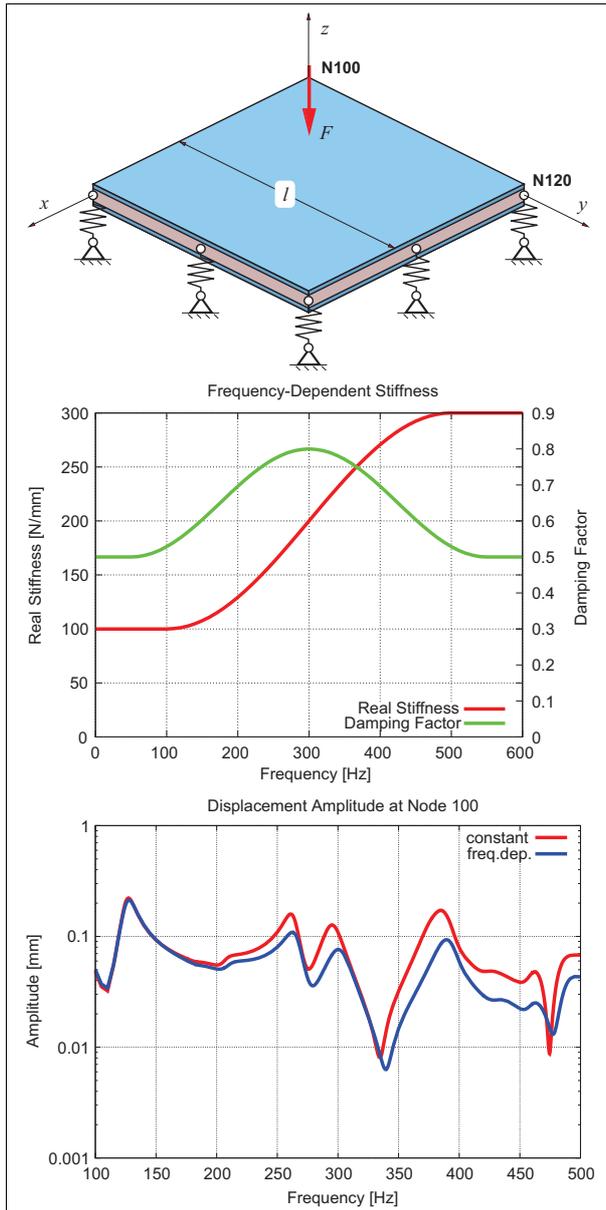


Abbildung 150: Frequenzabhängige Steifigkeit und frequenzabhängige viskose Dämpfung in der Frequenzganganalyse

bringt eine enorme Einsparung an Rechenzeit und Plattenplatzbedarf.

Für die Antwort im Zeit- und Frequenzbereich gilt:

- Zur Modellierung der **Dämpfungseigenschaften** stehen folgende Möglichkeiten zur Verfügung:
 - Materialdämpfung bzw. Strukturdämpfung für Elemente,
 - globale Strukturdämpfung für Komponenten,
 - proportionale Dämpfung (Rayleighdämpfung),
 - viskose Dämpferelemente,

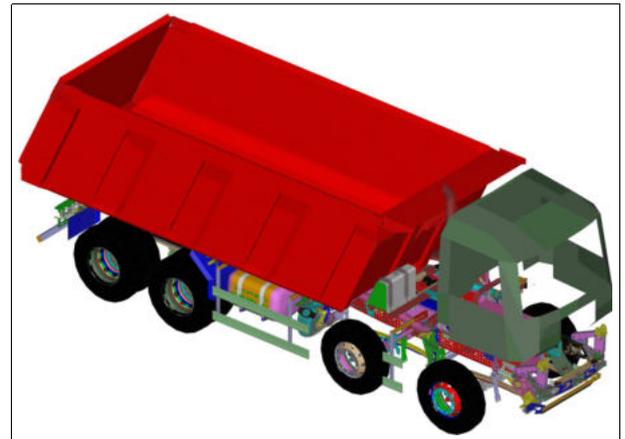


Abbildung 151: Das Modell eines Kippers (mit freundlicher Genehmigung der Daimler AG, Stuttgart).

- modale viskose Dämpfung,
 - modale Strukturdämpfung,
 - modale Struktur- und Rayleigh-Dämpfung für Teilkomponenten,
 - direkte Eingabe der modalen Dämpfungsmatrix ,
 - direkte Eingabe der Dämpfungsmatrix.
- Für die Berechnungen im Frequenzbereich können die Strukturdämpfungen wahlweise auch in Abhängigkeit der Frequenz beschrieben werden.
- Frequenzabhängige viskose Dämpfung ist mit Hilfe eines speziellen Elements (d.i. CONTROL6-Element) möglich.

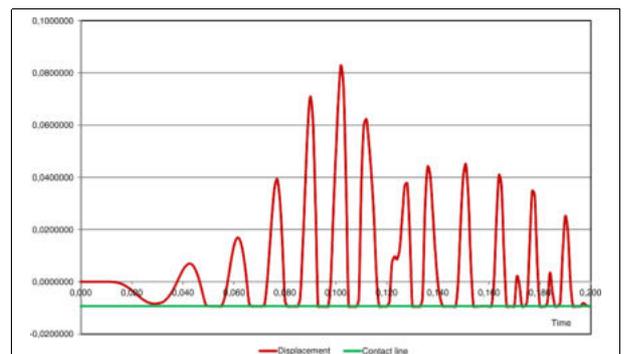


Abbildung 152: Antwort im Zeitbereich unter Kontaktbedingungen

- Die Anregung erfolgt über statische Lastverteilungen, die mit zeit- bzw. frequenzabhängigen Funktionen kombiniert werden (siehe Seite 68). Die Lastverteilungen können folgende Anteile enthalten:
 - Einzelkräfte oder -momente,

- Verteilte Lasten (Linienlasten, Flächenlasten, Volumenlasten),
 - Trägheitslasten,
 - Vorgeschriebene Verschiebungen.
- Als Primärergebnisse werden
 - Verschiebungen,
 - Geschwindigkeiten und
 - Beschleunigungen.
 geliefert. Diese können als Funktion der Zeit bzw. der Frequenz zur Erstellung von xy-Graphen ausgegeben werden.
 - Weiter lassen sich folgende Ergebnisse ableiten:
 - Reaktionskräfte,
 - Spannungen bzw. Elementkräfte,
 - Dehnungsenergien,
 - kinetische Energien,
 - spezifische Schallabstrahlungsleistung.

Beim Einsatz modaler Verfahren stehen weitere Funktionen zur Verfügung:

Statische Verschiebungsformen können erstellt werden, um die modale Basis der dynamischen Eigenformen zu ergänzen. Damit verbunden sind zwei Vorteile:

- Im niedrigen Frequenzbereich werden dadurch die Ergebnisse wesentlich genauer.
- Es lassen sich auch Freiheitsgrade berücksichtigen, die nicht mit der Struktur selbst verbunden sind (z.B. bei Regelelementen).

Die statischen Verschiebungsformen können also durch folgende Angaben spezifiziert werden:

- direkt durch Knotenverschiebungen,
- durch externe Lasten,
- durch Ergebnisse einer anderen Analyse,
- durch natürliche Kräfte spezifizierter Elemente (wie Federkräfte),
- Implizit durch vorhandene Regelelemente,
- durch Trägheitskräfte, wie sie durch eine quasistatische (*Inertia Relief*) Berechnung ermittelt werden.

Verbundene Situationen (Assembled Situations) können verwendet werden, um Frequenzganganalysen mit verschiedenen dynamischen Lastfällen deutlich schneller zu berechnen. Anstatt die Lösung für alle Lastfälle getrennt durchzuführen, wird eine kombinierte Analyse erstellt.

Für Modelle mit vielen Eigenwerten, vielen Anregungsfrequenzen und nur einigen wenigen Dämpfern ist die Berechnung des Frequenzgangs sehr aufwändig. So lange die Dämpfung nicht frequenzabhängig ist (und nur wenige diskrete Dämpfer vorhanden sind), ist eine Diagonalisierung des Systems durch einfache Zerlegung auf der Basis einer komplexen Eigenwertanalyse möglich. Dann erfolgt eine explizite Invertierung der erhaltenen Systemmatrix nach der Formulierung von *Shermann-Morisson-Woodbury SMW*. Die nachfolgende Berechnung der einzelnen Frequenzpunkte ist dann sehr schnell. Insgesamt ist der **SMW-Löser** viel schneller als der allgemeine Löser für modale Frequenzganganalysen.

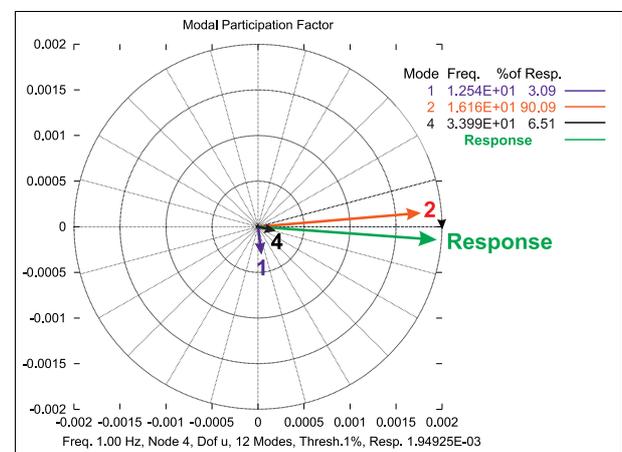


Abbildung 153: Beteiligungsfaktoren
Modale Freiheitsgrad-Beteiligungsfaktoren

Für die weitere Bearbeitung von modalen Ergebnissen stehen zusätzliche Hilfsmittel zur Verfügung:

- Zur Bewertung der Anteile von Moden an der Strukturantwort können die *modalen Anteilsfaktoren* für die Primärergebnisse ausgegeben werden.
- Zur Bewertung der Anteile eines Freiheitsgrades an der Strukturantwort können modale Beteiligungsfaktoren von Knoten für die Primärergebnisse ermittelt und ausgegeben werden.
- Für die Antwort im Zeitbereich kann über den betrachteten Zeitbereich eine statistische Auswertung der Spannungen und Schnittkräfte erfolgen, welche die Maximal- und Effektivwerte ermittelt. Diese statistischen Werte können z.B. für eine Lebensdauerbetrachtung herangezogen werden.

Viskoelastisches Material

Für den Einsatz von *visko-elastischem Materialverhalten* in der Dynamik wurde eine Methode implementiert, die auf *Prony-Reihen* basiert. Auf diese Weise können frequenzabhängige Materialdaten in einer direkten transienten und direkten Frequenzgang-Analyse verwendet werden (wie für Gummiteile, feste Treibstoffe, etc.). Um die einzelnen Terme einer Prony-Reihe zu berechnen, wurden zwei neue Elementtypen entwickelt: Ein Hexaeder-Element mit 8 Knoten, wobei jeweils ein Element für einen Term der Reihe verwendet wird, und ein weiteres Element mit internen Knoten, das alle gewünschten Terme einer Reihe berücksichtigt. Letzteres Element nutzt eine interne Kondensationsmethode. Deshalb unterscheiden sich die Ergebnisse der beiden Elemente etwas. Der Anwender kann entscheiden, welches Element er verwenden möchte.

Schiefsymmetrische Drucksteifigkeit

Der symmetrische Anteil der Drucksteifigkeit kann für die Eigenwertanalyse verwendet werden. Zusätzlich kann der schiefsymmetrische Anteil der Drucksteifigkeit bei der Berechnung des dynamischen Antwortverhaltens und bei der komplexen Eigenwertanalyse berücksichtigt werden.

PERMAS-DRX – Erweiterte Dynamik

Dieses Modul fasst weitere Methoden für die Ermittlung des Antwortverhaltens zusammen:

- Spektrales Antwortverhalten (oder *Erdbebenanalyse*),
- Zufallserregte Schwingungen (oder *Random Response*).

Spektrales Antwortverhalten

Bei einer Anregung des Untergrundes wie bei einem Erdbeben wird die dynamische Antwort im Zeitbereich durch ein vereinfachtes Verfahren ersetzt, das Abschätzungen für die Maximalwerte liefert. Die Voraussetzungen hierfür sind:

- unidirektionale Translationsbewegungen des Untergrundes,
- keine weiteren Lasten,
- Behandlung im Modalraum möglich,

- nur modale viskose Dämpfung.

Nach der Festlegung der Richtung der vorgeschriebenen Bewegung wird die Last als Spektrum der transienten Anregung (*Responsespektrum*) eingegeben. Auf dieser Basis wird folgender Berechnungsgang durchgeführt:

- Berechnung aller Eigenfrequenzen bis zur höchsten interessierenden Frequenz.
- Berechnung der maximalen Beiträge jeder Eigenform.
- Summation der maximalen Beiträge jeder Eigenform. Dabei stehen 7 verschiedene *Summationsregeln* für den Anwender zur Verfügung (wie *CQC* oder *10%-Regel*).
- Ausgabe der Spitzenwerte.

Zufallserregte Schwingungen

Häufig sind Schwingungsbeanspruchungen nicht vorhersagbar, man denke nur an ein Fahrzeug auf holpriger Straße, ein Gebäude unter Windlast oder ein Schiff in rauher See.

Solche zufälligen Lasten lassen sich zweckmäßig durch Zufallsprozesse im Zeitbereich beschreiben. Korrelationen zwischen diesen Prozessen und deren Transformation in den Frequenzbereich führen auf den zentralen Begriff der *Spektraldichte* (oder *Power Spectral Density*).

Unter dem bekannten weißen Rauschen wird hierbei verstanden, wenn die Spektraldichte einer Last über den gesamten Frequenzbereich einen konstanten Wert hat.

Die Lastgrößen werden als Spektraldichten spezifiziert und die Ergebnisse stehen als Spektraldichten oder RMS-Werte zur Verfügung.

Dieses Verfahren ist in modaler Form implementiert, d.h. zunächst wird ein Eigenwertproblem gelöst, dann werden die Schwingungsanregungen im Modalraum ermittelt und abschließend nach der Rücktransformation werden die Ergebnisse ausgegeben.

PERMAS-FS – Fluid-Struktur Akustik

Das Modul PERMAS-FS (Fluid-Struktur Akustik) erlaubt sowohl die Berechnung von rein akustischen Schwingungsformen (ungekoppelte Berech-

nung) als auch die Berechnung von gekoppelten Fluid-Struktur Eigenschwingungen. In beiden Fällen ist darüberhinaus die Berechnung des dynamischen Antwortverhaltens im Zeit- und Frequenzbereich (gekoppelt und ungekoppelt) möglich. Dabei kann die Berechnung direkt oder modal erfolgen. Abb. 154 zeigt eine Übersicht zu den Berechnungsmöglichkeiten für ein Fluid alleine oder gekoppelt mit einer Struktur.

Akustik	Fluid alleine	Fluid gekoppelt mit Struktur
Freiheitsgrade	Druckänderung	+ Verschiebung
Elemente	Fluid, Abstrahlrandbedingung, Oberflächenwellen, halbumendliche für mitbewegte Masse	+ Kopplung, Struktur
Materialwerte	Dichte, Kompressibilität (auch inkompressibel)	+ Dichte, E-Modul, Querkontraktion
Reelle Eigenwerte und Eigenformen	ja	gekoppelt, mit Energieverteilung
Statische Zusatzmoden	ja	ja
Dynamische Kondensation	nach Craig-Bampton	trocken (nur auf Verschiebungshg.) oder benetzt (auch auf Druckhgh.)
Dämpfung	Absorption an Oberflächen und im Volumen	+ jede Dämpfung der Struktur
Modale dynamische Antwort	im Frequenz- und Zeitbereich	im Frequenz- und Zeitbereich
Direkte dynamische Antwort	im Frequenz- und Zeitbereich	im Frequenzbereich
Primäre Ergebnisse	Drücke	+ Verschiebungen, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen
Sekundäre Ergebnisse	Schallschnellen	+ Spannungen, Dehnungen, etc.

Abbildung 154: Übersicht zur Akustik für ein Fluid alleine und für ein Fluid gekoppelt mit einer Struktur.

Das Fluid kann kompressibel oder inkompressibel sein. Alle Fluideigenschaften bzgl. Absorption oder Dämpfung können auch im ungekoppelten Fall berücksichtigt werden. Die Fluiddämpfung kann auch frequenzabhängig sein.

Spezielle Randbedingungen des Fluids können in besonderer Weise berücksichtigt werden:

- Oberflächenwellen werden mit speziellen Elementen modelliert.
- An der Grenzfläche zwischen Struktur und Fluid wird der Übergang durch spezielle Koppel-elemente modelliert, wobei Absorption an der

Oberfläche der Struktur berücksichtigt werden kann. Als weitere akustische Dämpfung stehen Volumendämpfer (z.B. für Autositze) zur Verfügung.

- Für die Modellierung eines unendlichen umgebenden Raumes können halb-unendliche Elemente verwendet werden.
- Für Abstrahlungsrandbedingungen stehen zwei Elementfamilien zur Verfügung: RBC (Radiating Boundary Condition)- Elemente nach *Bayliss-Turkel* und solche nach *Engquist-Majda*.

Für die genannten Kopplungselemente zeigt die Flächennormale vereinbarungsgemäß vom Fluid zur Struktur. Diese Bedingung wird automatisch überwacht, so dass entscheidende Fehlerquellen für die Kopplung umgangen werden können.

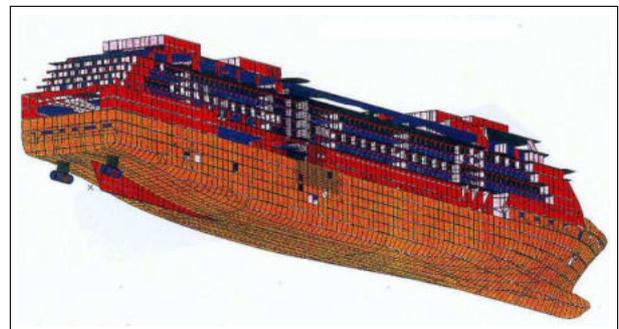


Abbildung 155: Schiffsmodell mit freundlicher Genehmigung von Chantiers de l'Atlantique, Saint-Nazaire

Für die Ermittlung von Eigenfrequenzen unterscheidet man zwischen den voll gekoppelten Moden und den durch die Fluidmasse verstimmteten Strukturmoden:

- Die Berechnung von reellen Eigenwerten und Eigenformen der gekoppelten Struktur wird über eine simultane Unterraumiteration realisiert. Zur Eingrenzung des berechneten Frequenzbereichs kann eine Anzahl von Moden oder eine obere Frequenzschranke angegeben werden. Die hierfür verwendete, spezielle Formulierung des Algorithmus ist zur Lösung selbst größter Eigenwertaufgaben geeignet.
- Mit dem Eigenwertlöser für die Strukturdynamik (siehe Seite 96) kann die Zusatzmasse des Fluids mit berücksichtigt werden, um die dadurch verstimmteten Moden zu berechnen.

Für die gekoppelte Eigenwertanalyse bei großen Modellen mit einer großen Anzahl von Moden kann

die Rechenzeit durch Einsatz der MLDR-Methode deutlich reduziert werden (siehe Seite 98).

Für die Ermittlung des dynamischen Antwortverhaltens stehen folgende Verfahren zur Verfügung:

- Die Antwort im **Zeitbereich** (Transient Response) wird durch modale Lösung der Bewegungsgleichung ermittelt. Als Löser stehen *Newmark β* oder HHT (*Hilber-Hughes-Taylor*) zur Verfügung.
- Die Antwort im **Frequenzbereich** (Frequency Response) wird durch modale oder direkte Lösung des linearen, komplexen Gleichungssystems für jede geforderte Frequenz ermittelt. Im allgemeinen ist ein vollbesetztes System zu lösen. Im Modalraum kann ein iterativer Löser die Berechnung stark beschleunigen.
- Zusätzliche *statische Verschiebungsformen* können berücksichtigt werden.
- Die modale Analyse *zufallsregter Schwingungen* für gekoppelte FS-Berechnungen ist möglich.

Durch Angabe eines Knoten- oder eines Element-Sets (siehe Seite 67) kann bei der modalen Lösung der Rechenaufwand auf den angegebenen Bereich beschränkt werden. Die **reduzierte** Response bringt eine enorme Einsparung an Plattenplatzbedarf.

Folgende Dämpfungsmöglichkeiten können eingesetzt werden:

- Für die Struktur:
 - viskose Dämpferelemente,
 - Material- bzw. Strukturdämpfung für Elemente, wahlweise auch frequenzabhängig,
 - globale Strukturdämpfung,
 - Rayleigh-Dämpfung.
- Für das Fluid:
 - Randabsorption,
 - Volumenabsorption (auch frequenzabhängig).
- Für das gekoppelte System:
 - modale viskose Dämpfung (gekoppeltes System).

Die Anregung erfolgt über statische Lastverteilungen, die mit frequenzabhängigen Funktionen kombiniert werden (siehe Seite 68). Die Lastverteilungen können folgende Anteile enthalten:

- Strukturlasten wie im DRA-Modul beschrieben
- Vorgeschriebene Drücke.

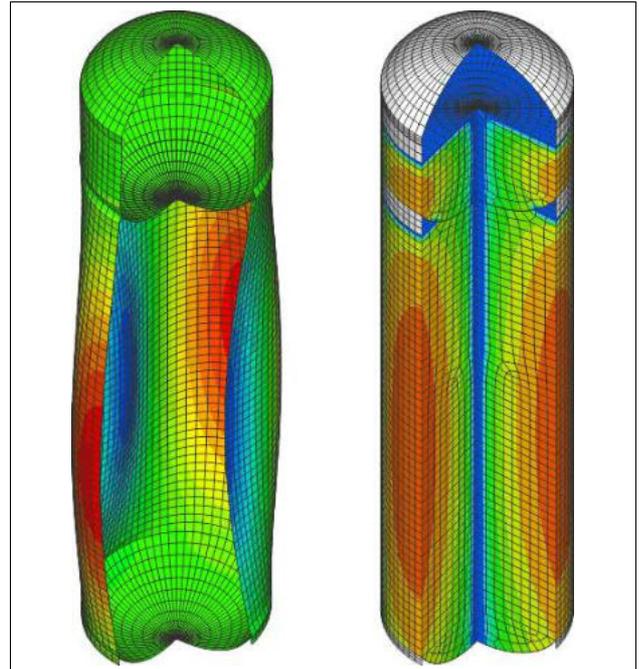


Abbildung 156: Gekoppelte Eigenschwingungsform eines gefüllten Raumfahrtstanks mit zugehöriger Druckverteilung

Als Primärergebnisse werden

- Verschiebungen,
- Drücke,
- Geschwindigkeiten und
- Beschleunigungen

geliefert. Diese können als Funktion der Zeit bzw. der Frequenz zur Erstellung von xy-Graphen ausgegeben werden. Weiter lassen sich folgende Ergebnisse ableiten:

- Reaktionskräfte,
- Spannungen bzw. Elementkräfte,
- Dehnungsenergien,
- kinetische Energien,
- spezifische Schallabstrahlungsleistung,
- Schallschnelle.

PERMAS-NLD – Nichtlineare Dynamik

Dieses Modul ermöglicht eine Zeitintegration unter nichtlinearem Strukturverhalten:

- Materialnichtlinearitäten wie Kriechen, nichtlineare Elastizität, Plastizität und Viskoplastizität.
- Nichtlineare Elemente wie nichtlineare Federn,

Dichtungselemente und Regelelemente.

- Große translatorische Bewegungen von elastischen Körpern, die über aktualisierende MPC-Bedingungen mit inkompatiblen Netzen behandelt werden.

Geometrisch nichtlineare Effekte und Kontakt sind noch nicht berücksichtigt.

Die Zeitintegration ist mit der *Newmark*-Methode möglich oder mit der verallgemeinerten *α -Methode*. Letztere ermöglicht numerische Dämpfung zur Stabilisierung der Integration.

Verschiedene Löser für den nichtlinearen Teil wie *Newton-Raphson* oder Modified Newton-Raphson stehen zur Verfügung. Ein automatisches Zeitschrittverfahren unterstützt die Wahl geeigneter Zeitschritte.

Teilsturkstechnik und *dynamische Kondensation* können verwendet werden, um die rein elastischen Bauteile vor der nichtlinear-dynamischen Analyse abzuspalten.

PERMAS-HBM – Harmonic Balance Methode

Die *Harmonic Balance Methode* berechnet stationäres Antwortverhalten für nichtlineare Differentialgleichungen. In PERMAS wird es im Kontext einer nichtlinearen Frequenzganganalyse benützt.

Mit der Funktion werden neue Anwendungsklassen ermöglicht, wie:

- *Rasselgeräusche*
- *Qietschgeräusche*
- Schraubverbindungen und Reibung zwischen Bauteilen
- Fragen von Schwingungseinwirkung
- Blattspitzen/Gehäuse Kontaktprobleme
- Mehrfreiheitsgradsysteme (MDOF) und FE Modelle mit lokalen Nichtlinearitäten

HBM, Funktionalität

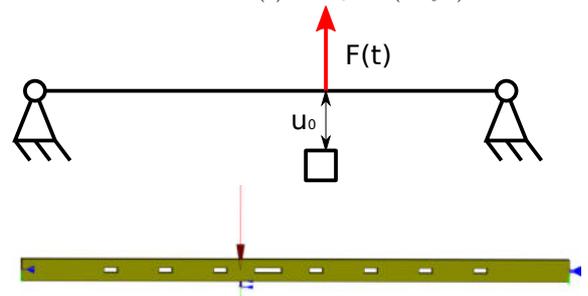
- Viele Funktionen der direkten/modalen Frequenzlösung verfügbar.
- Verfügbare nichtlineare Elemente: Nichtlineare Feder-/Dämpferelemente (NLSTIFF, NLDAMP),

Kontrollelemente (CONTROL3/6) und ein neues Hystereseelement (HYST3).

- Alternierendes Frequenz-Zeit Schema (AFT) zur effizienten Berechnung von beliebigen nichtlinearen Kräften der nichtlinearen Elemente.
- Optional integrierte *Craig-Bampton Reduktion* des linearen Anteils oder manuelle Unterstrukturtechnik.
- Beliebige Anzahl an harmonischen Termen und Samplinggrößen für nichtlineare Elemente.
- *Hysterese*-Effekte.
- *Pfadverfolgung*. Siehe Abb. 158 für weitere Informationen. Bitte beachten Sie, dass für bestimmte Frequenzen mehr als eine Lösung existiert.
- Beliebige periodische Lasten.
- Die Lösung kann in den Zeitbereich transformiert werden.
- Sekundärergebnisse (z.B. Schallabstrahlung) im Frequenz- oder Zeitbereich.
- Exzellente Parallelisierung.

Beispiel HBM, Kontakt und Lebensdauer

- Balken mit Kontakt. Der Balken ist links und rechts fixiert mit einem Hindernis am Lastangriffspunkt. Er hat einige Schwachstellen.
- Harmonische Last $F(t) = F_0 \cos(2\pi ft)$



- Elemente: 10224 HEXE8, 1 NLSTIFF, 40800 FhG
- Kontakt modelliert mit NLSTIFF, Anfangsspalt $u_0 = 1$ mm.
- Kontaktmodellierung mit geglätteter Penalty-Funktion, siehe Abb. 157.

Verschiebung am Lastangriffspunkt

Vergleich zwischen modaler Frequenzganganalyse

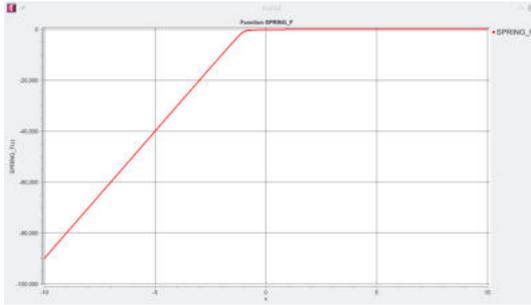


Abbildung 157: Glatte Funktion für Kontakt

und Harmonic Balance Lösungen

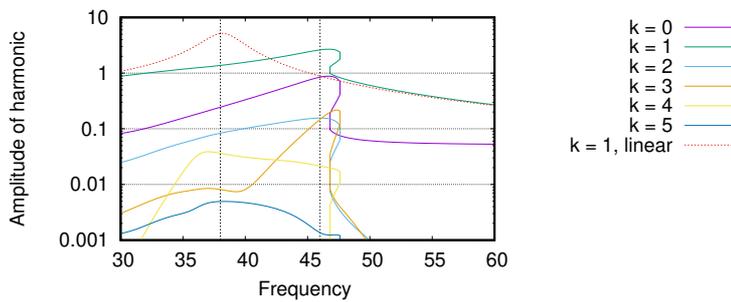


Abbildung 158: HBM Lösung

k: Fourierserienentwicklung (k=0 konstanter Anteil; k=1 lineare Lösung). k>1 höhere harmonische, ⇒ Fatigue Lösung für 38 und 46 Hz

Schädigungsvergleich

Die neuen HBM und LIFE Modulfunktionen können auch in Kombination eingesetzt werden.

- Linear
38 Hz, damage 22.9
- 46 Hz, damage 3.3E-7
- HBM
38 Hz, damage 2.0E-5
- 46 Hz, damage 0.83

In diesem Fall führt die lineare Lösung zu irreführenden Fatigue Ergebnissen.

PERMAS Paket DO / Design-Optimierung

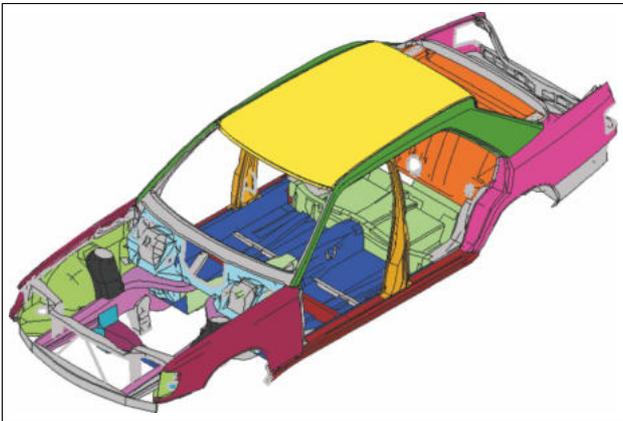


Abbildung 159: Frequenzgang-Optimierung einer Karosserie mit Form- und Dimensionsparametern (siehe auch Abb. 162)

PERMAS-OPT – Entwurfsoptimierung

Neben der reinen FE-Modellierung erlaubt PERMAS auch die Definition eines Optimierungsmodells und die Durchführung einer automatischen Optimierungsberechnung.

Als Entwurfsvariable kommen in Betracht:

- **Dimensionsoptimierung:**
 - Querschnittsflächen, Trägheitsmomente und allgemeine Zusammenhänge zwischen diesen Größen bei Balkenelementen,
 - Alle Parameter von Standard-Balkenquerschnitten (siehe Seite 66),
 - Dicken/Offsets/Nichtstrukturelle Masse von Membran- und Schalenelementen,
 - Steifigkeiten und Masse von Federelementen,
 - Masse von Massenelementen,
 - Dämpfung von Dämpfungselementen,
 - Parameter von Regelelementen,
 - Wärmeübergangskoeffizienten,
 - Materialparameter.
- **Formoptimierung:**
 - Knotenkoordinaten für Formoptimierung,
 - unter Verwendung von Entwurfs-elementen (siehe Seite 66),
 - unter Verwendung von *Form-Basisvektoren* (auch *Shape Basis Vectors* genannt, siehe Seite 48),

- unter Verwendung von inkompatiblen Netzen (zur *Positionsoptimierung*) ohne Neuvernetzung (siehe Abb. 87),
- *Sickengenerierung* (siehe Abb. 161).
- Nichtparametrische *Freiform-Optimierung* (siehe auf Seite 110).

• Verknüpfung von Entwurfsvariablen

Als Zwangsbedingung jeder Optimierung dienen Grenzen für die Werte der Entwurfsvariablen und solche für die Antwortgrößen, z.B.:

- Verschiebungen, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen,
- Elementkräfte,
- Reaktionskräfte,
- Spannungen,
- Tragwerksenergie,
- Gewicht,
- Kontaktspalte,
- Kontaktdruck,
- Kontaktkräfte,
- Eigenfrequenzen,
- Schallabstrahlungsleistung,
- Temperaturen,
- Wärmeströme,
- Schwerpunkt,
- Trägheitseigenschaften,
- Lastfaktor in Beulanalysen,
- Resultierende Drücke (nur für Sampling).
- Allgemeine Zwangsbedingungen als Kombination bzw. beliebige Funktion der zuvor genannten Größen. Solche Funktionen können z.B. globale Kriterien wie max/min, absmax/absmin oder RMS darstellen.
- Elementqualität, wobei der PERMAS Elementtest auf eine kontinuierliche Variable mit den Werten von 0. (d.h. das Element ist perfekt) bis 1. (d.h. das Element ist fehlerhaft) abgebildet wird. Diese Entwurfsbedingung hilft ein Abbrechen der Optimierung aufgrund versagender Elemente zu vermeiden.
- Um komplexere Nebenbedingungen aus vielen verschiedenen Ergebnisgrößen aufzustellen, können verschiedene Nebenbedingungen miteinander gekoppelt werden (sog. *Design Constraint Linking*).

Sowohl das Gewicht als auch jede der Zwangsbedingungen kann als Zielfunktion der Optimierung definiert werden. Es kann eine beliebige Anzahl von Entwurfsrandbedingungen zu Optimierungszie-

len erklärt werden. Dabei wird jeweils der Maximalwert als Ziel verwendet und die anderen Werte als Randbedingung. Für eine *Mehrziel-Optimierung* kann eine *Pareto*-Optimierung mit einer geeigneten Sampling-Strategie verwendet werden.

Abhängige Knoten können ebenfalls in einer Formoptimierung verwendet werden. Damit können inkompatible Netze verwendet werden, um größere Modifikationen durchzuführen, ohne dass eine Neuvernetzung nötig wäre (siehe Beispiel in Abb. 160).

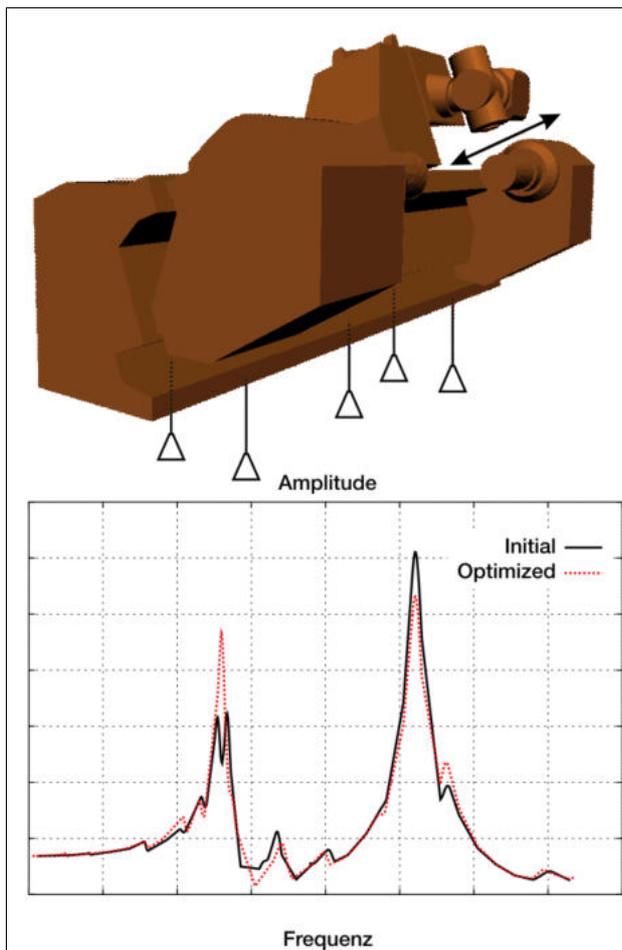


Abbildung 160: Frequenzgang-Optimierung eines Maschinenbetts, wobei die Position der Federerlemente für die Aufsteller optimiert wurde. Dazu wurden die Federn über Interpolationsgebiete an die Struktur angebunden. Entwurfsziel war dabei die geringste Verschiebung des Werkzeugmittelpunkts.

Für die Optimierung stehen dabei verschiedene Algorithmen zur Verfügung:

- **CONLIN** (Linear Convex Programming): Eine einfache und robuste Methode mit analytischen Ableitungen, sinnvoll nur für lineare Anwendungen.
- **ACP** (*Adapted Convex Programming*): Dieser parallelisierte Out-of-Core-Löser wird für große Optimierungsaufgaben, nichtlineares Verhalten und komplexe Herstellrandbedingungen empfohlen.
- **OC** (*Optimalitätskriterien*): Wird für die Freiform-Optimierung genutzt (siehe auf Seite 110).

Weitere Algorithmen sind mit dem Modul AOS verfügbar (siehe weiter unten auf Seite 116).

Die Optimierung ist mit einer allgemeinen Unterbrechungs- und Neustart-Möglichkeit ausgestattet. Dazu kann der Optimierungslauf angehalten werden, wobei die Status-Daten auf einer Datei gespeichert werden. Damit kann die Unterbrechung nach jeder Optimierungsschleife erfolgen. Vor dem Neustart können Optimierungsparameter verändert werden, um das Konvergenzverhalten zu beeinflussen. Der Neustart selbst nutzt dann die gespeicherten Status-Daten, um an der erreichten Stelle weiterzumachen.

Folgende Analysearten stehen für eine Optimierung zur Verfügung:

- Lineare Statik,
- Lineare Beulanalyse,
- Lineare Temperaturfelder,
- **Inertia Relief** (siehe Seite 79),
- Eigenfrequenzanalyse,
- Modale Frequenzganganalyse,
- Stationäre Wärmeleitungsberechnung.

Mit Hilfe des Moduls AOS (siehe Seite 116) können weitere Analysearten für eine Optimierung verwendet werden:

- Kontaktanalyse,
- nichtlineares Materialverhalten.
- Komplexe Eigenwertanalyse (einschl. rotierender Strukturen)

Bei der Frequenzgangoptimierung können Amplituden, Phasen, reelle und imaginäre Werte der oben gelisteten Ergebnisse für die Definition von Zwangsbedingungen und Zielfunktion verwendet werden. Die Grenzen für die Zwangsbedingungen lassen sich dabei frequenzabhängig spezifizieren.

Bei der Optimierung können mehrere Lastfälle gleichzeitig berücksichtigt werden, genauso wie verschiedene kinematische Randbedingungen über die Variantenanalyse (siehe Seite 58). Außerdem können auch dynamische Eigenwerte optimiert werden,

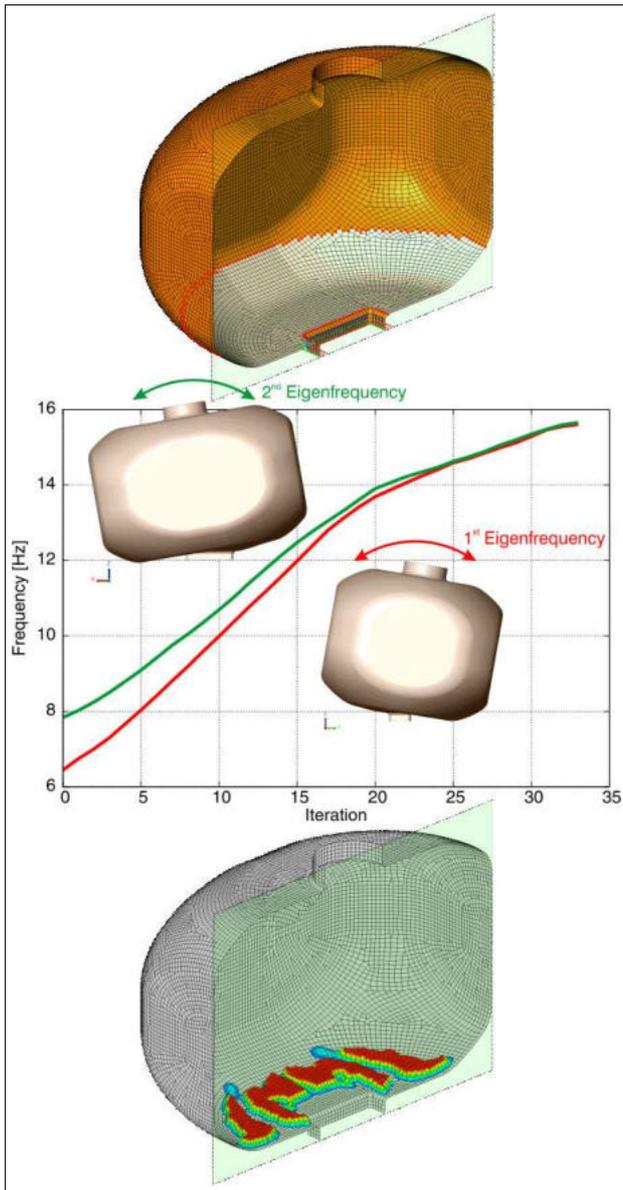


Abbildung 161: Sicken generierung eines Kunststofftanks

wobei eine Verfolgung der Eigenformen bei Änderungen der Struktur automatisch durchgeführt wird.

Wenn nur ein kleiner Teil einer Struktur optimiert werden soll, dann kann mit der *Teilstrukturtechnik* der Entwurfsraum in der Top-Komponente konzentriert werden. Die Laufzeit wird so erheblich reduziert, da die Kondensation der unmodifizierten Modellteile nur einmal durchgeführt werden muss.

Nach einer Optimierungsberechnung stehen der Verlauf der Zielfunktion sowie die Übersicht über die Gültigkeit des Entwurfs zur Verfügung. Außerdem erhält man die Werte der Entwurfsvariablen und der

Restriktionen als Funktion der durchgeführten Iterationen. Diese können als xy-Daten in einfacher Weise sichtbar gemacht werden. Auch die Ausgabe von Sensitivitäten ist möglich.

Darüberhinaus können Elementeigenschaften als Ergebnisse aufbereitet (z.B. Dickenverteilung) und für den Postprozessor exportiert werden.

Die Ergebnisse einer Formoptimierung können als Verschiebungen auf dem bestehenden Modell zum Postprocessing ausgegeben werden oder als neues Modell mit gleicher Topologie und veränderten Koordinaten.

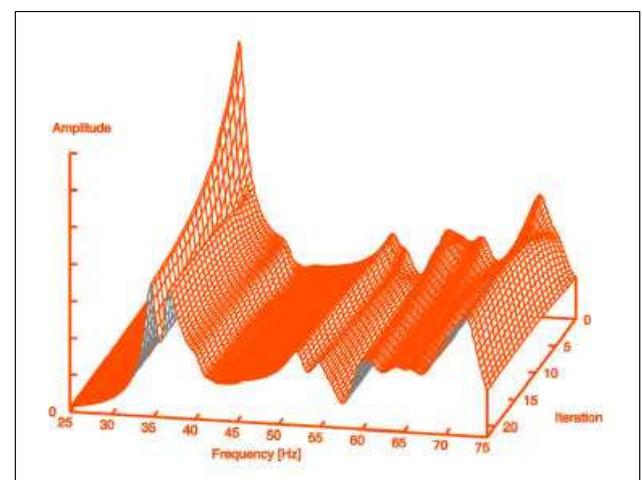


Abbildung 162: Iterationsverlauf einer Frequenzgang-Optimierung

Freiform-Optimierung

Eine *nicht-parametrische Optimierung* steht zur Verfügung, um *Freiform-Optimierungen* zur Spannungshomogenisierung oder zur Spannungsreduktion unter Gewichtsbeschränkungen zu ermöglichen (siehe Abb. 164). Damit steht ein sehr einfach anzuwendendes Verfahren für die Formoptimierung von Freiformflächen zur Verfügung. Außerdem wird das Aufsetzen einer solchen Optimierung durch einen Freiform-Wizard in VisPER unterstützt (siehe Seite 48).

Folgende Funktionalitäten werden von der Freiform-Optimierung unterstützt:

- Mögliche Ziele oder Randbedingungen sind Gewicht, Spannungen (von Mises-Spannungen, Hauptspannungen), effektive plastische Dehnungen und andere Knotenwerte, die über externe Programme berechnet wurden, wenn diese Werte lokal durch eine Dickenänderung der

Teile beeinflussbar sind (z.B. Sicherheitsfaktoren).

- Zusätzliche Randbedingungen sind Spannungen außerhalb des Designgebietes, Verschiebungen oder Nachgiebigkeit (Compliance) als Steifigkeitsbedingung oder jede andere Randbedingung, für die (semi-)analytische Sensitivitäten zur Verfügung stehen.
- Degenerierte Element werden so behandelt, dass der Optimierungsprozess nicht unterbrochen wird.
- Mittenknoten von quadratischen Elementen können nun als Entwurfsknoten und Entwurfsvariable verwendet werden.
- Darüber hinaus wird für die Oberflächenglättung ein funktionaler Ansatz verwendet zur Berechnung verbesserter Koordinatenänderungen (siehe Abb. 163 mit nicht-normaler Dickenänderung).
- Als Herstellungs-Randbedingung können auch Auszugsrichtungen eingesetzt werden.

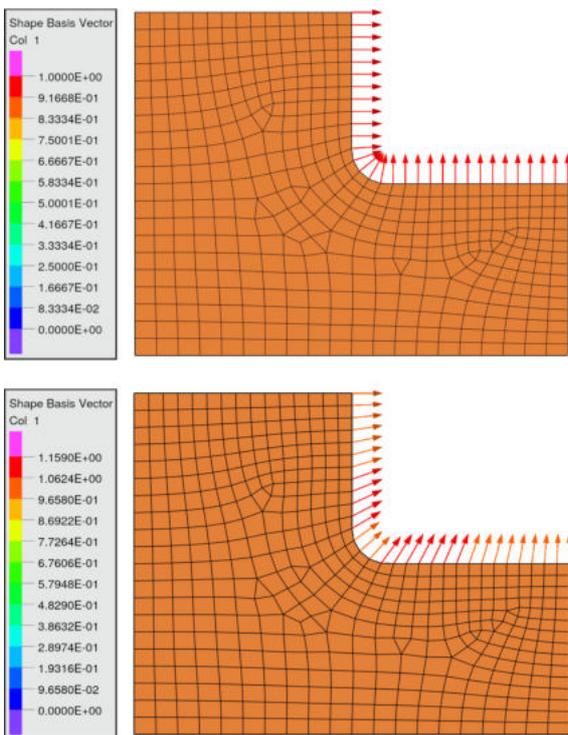


Abbildung 163: Verbesserte Formänderung

Multi-modale Optimierung

Aufgrund einer Harmonisierung der vorhandenen Optimierer ist es jetzt möglich Topologie-, Dimensions- und Form-Optimierung in einer *Multi-modalen Optimierung (MMO)* gleichzeitig zu verwenden.

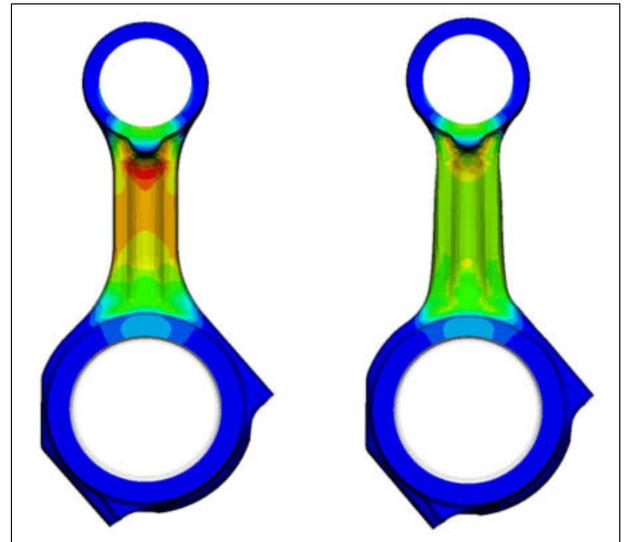


Abbildung 164: Spannungshomogenisierung am Pleuel

den. Dies wurde erreicht, indem all Optimierungsarten denselben Löser verwenden. Dies erlaubt die Bearbeitung eines breiteren Felds von Aufgabenstellungen (siehe Abb. 165 und Abb. 166).

Verwendung externer Löser

In der Optimierung werden manchmal zusätzliche Ergebnisse verwendet, die PERMAS nicht selbst berechnet. Dann kann in der Optimierungsschleife ein *externer Löser* aufgerufen werden (z.B. für die Berechnung von Sicherheitsfaktoren). Um das zu realisieren, wird ein Skript benötigt, welches das externe Programm aufruft und dessen Ergebnis in einem PERMAS-Format bereitstellt.

Optimierung von Laminaten

Die Topologie-Optimierung wird für die Optimierung von Schichtdicken bei Laminatstrukturen verwendet (siehe Seite 116 und Abb. 168).

Die Dimensionsoptimierung (Sizing) von Lagen-dicken und Winkeln kann dann durchgeführt werden. *Versagenskriterien* (siehe Seite 122) können als Nebenbedingung der Dimensionsoptimierung verwendet werden.

Optimierung für einen robusten Entwurf

Optimierung für einen robusten Entwurf erfolgt mit Zuverlässigkeitsrandbedingungen, so dass nicht nur alle o.g. Zwangsbedingungen erfüllt sind, sondern der Entwurf nach der Optimierung auch zuverlässig in Bezug auf unsichere Modellparameter ist (mehr

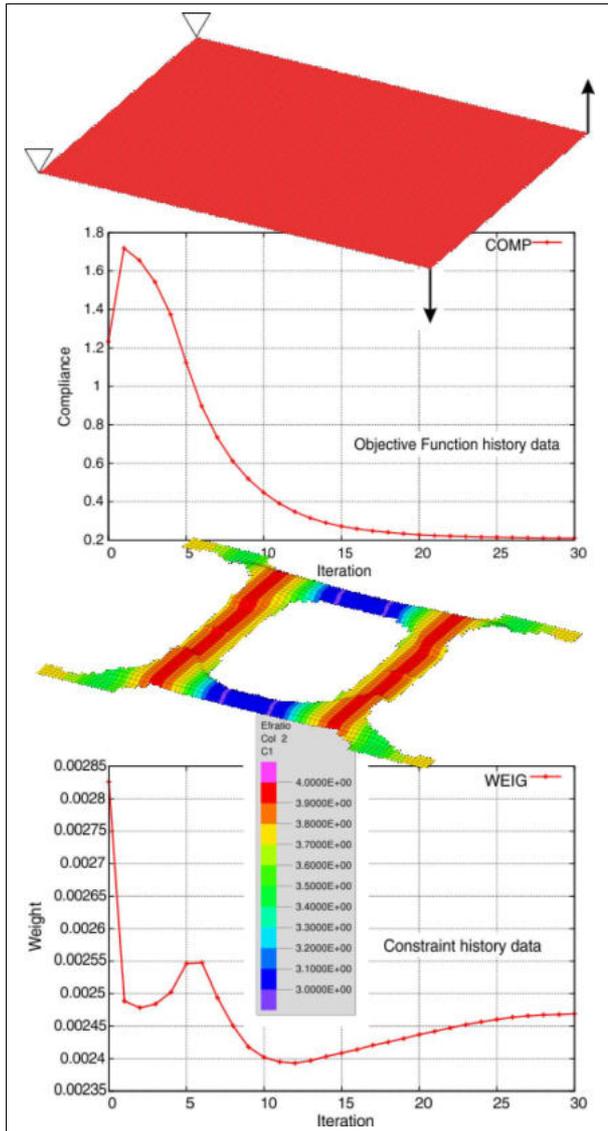


Abbildung 165: Multimodale Optimierung mit Topologieoptimierung, Sicken-generierung und Dimensionsoptimierung (sog. Free Sizing) der Schalendicke.

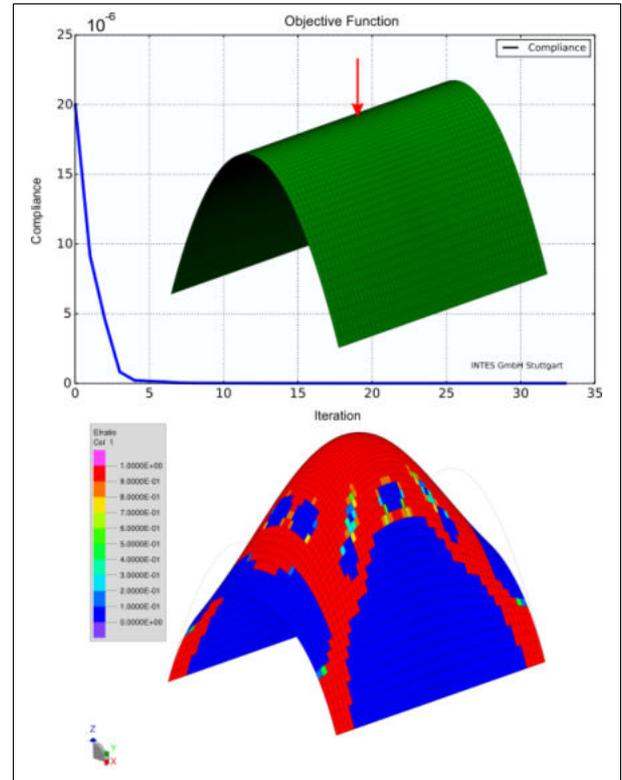


Abbildung 166: Topologie- und Form-Optimierung gleichzeitige Lösung als multi-modale Optimierung

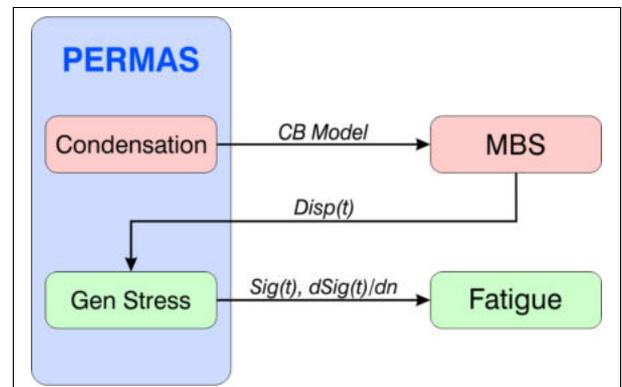


Abbildung 167: Nutzung von MKS und Lebensdauer gekoppelt mit PERMAS.

auf Seite 37).

PERMAS-TOPO – Layoutoptimierung

Die Topologie-Optimierung ist eine Methode zur Formfindung, die einem vom Benutzer vorgegebenen Ziel optimal entspricht und dabei noch eine Reihe von weiteren Bedingungen erfüllt. Dazu wird der sogenannte Entwurfsraum mit finiten Elementen ausgefüllt. Jedem Element wird dabei ein sogenannter Füllungsgrad (zwischen 0 und 1) als Ent-

wurfsvariable zugewiesen. Dieser wird als Skalierungsfaktor für die Steifigkeit des Elements benutzt. Ist der Füllungsgrad Null, dann ist das Element quasi nicht vorhanden. Elemente mit hohem Füllungsgrad werden unter den gegebenen Nebenbedingungen gebraucht. Der gefundene Entwurf besteht dann in der Regel aus einer Untermenge der Elemente des Entwurfsraumes. Wird der Entwurfsraum feiner vernetzt, dann kann man feinere Strukturen erhalten, aber man braucht auch längere Rechenzeiten dafür.

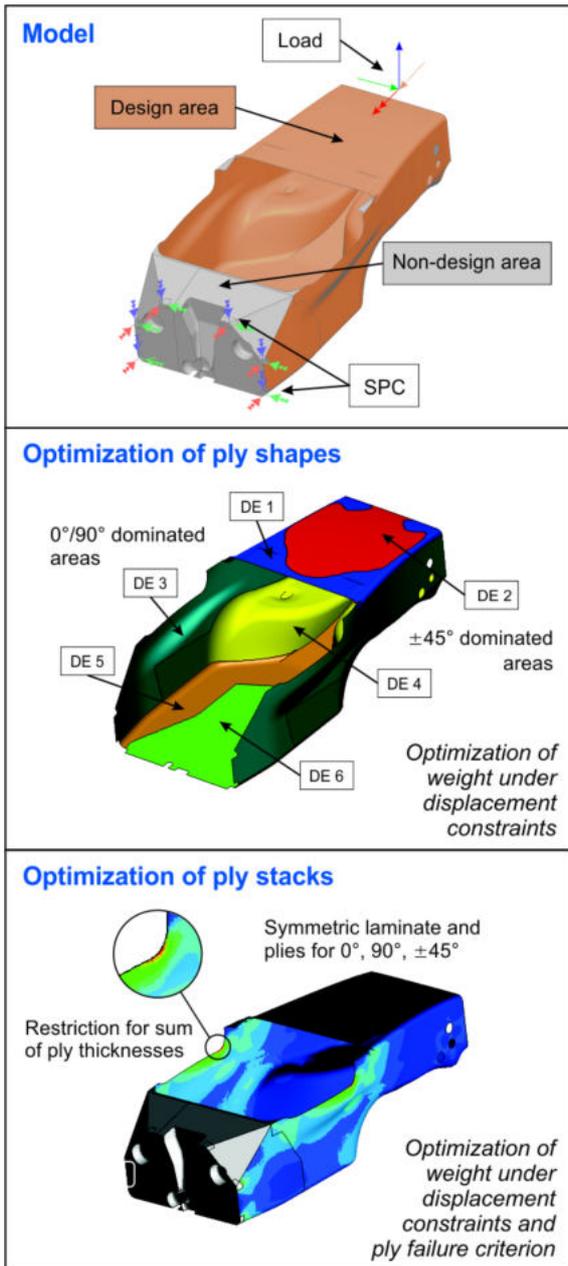


Abbildung 168: Optimierung von Laminaten für den Monocoque eines Rennwagens mit Free Sizing (siehe Seite 116), um die Lagendickenverteilung zu erhalten, und mit Dimensionsoptimierung (siehe Seite 108), um Lagendicken und -winkel zu optimieren.

Das Modul unterstützt die Konzeptentwicklungsphase durch die Bereitstellung voll integrierter Topologieoptimierungsverfahren:

- Bauraumdefinition mit variablen/festen Bereichen,
- Spezifikation der Randbedingungen,
- Angabe der Lasten,
- Optimierungsziel mit verbleibendem Volumen,

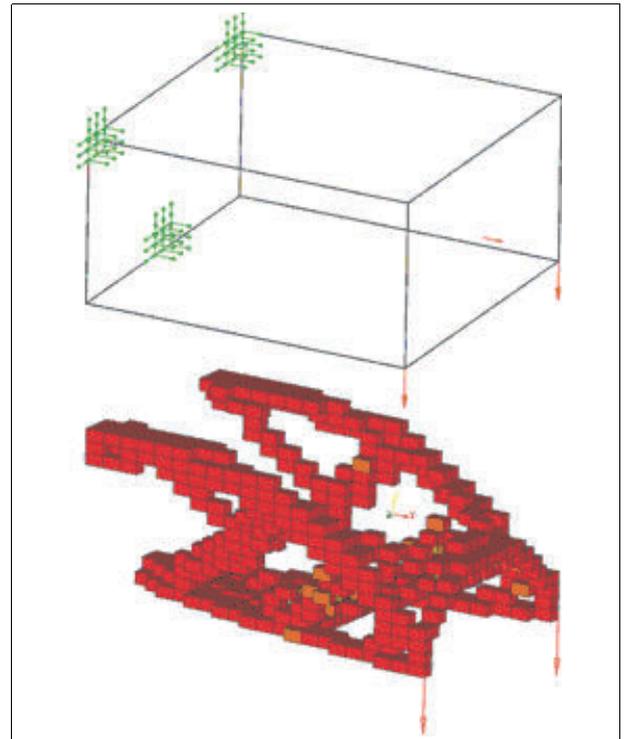


Abbildung 169: Topologie-Optimierung Bauraum mit Randbedingungen und Lasten (oben) und die ermittelte optimale Materialverteilung (unten)

- Weitere Zwangsbedingungen für die Optimierung, falls vorhanden.

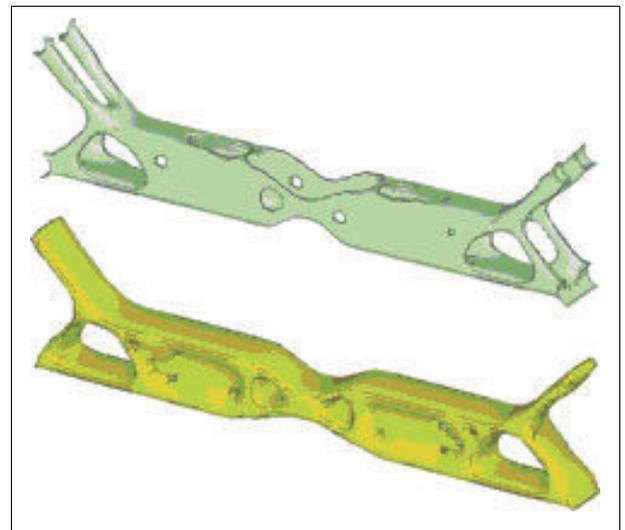


Abbildung 170: Alternative Topologie-Lösungen ohne (oben) und mit (unten) Ausformrichtungen

Für die Modellierung werden Kontinuums-elemente wie Membran-, Schalen- und Volumenelemente verwendet. Auch die Anwendung der *Teilstrukturtechnik* wird unterstützt. Weitere Modellparameter sind:

- **Feste/variable Designelemente:**
 - Füllungsgrad pro Designelement wählbar,
 - Grenzen für die Entwurfsvariablen,
 - Grenzen für die Änderung der Entwurfsvariablen.
- **Fertigungsrandbedingungen:**
 - **Ausformrichtungen:**
Bei Gußbauteilen müssen spezielle Zwangsbedingungen formuliert werden, um aus einer Topologie-Optimierung herstellbare Teile zu erhalten. Mit der Angabe von Ausformrichtungen kann man diese Nebenbedingung steuern (siehe Abb. 170). Zusätzlich kann eine minimale Restwandstärke spezifiziert werden, um eine geschlossene Struktur zu erhalten (wie bei Gehäusen). Eine **Teilungsebene** kann für entgegengesetzte Ausformrichtungen spezifiziert werden.
 - **Symmetriebedingungen:**
Planare, axiale und zyklische Symmetriebedingungen können verwendet werden, um die Eigenschaften des Layout-Ergebnisses zu bestimmen.
 - **Gleichartige Strukturteile:** Die Verknüpfung von Entwurfsvariablen kann eingesetzt werden, um dasselbe Layout für verschiedene Teile einer Struktur zu erhalten.
 - **Maximale Wandstärke:** In der Kombination mit Ausformrichtungen kann eine maximale Wandstärke vorgegeben werden, um die verbleibenden Strukturen mit ähnlichen Dicken zu versehen.
 - **Minimale Wandstärke:** Zur Dimensionskontrolle der verbleibenden Struktur kann die minimale Bauteilgröße (d.s. Breite und Dicke der verbleibenden Struktur) durch entsprechende Parameter beeinflusst werden (sog. Checkerboard Filter).
 - **Eingefrorene Bereiche:** Solche Bereiche (sog. **Frozen Regions**) im Entwurfsraum werden während der Optimierung nicht verändert.
 - Der Überhangwinkel kann verwendet werden, um Entwürfe für den 3D-Druck zu optimieren (siehe Abb. 171).
- **Zwangsbedingungen und Zielfunktion:**
 - Tragwerksenergie,
 - Gewicht,
 - Reaktionskräfte,
 - Eigenfrequenz(bereich),

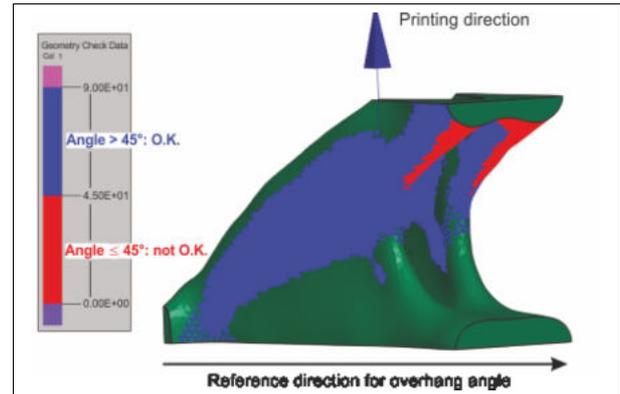


Abbildung 171: Prüfung des Überhangwinkels
rot: kritischer Winkel, blau: unkritisch, andere Farbe: kein Wert (d.h. >90°).

- Verschiebungen,
- Beschleunigungen, Geschwindigkeiten,
- Spannung (außerhalb des Entwurfsbereichs),
- Elementkräfte (außerhalb des Entwurfsbereichs),
- Schallabstrahlungsleistung (außerhalb des Entwurfsbereichs).

Jede Zwangsbedingung kann auch als Zielfunktion definiert werden.

Aus den genannten Grundrandbedingungen lassen sich auch komplexere Funktionen für **Entwurfsrandbedingungen** aufbauen.

Eine allgemeine Möglichkeit besteht, um Zielfunktionen zu spezifizieren, die sich auf viele Werte für verschiedene Zwangsbedingungen bezieht (wie max/min, absmax/absmin, RMS).

- **Multi-Modeling**
 - mehrere Lastfälle gleichzeitig mit unterschiedlichen Überlagerungsoptionen,
 - unterschiedliche Designvarianten.

In Modul AOS (siehe Seite 116) stehen Lösungsoptionen zur exakten Behandlung von **maximalen Wandstärken** zur Verfügung.

Als Analyseoptionen kommen in Betracht:

- Lineare Statik,
- Lineare Beulanalyse,
- Kontaktanalyse,
- Dynamische Eigenwertberechnung,
- Modale Frequenzganganalyse.

Weil sich Eigenfrequenzen und -formen sehr stark während einer Topologie-Optimierung ändern, ste-

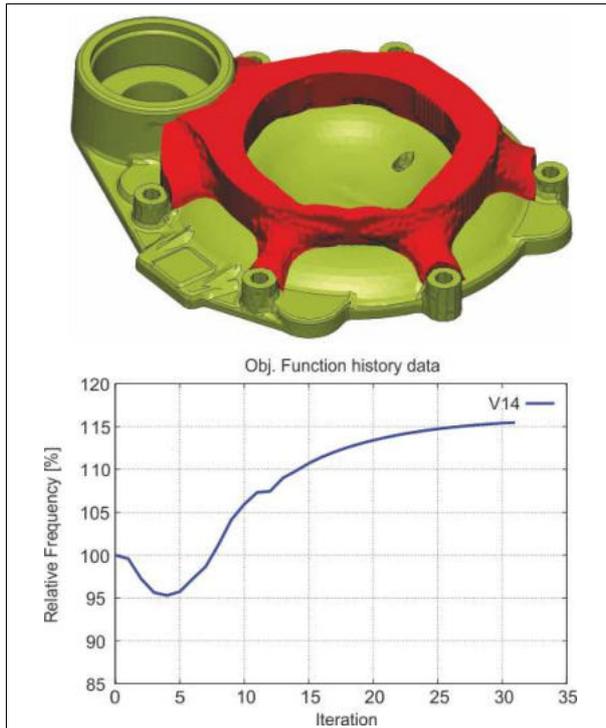


Abbildung 172: Topologie-Optimierung eines Getriebedeckels zur Maximierung der zweiten Eigenfrequenz unter einer gegebenen Auszugsrichtung (mit freundlicher Genehmigung der ZF Friedrichshafen AG)

hen Strategien zur Verfügung, die es erlauben lokale Moden zu unterdrücken.

Für die Optimierung stehen dabei verschiedene Algorithmen zur Verfügung:

- **GCA (Global Convex Approximation)** für Eigenfrequenzen und eine Kombination aus statischen und dynamischen Randbedingungen.
- **PD (Primal-Dual Solution)**

Zur Iterationskontrolle der Optimierung kann zum einen die Konvergenz der Zielfunktion als auch eine maximale Iterationszahl verwendet werden.

Die Topologie-Optimierung ist nun in der Lage ein Ergebnis **mit klarer Trennung** in gefüllte und leere Elemente zu liefern. Der Füllungsgrad der Elemente liegt somit in der Nähe von 0 oder 1. Dieses Ergebnis vermeidet Fehlinterpretationen der Ergebnisse von Topologie-Optimierungen und erleichtert die Verwendung in weiteren Analyse- und Konstruktionsschritten (siehe Abb. 173).

Das Ergebnis der Layoutoptimierung ist der Ele-

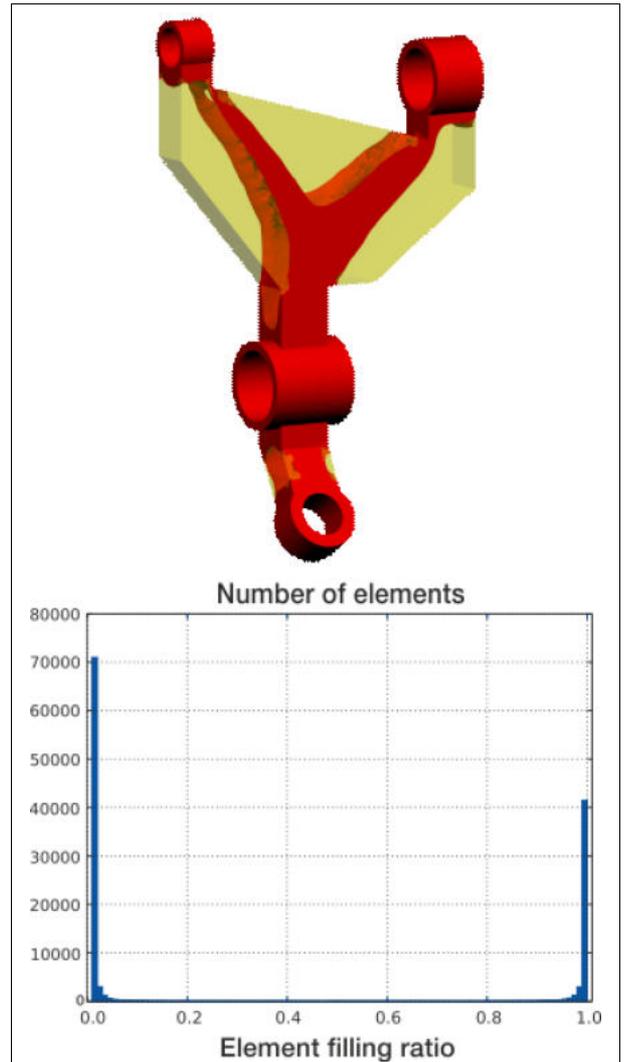


Abbildung 173: Auskonvergierte Topologie

mentfüllungsgrad. Zur Kontrolle des Konvergenzverhaltens steht die Geschichte der Zielfunktion zur Verfügung. Auf Grund des Füllungsgrades kann im Postprozessor die verbleibende Reststruktur einfach dargestellt werden.

Zur sinnvollen Weiterverarbeitung der verbleibenden Reststruktur können noch folgende Maßnahmen durchgeführt werden:

- **Hüllengenerierung:** Für einen ermittelten oder vorgegebenen Füllungsgrad wird die zugehörige Raumfläche für die Oberfläche als Netz aus Dreiecken und Vierecken automatisch extrahiert.
- **Glättung:** Die Hülle wird unter Berücksichtigung von Bauteilgrenzen und Lasten sowie kinematischen Randbedingungen geglättet.

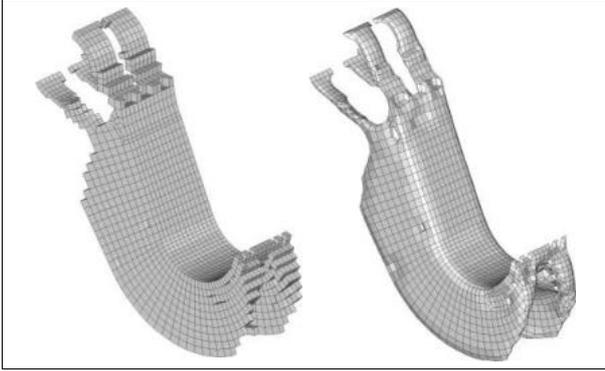


Abbildung 174: Layout-Optimierung eines Kranhakens (links das Primärergebnis, rechts die geglättete Oberfläche)

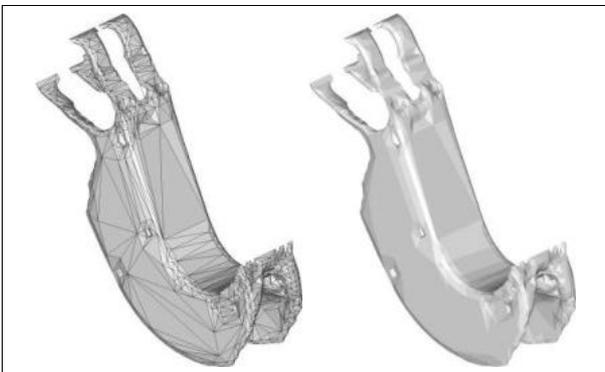


Abbildung 175: Polygon-Reduktion (links das Dreiecksnetz, rechts die damit repräsentierte Oberfläche)

- **Polygon-Reduktion:**
Das Netz wird gesäubert von zu kleinen Dreiecken und Vierecken, um die Oberflächenbeschreibung so kompakt wie möglich zu gestalten.
- **Export:**
Das verbleibende Dreiecksnetz kann als Schallennetz zum Postprocessing ausgegeben werden oder als Geometrie im *STL*-Format.

Neben dem Elementfüllungsgrad als Entwurfsvariable, kann die Topologie-Optimierung auch für andere Elementeigenschaften zur Optimierung verwendet werden (wie für Dicken von Schalenelementen). Diese Anwendung der Topologie-Optimierung wird auch *Free Sizing* genannt.

Optimierung von Laminaten

Free Sizing kann zur Optimierung von Laminatstrukturen verwendet werden, um aus der Dickenverteilung der Lagen die Form der einzelnen Lagen zu

ermitteln. Ein gegebener Lagenaufbau wird dabei hinsichtlich der Dicken optimiert. Weil nicht alle Lagen überall in der Struktur gebraucht werden, können aus dieser Dickenverteilung die Bereiche ermittelt werden, in denen eine bestimmte Lage mit ihrem Faserwinkel gebraucht wird. Weitere Optimierungsschritte für Laminaten werden mit der Dimensionsoptimierung durchgeführt (siehe page 111).

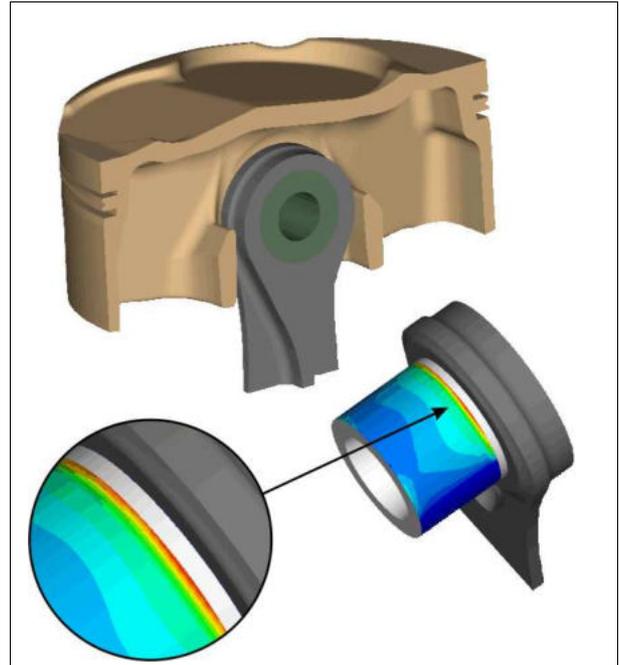


Abbildung 176: Optimierung des Kontaktdrucks zwischen Kolben und Kolbenbolzen (Mahle GmbH, Stuttgart). Die Abbildung zeigt die Kantenpressung zwischen den beiden Teilen (für das optimierte Ergebnis siehe auch nächste Abb. 177).

PERMAS-AOS – Weitere Optimierungslöser

Dieses Modul stellt zusätzliche Optimierungsverfahren zur Verfügung, welche den Anwendungsbereich der integrierten Optimierung in PERMAS deutlich ausweiten. Diese Erweiterungen sind wie folgt:

- Durch ein *Trust-Region-Verfahren (Vertrauensregion-Verfahren)* wird eine adaptive Schrittweitensteuerung bei den lokalen Optimierungsmethoden ermöglicht, welche die bisherige statische Schrittweitenbegrenzung für die Veränderung der Entwurfsvariablen erweitert.

- Trust-Region-Verfahren verfolgen den jeweils besten Punkt und weisen Punkte ohne Verbesserung zurück. Dies erweitert die bisherigen Verfahren, bei denen jeder neue Punkt akzeptiert wurde.
- Verfahren zur ableitungsfreien Optimierung und zur globalen Optimierung sind nun verfügbar.

Durch die Verfahren werden neue Anwendungsgebiete für die Optimierung erschlossen, wie Kontaktberechnung oder nichtlineares Materialverhalten.

Die lokalen Verfahren umfassen die folgenden ableitungsbasierten Verfahren:

- **SQP** (Sequential Quadratic Programming): Das ist ein *Newton*-Verfahren mit Dämpfung und einer *aktiven Mengen-Strategie* (*active set strategy*) für die Optimalitätsgleichungen. Das ist das beste allgemein einsetzbare Verfahren (aber nicht notwendigerweise das beste für die Strukturmechanik). Ergebnisse zweiter Ordnung sind durch einen *BFGS*-Update verfügbar.
- **SLP** (Sequential Linear Programming): Dieses Verfahren basiert auf einer linearen Näherung. Es ist üblicherweise (wenn auch nicht immer) langsamer als SQP wegen der fehlenden Information zweiter Ordnung. Das Verfahren ist recht robust verglichen mit anderen Gradientenverfahren (z.B. bei sehr steilen Gradienten).
- **SCP** (Sequential Convex Programming): Dieses Verfahren gilt als das beste für strukturelle Aufgabenstellungen. Modul OPT benutzt ebenfalls ein solches Verfahren für die Optimierung.

Wenn Ableitungen nicht verfügbar sind (wie in Kontaktberechnungen oder bei nichtlinearem Materialverhalten) oder die Genauigkeit der berechneten Ableitungen nicht ausreicht (wie manchmal bei Frequenzganganalysen), dann stehen auch ableitungsfreie Verfahren zur Verfügung. Die neuen ableitungsfreien (lokalen) Methoden umfassen die folgenden Ansätze:

- Ableitungsbasierte Methoden (wie SQP, SLP, SCP) können auch mit finiten Differenzen verwendet werden. Dabei müssen die Funktionen glatt genug sein und der Differenzenabstand sollte leicht bestimmbar sein.
- Als ableitungsfreies Verfahren steht **WLIN** (Wedge constraint, LIN approximation) zur Verfügung. Dieses Verfahren benötigt keinen Diffe-

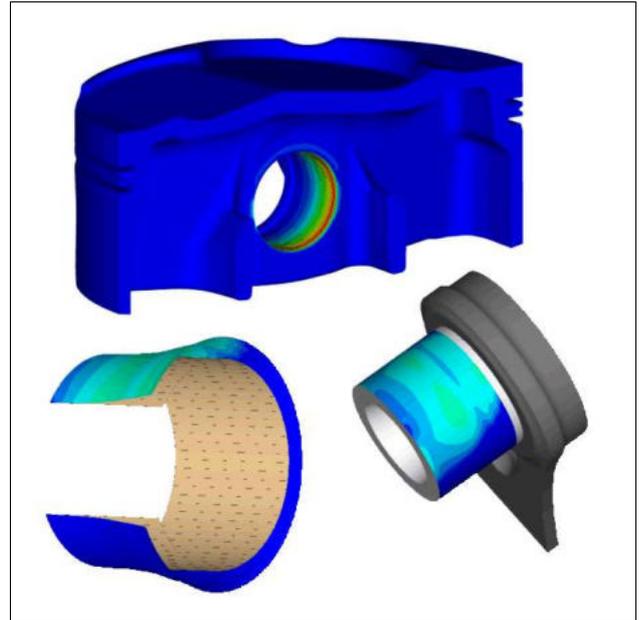


Abbildung 177: Optimierung des Kontaktdrucks zwischen Kolben und Kolbenbolzen (Mahle GmbH, Stuttgart). Die Abbildung zeigt die optimierte Geometrie des Kolbens und die reduzierte Kantenpressung.

renzenabstand. Es ist dabei gut für verrauschte Funktionen einsetzbar.

Wenn globale Minima gesucht sind, dann kann dies nicht mehr mit lokalen Verfahren erreicht werden. Für eine globale Optimierung stehen folgende Ansätze zur Verfügung:

- Durch das *Multi-Start-Verfahren* (**MS**) können mit Hilfe von zufällig ausgewählten Punkten ableitungsbasierte Verfahren verwendet werden, um Minima zu lokalisieren. Das entspricht einem automatisierten Ausprobieren, wobei die Anzahl der Versuche das Ende der Berechnung vorgibt.
- Ein weiteres Verfahren ist **LDR** (Locally improved variant of the *Dividing Rectangles* (*DiRect*) algorithm). Fig. 178 zeigt ein Beispiel für dieses Verfahren. Dieses Verfahren wurde auf Aufgabenstellungen mit Nebenbedingungen verallgemeinert. Es wurde durch die Lösung lokaler Teilprobleme verbessert. Das Verfahren generiert eine Reihe von Punkten, die im Entwurfsraum dicht beieinander liegen und so die globale Lösung gut approximieren. Da dieses Verfahren sehr langsam ist und sich nur für kleine Modelle eignet, wird eine geeignete Modellreduktion empfohlen (siehe Teilstrukturtechnik auf Seite 57).

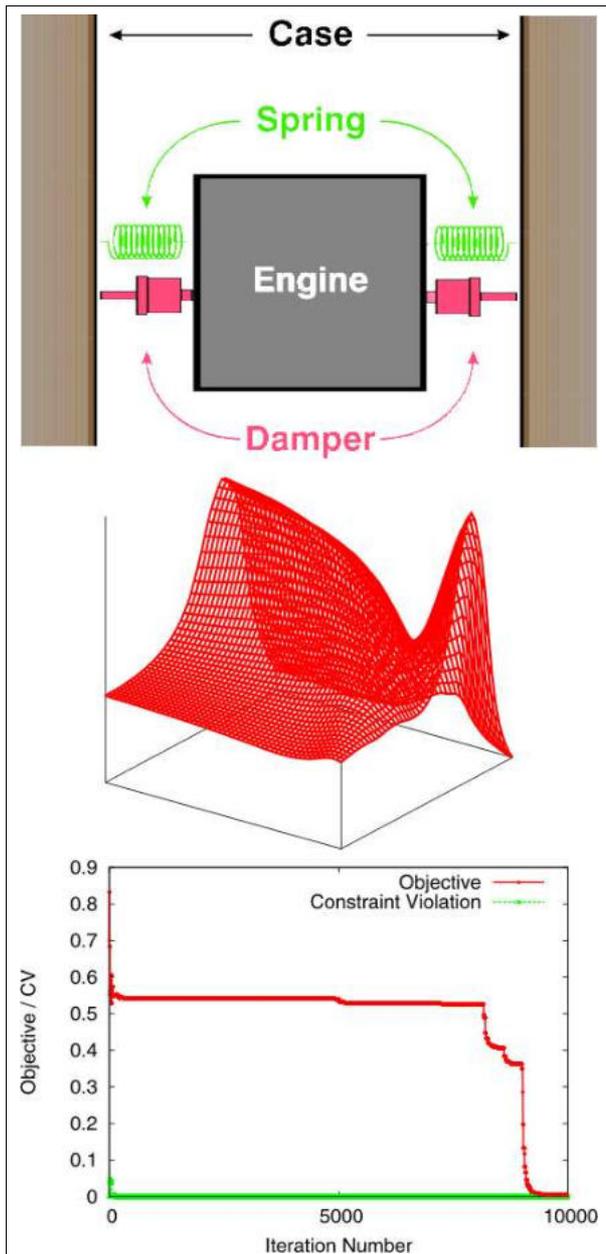


Abbildung 178: Globale Optimierung eines Feder-Dämpfer-Systems mit dem LDR-Verfahren. Oben: Modell mit 4 Entwurfsvariablen, Mitte: 2 Variablen am Optimum festgehalten, Verlauf der Zielfunktion mit den 2 freien Variablen, Unten: Iterationsverlauf der Zielfunktion und der Verletzung der Nebenbedingungen.

Eine Option *Global Design Centering (GDC)* ist verfügbar, um einen Bereich maximaler Stabilität zu finden. Ein typischer Anwendungsfall ist das Bremsenquietschen mit stochastischen Materialparametern für den Bremsbelag.

PERMAS-RA – Zuverlässigkeitsanalyse

In der klassischen Strukturanalyse wird ein deterministisches Modell verwendet, um Aussagen über das Verhalten eines Bauteils unter verschiedenen Lastbedingungen vorherzusagen. Die Ergebnisse dieser Berechnungen werden dann mit typischen Grenzwerten wie maximale Spannung oder maximale Verschiebung unter Sicherheitsgesichtspunkten verglichen. Dies ist die deterministische Vorgehensweise für die Beurteilung der Struktursicherheit und hier findet die Finite-Elemente-Methode schon bisher eine weite Verbreitung.

Im Gegensatz zu dieser Methode trifft die *stochastische Berechnung* Annahmen über die Verteilungsfunktionen unsicherer Struktur- oder Lastparameter. Die zulässigen Grenzwerte für die Struktur sind zwar dieselben wie bei der deterministischen Analyse, aber die Ergebnisse umfassen dann die Versagenswahrscheinlichkeit in bezug auf diese Grenzwerte sowie die Sensitivität dieser Versagenswahrscheinlichkeit in bezug auf die unsicheren Parameter.

Dieses Modul verbindet die Finite-Elemente-Methode mit dem bewährten COMREL-Programm der RCP GmbH in München. Auf diese Weise konnten die Erfahrungen aus beiden Software-Paketen für die Stochastische Finite-Elemente-Methode nutzbar gemacht werden.

Das Vorgehen bei der Zuverlässigkeitsanalyse umfasst die folgenden drei Schritte:

- Definition der unsicheren Größen der Strukturanalyse (wie Geometrie, Lasten usw.) über *Basisvariablen*, denen eine Verteilungsfunktion zugewiesen wird.
- Definition von *Grenzzustandsfunktionen* (oder *Versagensfunktionen*), die sich auf Ergebnisse einer Strukturanalyse beziehen.
- Berechnung der *Versagenswahrscheinlichkeit* für jede Grenzzustandsfunktion.

Für die **Basisvariablen** kommen folgende Größen in Betracht:

- Designparameter (Geometrische Daten, Koordinaten),
- Lastfaktoren,
- Materialparameter,
- Parameter der Grenzzustandsfunktion,
- Parameter anderer Basisvariablen,

Dabei stehen mehr als 20 verschiedene Verteilungsfunktionen für die Beschreibung der unsicheren Variablen zur Verfügung.

Die Bewertung der Versagensparameter erfolgt für die Analyseoptionen:

- Lineare Statik,
- Kontaktanalyse,
- Dynamische Eigenwertberechnung,
- Frequenzganganalyse,
- Komplexe Eigenwertanalyse (einschl. rotierender Strukturen).

Dafür stehen eine Reihe von Methoden zur Verfügung:

- Effiziente Lösungsverfahren mit Sensitivitäten als First/Second Order Reliability Methods (*FORM/SORM*),
- *Response Surface Methoden*,
- *Monte Carlo* Simulation mit Adaptive Sampling,
- Reine Monte Carlo Simulation.

Bei der Zuverlässigkeitsanalyse können mehrere Lastfälle gleichzeitig berücksichtigt werden, genauso wie verschiedene kinematische Randbedingungen über verschiedene Versagensfunktionen.

- Die Definition der **Versagensfunktionen** erfolgt durch
 - Allgemeine Funktionen,
 - Abhängig von
 - * Ergebnissen (Verschiebungen, Spannungen usw.),
 - * Basisvariablen,
 - * konstanten Werten.
- Die primären **Ergebnisse** dieser Berechnung sind
 - Versagenswahrscheinlichkeit für jede Grenzzustandsfunktion,
 - Parameterempfindlichkeit der Grenzzustandsfunktionen,
 - Empfindlichkeiten des Ergebnisses in Abhängigkeit von den unsicheren Basisvariablen (Elastizitäten),
 - Ausgewählte Daten für jede Iteration bei Monte Carlo Simulationen.

PERMAS Spezialmodule

PERMAS-LIFE – Lebensdauerberechnung Basis

Das LIFE Module stellt Funktionalität zur Lebensdauerberechnung (mit hohen Zyklenzahlen) zur Verfügung. Es ist das Ergebnis einer Kooperation zwischen „Steinbeis Transferzentrum Verkehrstechnik (STZ)“ und INTES .

Eine voll integrierte Lebensdauer/Betriebsfestigkeitsanalyse ist direkt in PERMAS verfügbar. Siehe Abbildung 179. Anstatt ein externes Werkzeug zur Lebensdauer zu nutzen, das typischerweise eine enorme Menge an Spannungsdaten benötigt, kann die integrierte Lösung die Ausgabedaten auf die gewünschten Lebensdauerergebnisse begrenzen.

Einige Basiseigenschaften sind:

- Spannungsbasierte High-Cycle Fatigue (Dauerbelastung, typischerweise >1000 Zyklen)
- Ein *Multiaxialer Spannungszustand* an den Bauteil-Oberflächen (nach FKM Richtlinie und mehr) ist die Basis
- Unterstützung von Volumenelementen
- Eine Lebensdaueranalyse kann nach einer (nichtlinearen) Statik oder einer Zeitintegration (modal oder direkt) durchgeführt werden. Dazu können entweder Lastkollektive oder Zeitfunktionen für Lastzyklen verwendet werden.
- Klassische Knotenpunkts- oder SPR-Spannungen und präzise Gradienten (siehe Seite 66 können verwendet werden
- **Hochperformante** Implementierung (Zeit-, Speicher- und I/O-optimal, mit exzellenter paralleler Skalierung)
- **Kein Spannungsexport/import**, kein externes Programm notwendig
- Grafische Definition und Auswertung in VisPER möglich
- Potential für zukünftig weitergehende Analysen: z.B. Kombination Optimierung und Lebensdauer (als Zielfunktion und/oder Constraint)

Beispiel LKW Federbock

Die Lebensdauersimulation eines LKW Federbü-

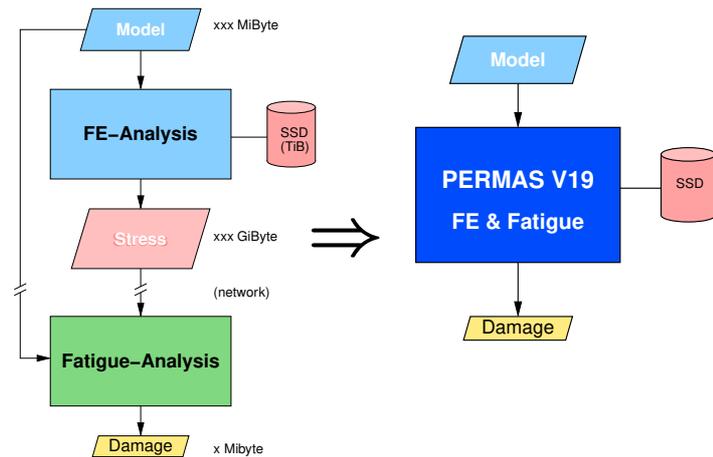


Abbildung 179: Externer und integrierter Workflow, Lebensdauer

gels für 16 Schlechtwegstrecken gibt einen Eindruck der Handhabungsvorteile, wie auch der Laufzeitgewinne. Anstatt separater Lebensdauerläufe der 16 Strecken mit einer finalen Lebensdaueranalyse des Lastkollektivs, kann alles in einer PERMAS Simulation gemacht werden.

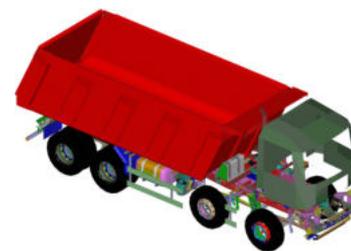


Abbildung 180: Lastwagenmodell ähnlich

7 900 000	Knoten
5 700 000	Elemente
82 000	Fatigue-Knoten
515	Moden
174 000	Zeitschritte
	in 16 Schlechtwegstrecken

Die Ressourcen sind wie folgt: **Gesamtrechnung** (Eigenformen, modale Zeitintegration und Lebensdauerberechnung):

Elapsed time	[h:mm:ss]	2:58:53
Parallel scaling	[pEff]	11.05
DMS-Disk	[TiB]	1.29

Anteil Lebensdauerberechnung (174 000 Zeitschritte):

Elapsed time	[mm:ss]	14:09
Parallel scaling	[pEff]	20.19

Maschine: 2*Intel Xeon 8260L, 28 Cores, 564 GiB Memory

PERMAS V18 braucht **5.5h** mit Spannungsausgabe und **4.25 TiB** Datenbasisgröße Plus **≈1.5-12h** Für die externe Lebensdauerberechnung. Mit PERMAS-LIFE kann eine Gesamtprozeßbeschleunigung von circa eine Faktor 2-6 für das Beispiel erreicht werden. Der Plattenplatzbedarf beträgt nur noch 30% des vorigen Bedarfs für den Gesamtprozeß.

PERMAS-LA – Laminatanalyse

Die Laminatanalyse dient zur Modellierung und Berechnung von mehrschichtigen *Faserverbunden* (*Composites*). Dazu stellt PERMAS spezielle drei- und viereckige Schalenelemente zur Verfügung.

Üblicherweise wird ein Laminat Schicht für Schicht definiert. Jede Schicht definiert sich über ein homogenes anisotropes Material (meist als orthotropes Material definiert) mit Dicke und Ausrichtung, welche die Faserrichtung über einen Winkel gegenüber dem Materialbezugssystem beschreibt. Die Beschreibung wird durch VisPER unterstützt. Die Homogenisierung des Schichtaufbaus erfolgt in PERMAS nach der *erweiterten Laminattheorie* (*ELT*).

In seltenen Fällen kann die Homogenisierung auch außerhalb von PERMAS erfolgen. Dann werden die resultierenden A-, B-, D- und G-Matrizen direkt eingelesen.

Für die Berechnung stehen nicht nur lineare Analysen (wie in Abb. 181), sondern auch nichtlineare Analysen wie Beulen (siehe Abb. 182) zur Verfügung.

Die Berechnung liefert primär Elementkräfte, aus welchen die Schichtspannungen und Dehnungen ermittelt werden. Diese Werte stehen jeweils in der Mitte der einzelnen Schichten zur Verfügung. Wenn man die Spannungen zwischen den Schichten benötigt, kann man eine Schicht der Dicke Null einfü-

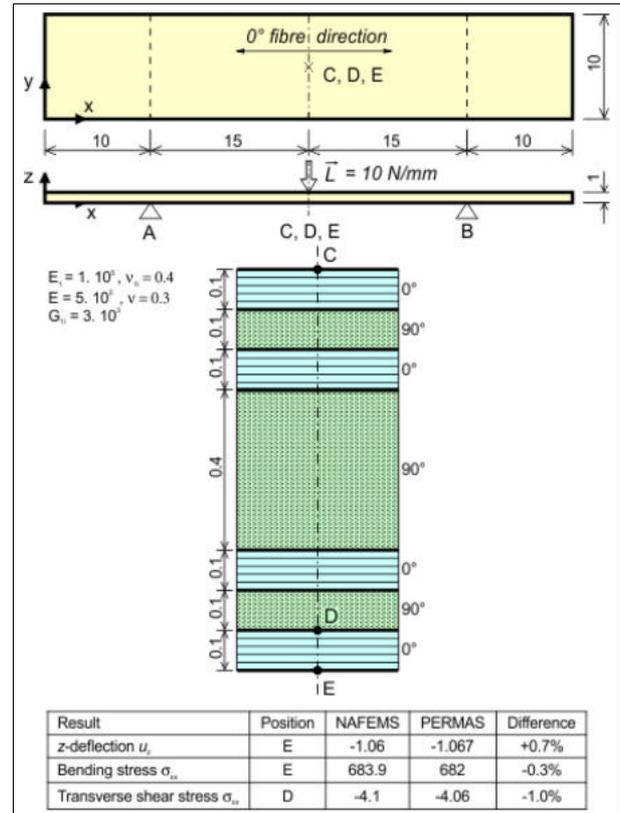


Abbildung 181: Laminatanalyse eines NAFEMS Testbeispiels für Composites.

gen.

Für die weitere Verarbeitung der Spannungen sind eine Reihe von *Versagenskriterien für Laminatschichten* verfügbar. Neben den Kriterien *Hoffman* and *Tsai-Wu* können Versagenskriterien auch über ein Benutzer-Unterprogramm definiert werden.

PERMAS-WLDS – Schweißpunktmodell

Die Modellierung von Schweißpunktverbindungen ist auf Seite 61 beschrieben. Damit wird eine gute Abbildung der globalen Steifigkeit erreicht.

Die einzelnen Schweißpunktkräfte können aber entlang einer Schweißlinie sehr stark variieren, weil sich u.a. Diskretisierungseffekte durch die inkompatibel vernetzten Flansche auswirken.

Dieses Modul bietet nun ein verfeinertes Schweißpunktmodell an, das durch sehr geringe Schwankungen der Schweißpunktkräfte und eine verbesserte Abbildung der Steifigkeit gekennzeichnet ist

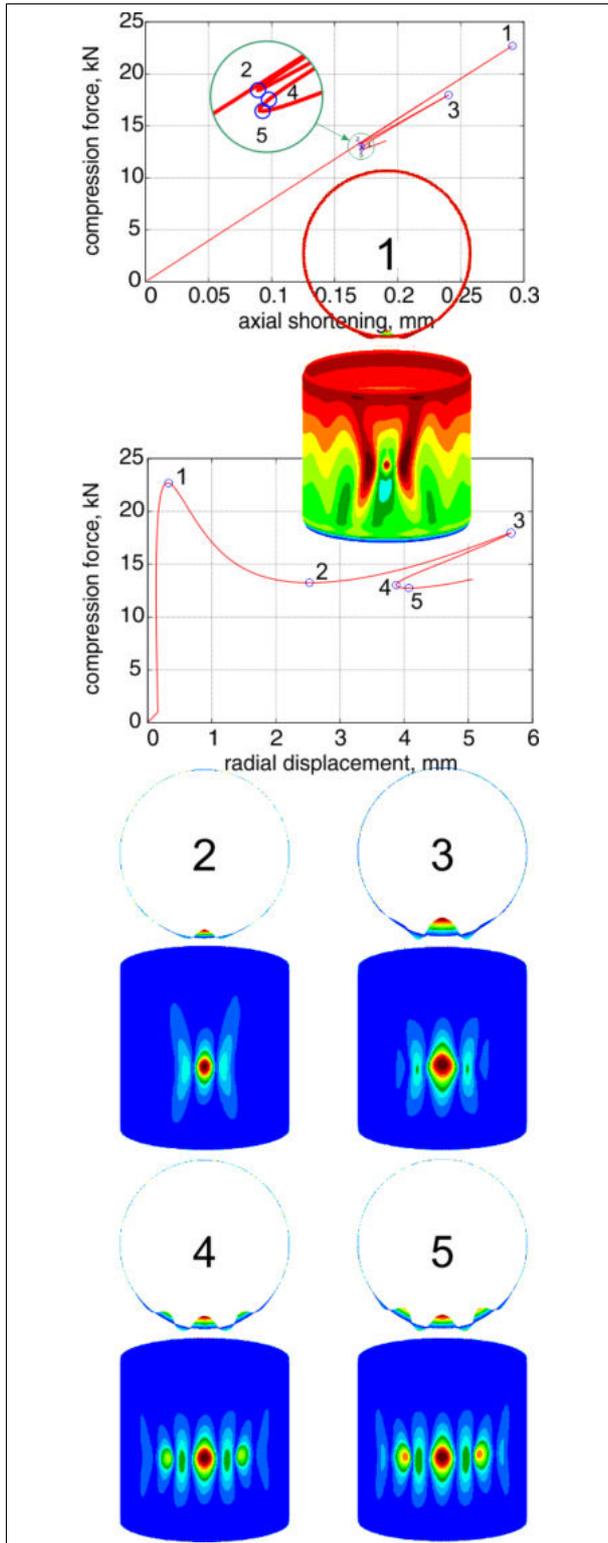


Abbildung 182: Nichtlineares Beulen mit Nachbeulverhalten für eine laminierte Zylinderschale

(siehe Abb. 183). Dies wird u.a. dadurch erreicht, dass das verwendete Modell mit Hilfe einer Kalibrierung über ein Volumenmodell entwickelt wurde.

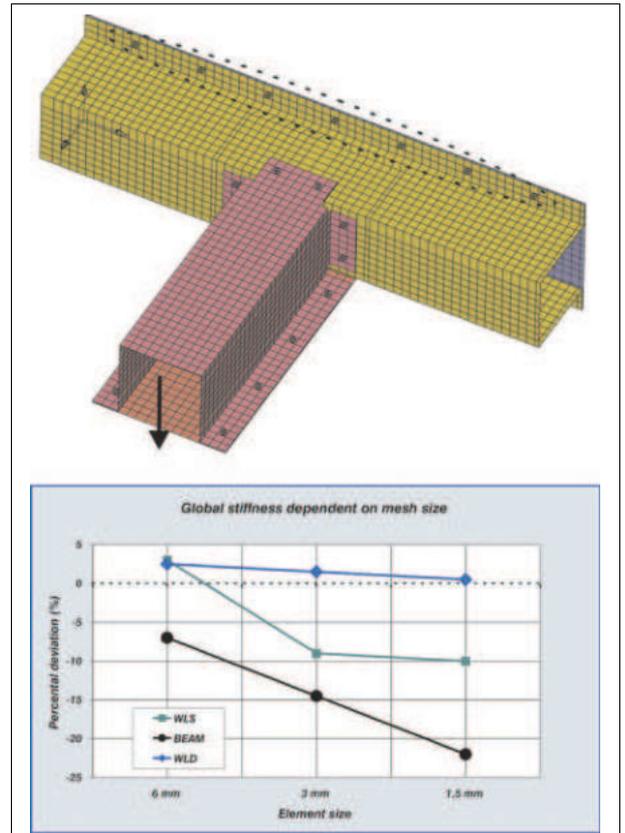


Abbildung 183: Qualität des verfeinerten Schweißpunktmodells

PERMAS-GINR – Generalisierter Inertia Relief

Inertia Relief führt eine quasistatische Berechnung eines freien und nicht gelagerten Körpers durch (siehe Seite 79). Die Struktur erfährt eine Starrkörperbeschleunigung, was zu einem statischen Gleichgewicht zwischen Trägheitskräften und aufgetragenen Lasten führt. Die Berechnung ermittelt absolute und keine relativen Verschiebungen (siehe Abb. 184).

Wie im Falle von aerodynamischen Lasten kann eine sogenannte *Lastkorrekturmatrix* zusätzlich spezifiziert werden, die bei der generalisierten Inertia-Relief-Berechnung berücksichtigt wird.

PERMAS-EMS – Elektro-/Magnetostatik

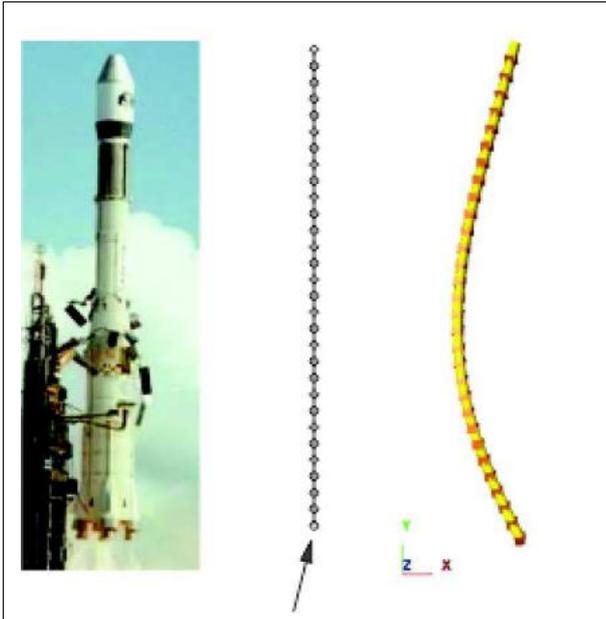


Abbildung 184: Verschiebungen einer Rakete unter Antrieb und Eigengewicht

Dieses Modul erlaubt die Durchführung elektrostatischer und magnetostatischer Berechnungen. Letztere können auch mit Hilfe einer zuvor berechneten stationären Stromverteilung erfolgen. Die Berechnung selbst erfolgt auf der Basis eines Skalarpotentials für das elektrische Feld und eines Vektorpotentials für das magnetische Feld.

Vielfältige Lastbeschreibungen werden unterstützt.

Die Bestimmung und Behandlung von Singularitäten erfolgt analog dem Vorgehen in der Statik (siehe Seite 64).

Die von einem elektrischen Feld induzierten Wärmequellen können für eine nachfolgende Wärmeleitungsrechnung verwendet werden (siehe dazu Seite 92). Daraus könnten sich wiederum Wärmespannungen ergeben, die sich dann mit einer statischen Analyse ermitteln lassen (siehe dazu Seite 79).

Die von einem magnetischen Feld induzierten Kräfte können für eine nachfolgende Statikberechnung verwendet werden (siehe dazu Seite 79).

PERMAS-EMD – Elektrodynamik

Die Lösung der *Maxwell*-Gleichungen steht für ver-

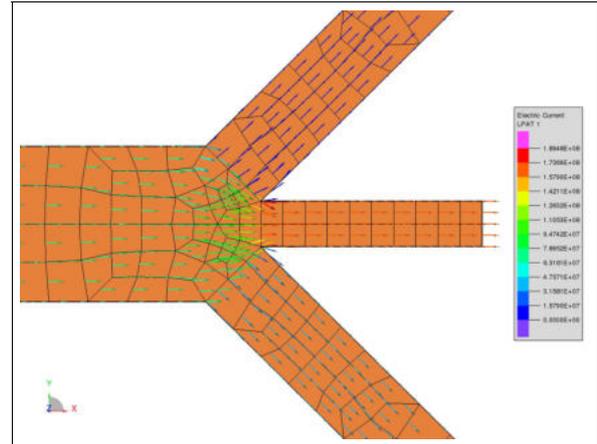


Abbildung 185: Elektrischer Strom in einer Leitungsverzweigung

schiedene Problemklassen zu Verfügung:

- Wirbelströme
- Induktionsprobleme (siehe Abb. 186)
- Eigenwertaufgaben
- Wellenausbreitung
- Allgemeine Elektrodynamik

Alle statischen Lasten sind für die Dynamik anwendbar (wie vorgeschriebene Potentiale). Die Definition erfolgt durch die Angabe statischer Lastfälle und geeigneter Zeitfunktionen wie in der Strukturdynamik (siehe Seite 99).

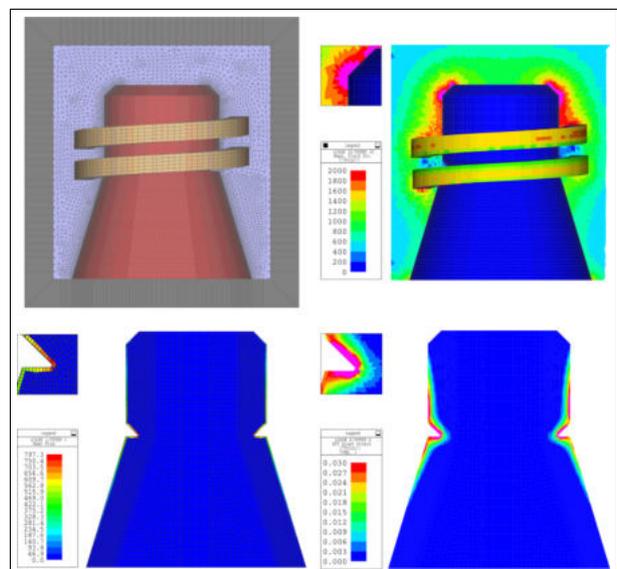


Abbildung 186: Beispiel für elektrodynamische Induktion,

Modell und magnetische Feldstärke (oben), induzierter Wärmefluss und, plastische Dehnungen (unten).

Die Kopplung zwischen Elektrodynamik, Wärmelei-

tung und Statik mit nichtlinearem Materialverhalten wird in einem einzigen Modell durchgeführt, das dieselben Elemente für die verschiedenen Berechnungen verwendet. Dadurch sind keine Schnittstellen und ist kein Mapping erforderlich, um die Berechnungen zu koppeln.

PERMAS-XPU – GPU-Beschleuniger

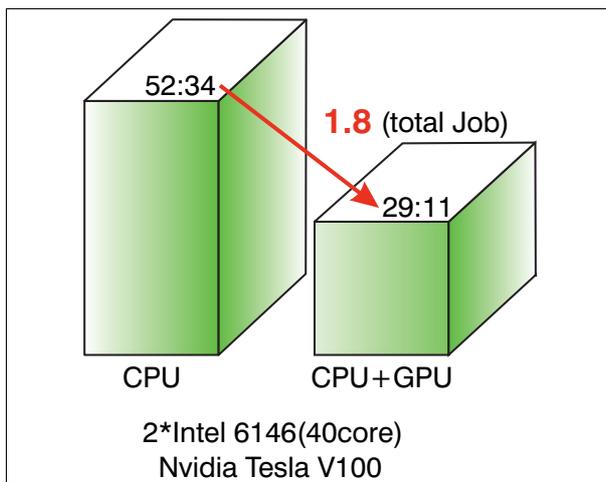


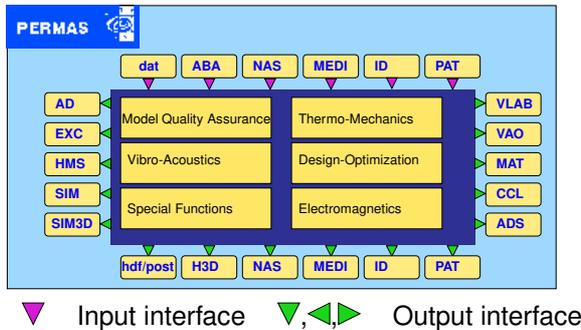
Abbildung 187: XPU Beschleunigung für großes Kontaktmodell

Das Modul XPU unterstützt die GPU von Nvidia (Tesla K20/K40/K80 [c/m/x] und P100/V100 [c/m/x] mit CUDA Version 7/8/9, wobei P100/V100 CUDA 8/9 für volle Leistung benötigt) zur Beschleunigung von rechenzeitgebundenen Analysen durch die Integration in das bestehende Parallelisierungskonzept von PERMAS. Dazu muss die S64-Version von PERMAS verwendet werden (siehe auch Seite 137 für die unterstützten Betriebsarten in PERMAS), weil der effiziente Einsatz der GPU mindestens 32 GB Memory im verwendeten Computer benötigt. Die Beschleunigung ist besonders attraktiv für rechenzeitintensive Analysen wie die Eigenwertanalyse für sehr viele Moden, die direkte Frequenzganganalyse für gekoppelte Fluid-Struktur-Modelle und große Modelle mit Normalkontakt. Siehe Abb. 187.

Schnittstellen

Überblick

PERMAS ist als offenes Softwaresystem eine Integrationsplattform für andere Werkzeuge/Prozesse.



PERMAS-MEDI – MEDINA-Door

Diese Schnittstelle liest direkt die MEDINA-Datenschiene mit dem Modell (.bif) und schreibt die Ergebnisse dorthin zurück (.bof).

Alle MEDINA-Elemente und fast alle *MPCs* werden nach PERMAS übersetzt (siehe Seite 62). Neben Komponenten können Situationen mit Randbedingungs- und Lastvarianten definiert werden (siehe Seite 58).

Für die Modelltests in MEDINA ist es entscheidend, dass Elementtests aus PERMAS in MEDINA integriert wurden. Damit kann weitgehend sichergestellt werden, dass ein in MEDINA geprüfetes Modell die Tests in PERMAS passiert.

Die bauteilbezogene Arbeitsweise über inkompatible Kopplung von Linien/Flächen wird unterstützt. Insbesondere wird auch die automatisierte Modellierung von Schweißpunktverbindungen durch das SPOTWELD-Element in MEDINA unterstützt (siehe Seite 61).

Die Schnittstelle unterstützt folgende Analysearten:

- Lineare/nichtlineare Statik,
- Kontaktanalyse,
- Dynamische Eigenwertanalyse,
- Wärmeleitung,
- Fluid-Struktur Akustik (Basismodellierung und Ergebnisauswertung),
- Elektromagnetik (Basismodellierung und Ergebnisauswertung).

Die Schnittstelle wird laufend an die aktuellen Versionen von MEDINA angepasst.

PERMAS-PAT – PATRAN-Door

Diese Schnittstelle liest direkt die PATRAN-Datenbasis mit dem Modell und schreibt die Ergebnisse auf PATRAN-Ergebnisdateien.

Die Modellierung erfolgt durch die Definition eigener Preferences maßgeschneidert für PERMAS. Eigene Solvermenüs, die auch vom Benutzer konfigurierbar sind, unterstützen Standardanwendungen direkt aus PATRAN heraus. Folgende Modellbestandteile werden übernommen:

- Alle gemeinsamen Elemente,
- Alle Lasten einschl. Trägheitslasten,
- Alle kinematischen Zwangsbedingungen in PERMAS,
- Sets,
- Teilstrukturdefinitionen,
- Variantenbeschreibungen.

Die Schnittstelle unterstützt folgende Analysearten:

- Lineare/nichtlineare Statik
- Kontaktanalyse
- Dynamische Eigenwertanalyse
- Wärmeleitung
- Fluid-Struktur Akustik

Auch für andere Freiheitsgrad-Typen wie elektrisches/magnetisches Potential können die Modelle vorbereitet werden.

PERMAS-ID – I-DEAS-Door

Diese Schnittstelle übernimmt auf der Basis der I-DEAS Universalfiles folgende Modellbestandteile:

- Alle gemeinsamen Elemente
- Axisymmetrische Modelle
- Alle Lasten einschl. Trägheitslasten
- Viele lineare kinematische Zwangsbedingungen, wie 'rigid elements' und 'coupled dofs'
- Laminatbeschreibung
- Sets
- Teilstrukturdefinitionen

- Variantenbeschreibungen

Die Schnittstelle unterstützt folgende Analysearten:

- Lineare/nichtlineare Statik
- Kontaktanalyse
- Dynamische Eigenwertanalyse
- Wärmeleitung

Auch für akustische und elektromagnetische Analysen können die Modelle in I-DEAS vorbereitet werden.

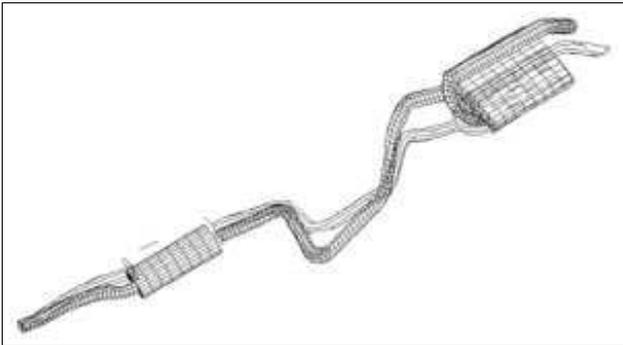


Abbildung 188: Eigenform einer Abgasanlage

Diese Schnittstelle kann auch Ergebnisdaten vom Universalfile lesen. Damit können experimentelle Ergebnisse einer *Experimentellen Modal-Analyse (EMA)* in PERMAS eingelesen und mit Berechnungsergebnissen verglichen werden (siehe auch Seite 39).

PERMAS-AD – ADAMS-Interface

Reines Postprocessing-Interface zur Ausgabe von Modelltopologie und massennormierten Schwingungseigenformen. Dazu werden generalisierte Steifigkeiten und Massen sowie gegebenenfalls statische Verschiebungseigenformen für die Weiterverarbeitung in ADAMS bereitgestellt.

Die gemeinsame Orthogonalisierung von statischen und dynamischen Moden kann auch sehr effizient in PERMAS durchgeführt werden (siehe auch Modul DEV, Seite 96).

Zusätzlich ist es möglich, statisch oder dynamisch kondensierte Modelle nach ADAMS auszugeben. Dabei kann auch die automatische *Teilstrukturtechnik* mit MLDR verwendet werden (siehe Seite 98).

Die Ausgabe geschieht im entsprechenden Format ab ADAMS Version 9.

PERMAS-EXCI – EXCITE-Interface

Postprocessing-Interface zur Ausgabe von Modelltopologie, massennormierten Schwingungseigenformen und kondensierten Matrizen. Diese Schnittstelle wurde für die EXCITE Version 2013-2 mit ExbAPI_V2.0 entwickelt.

Ein spezielles Kommando ist verfügbar, mit dem nach der Eigenwertanalyse eines reduzierten flexiblen Bauteils Massen- und Steifigkeitsmatrix gemäß einer Benutzervorgabe so verändert werden können, dass sich eine Verschiebung einzelner Eigenwerte ergibt. Das veränderte reduzierte System wird dann nach EXCITE exportiert. Damit lässt sich die Wirkung solcher geänderter Teile in EXCITE untersuchen, ohne dazu das FE-Modell des Bauteils zu ändern.

Eine gefilterte Rücktransformationsmatrix kann exportiert werden, die nach einer EXCITE-Berechnung verwendet werden kann.

Der Export kann auch in einem gezippten Format erfolgen (durch *gzip*), um den Umfang der ausgetauschten Daten im ASCII-Format zu reduzieren.

Das Excite-Binärformat *exb* und Trägheitsinvarianten werden auch unterstützt.

Ergebnisse aus EXCITE können in PERMAS importiert werden, um weitere Ergebnisse zu berechnen (siehe Abb. 167).

PERMAS-SIM – SIMPACK-Interface

Postprocessing-Interface zur Ausgabe von Modelltopologie, massennormierten Schwingungseigenformen und kondensierten Matrizen für SIMPACK Version 9.

- Auf der Basis eines Teilstrukturmodells.
- Statische *Kondensation* mit PERMAS.
- Auch mit *dynamischer Kondensation* möglich.
- Oder, besonders interessant, mit automatischer Teilstrukturtechnik mit Hilfe von MLDR (siehe

Seite 98).

- Ausgabe von Steifigkeit/Masse/usw. auf der Ebene der Top-Komponente.
 - Auch Ausgabe von Matrizen zur geometrischen Steifigkeit.
 - Für die Darstellung der Struktur in SIMPACK kann das unkondensierte Netz ausgegeben werden.
-

PERMAS-HMS – MotionSolve-Interface

Postprocessing-Interface zur Ausgabe von Modelltopologie, massennormierten Schwingungseigenformen mit Eigenwerten und die Knotenmassen. Diese Schnittstelle wurde für die HyperWorks-Version 11 entwickelt.

PERMAS-H3D – HYPERVIEW-Interface

Postprocessing-Interface zur Ausgabe von Modelltopologie und Ergebnissen ab HYPERVIEW Version 8. Es stehen Ausgabeformate für HYPERVIEW Version 8 und 11 bereit.

Dabei werden Ergebnisse aus Statik, Kontaktanalyse, nichtlinearen Analysen, Dynamik, Akustik und Wärmeleitung unterstützt. Das Format umfasst allerdings keine xy-Daten.

PERMAS-VAO – VAO-Interface

Postprocessing-Interface zur Ausgabe von Modelltopologie, massennormierten Schwingungseigenformen und Dämpfungsmatrizen für Verschiebungs- und Druckfreiheitsgrade nach VAO.

PERMAS-VLAB – Virtual.Lab-Interface

Postprocessing-Interface zur Ausgabe von Modelltopologie und Ergebnissen nach Virtual.Lab:

- Verschiebungen, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen,
- Starrkörper-Verschiebungsformen,
- Assemblierte Lasten,
- Reaktionskräfte,
- Spannungen,
- Dehnungsenergie,
- Kinetische Energie,
- Schallabstrahlungsleistung.

Die gemeinsame Orthogonalisierung von statischen und dynamischen Moden kann auch sehr effizient in

PERMAS durchgeführt werden (siehe auch Modul DEV, Seite 96).

PERMAS-ADS – ADSTEFAN-Interface

Preprocessing-Schnittstelle zur Eingabe von Temperaturfeldern aus einer Gießsimulation mit ADSTEFAN. Die Schnittstelle überträgt die Temperaturfelder auf das aktuelle FE-Netz. Damit wird eine nachfolgende lineare oder nichtlineare statische Analyse der Spannungsentwicklung während des Abkühlvorgangs ermöglicht. Diese Schnittstelle wurde für die ADSTEFAN Version 2015 entwickelt.

PERMAS-MAT – MATLAB-Interface

Postprocessing-Interface zur Ausgabe von Modelltopologie und Matrizen.

Häufig wird MATLAB für den Entwurf von Reglern verwendet. Soweit es sich dabei um lineare Regelsysteme handelt, können diese auch weitgehend in das PERMAS-Modell übernommen werden.

Darüberhinaus können (insbesondere nichtlineare) Regler aus MATLAB in eine dynamische Berechnung übernommen werden, in dem eine entsprechende PERMAS Benutzerfunktionen als Unterprogramm (in C oder FORTRAN) eingebunden wird.

PERMAS-NAS – NASTRAN-Door

Das NASTRAN-Door liest und überprüft NASTRAN kompatible Eingabefiles und setzt diese direkt in interne PERMAS-Datenstrukturen um.

Die wichtigsten **Fähigkeiten** des NASTRAN-Doors sind:

- Folgende Bulk Data Formate werden unterstützt: Small Field, Large Field und Free Field (mit sämtlichen Generierungsmöglichkeiten).
- Auch Executive und Case Control Section sowie alle global gültigen Kommandos werden übersetzt.

- Entsprechend den Bulk Data Modelldaten und den Case Control Selektionen werden PERMAS- Komponenten und -Situationen gebildet.
- NASTRAN-Identifikatoren werden übernommen. So bleiben z.B. Element-, Knotenpunkts- und SET-IDs erhalten und werden als PERMAS-Identifikatoren weiter verwendet.
- Automatische Generierung von Fortsetzungs-Labeln mit NASTRAN-kompatiblen Labeln.
- Effiziente Sortierung der Bulk Data Karten mit einer maschinenunabhängigen Sortierreihenfolge.
- NASTRAN-kompatible Echo-Ausgaben.
- Sehr sorgfältige Fehlertests:
 - Die bekannten NASTRAN Befehle werden erkannt und lexikalisch analysiert.
 - Alle unterstützten Kommandos werden komplett auf falsche, fehlende oder widersprüchliche Argumente überprüft.
- Zusätzliche Möglichkeiten:
 - Ergebnisse können über die Subcase- oder über die Load-ID angesprochen werden.
 - Freie Kommentare auch auf Fix Field Eingaben.
 - Beim INCLUDE-Kommando sind mehrere File-Ebenen erlaubt.

Eine Besonderheit des NASTRAN-Doors ist die Fähigkeit auch **Steuerdaten** mit zu übernehmen.

- Eingaben wie Solution-ID, Ausgabeanforderungen und die Auswahl von Methoden werden in Task-Kontrollstrukturen überführt, die der Eingabe äquivalenter PERMAS-Kommandos entsprechen.

Diese sogenannte **NASTRAN-Task** kann durch ein spezielles PERMAS-Kommando angestoßen werden.

Für einen NASTRAN kompatiblen Lauf genügt ein einfacher Kommando-File mit nur 4 Kommandos (siehe Abbildung). Mit diesem File können NASTRAN-Decks ohne jegliche Zusatzeingabe ausgeführt werden.

Weitere Fähigkeiten dieser NASTRAN-Task sind:

- Automatische Rückübersetzung und Ausgabe der internen Task-Instruktionen in Klartext PERMAS-Befehle (UCI).
- Der Benutzer kann zwischen einer automatischen Absteuerung (Steuerdaten des

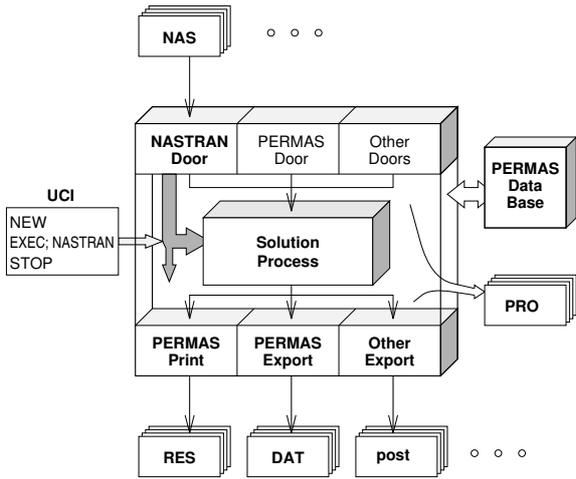


Abbildung 189: Start der NASTRAN-Task

NASTRAN Eingabefiles) und einer expliziten Abstimmung wählen.

- Die NASTRAN-Task kann durch zusätzliche Kommandos ergänzt werden.
- Einzelne NASTRAN-Subcases können gezielt ausgewählt und unabhängig von den anderen Subcases behandelt werden.
- Folgende **Solutions** werden gegenwärtig unterstützt:
 - Linear Static,
 - Normal Modes Analysis,
 - Direct Frequency Response,
 - Direct Transient Response,
 - Modal Frequency Response und
 - Modal Transient Response.
- Unterstützte Parameter, die sich auf die Abstimmung auswirken, werden ebenfalls ausgewertet.

Außerdem ist die Anwendung der NASTRAN-Task nicht auf die reine NASTRAN-Door Eingaben beschränkt. Selbst wenn Eingaben über andere Input-Doors (z.B. PERMAS DAT-File) hinzugefügt werden, kann der Benutzer seine NASTRAN-Steuerbefehle automatisch ausführen.

Eine Ausgabemöglichkeit im OUTPUT2-Format ist verfügbar. Das Modell umfasst Elemente, Knoten und lokale Koordinatensysteme. Die Ergebnisse umfassen Verschiebungen, dynamische Eigenformen, Starrkörpermoden und Reaktionskräfte.

PERMAS-ABA – ABAQUS-Door

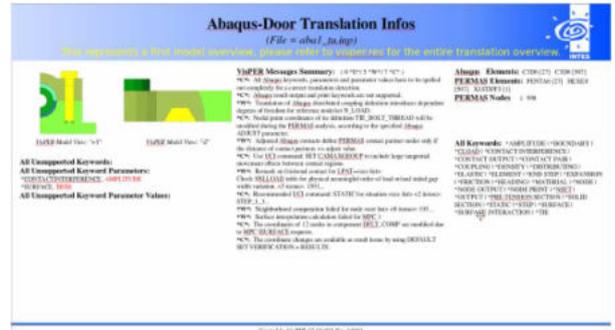


Abbildung 190: Abaqus-Door Übersetzungsbericht

Das ABAQUS-Door liest und überprüft ABAQUS-kompatible Eingabefiles und setzt diese direkt in interne PERMAS-Datenstrukturen um.

Als direkte Schnittstelle zwischen zwei Berechnungsprogrammen besitzt sie den Vorteil, die physikalische Bedeutung der Abaqus-Kommandos während der Übersetzung zu berücksichtigen. Dem Anwender wird auch die Möglichkeit geboten, das Übersetzungsverhalten individuell zu konfigurieren.

Das Abaqus-Door unterstützt eine große Anzahl von Modell- und Belastungsdaten und bietet darüber hinaus wichtige Informationen und thematische Übersichten, die zur Qualitätssicherung des Übersetzungs- und Berechnungsprozesses dienen, z.B. eine Übersichtstabelle zum Analyseverlauf (siehe Abb. 191).

Step History Overview						
Permas			Abaqus			
Situation [UCI command]	LPAT	Step	Type	Analysis	Supported Step Key	
STEP 1_4 (STATIC)	1002	1	General	STATIC	CONTACT INTERFERENCE	
	5001,5002	2	General	STATIC	BOUNDARY/LOAD	
	5001,5002	3	General	STATIC	BOUNDARY/LOAD	
	1				CLOAD	
	2				DLOAD	
	3		4	General	STATIC	TEMPERATURE

Abbildung 191: Übersicht zum Analyseverlauf

Die unterstützten Analyseprozeduren sind:

- lineare und nichtlineare statische Analysen,
- stationäre Wärmeleitungsberechnungen,
- Eigenfrequenzanalysen,
- modale Frequenzganganalysen.

Folgende Modelleigenschaften werden unterstützt:

- Massen-, Balken-, Stab-, Feder-, Dämpfer-, 2D-, 3D-, Gasket- und sog. Konnektorelemente,
- Lokalsysteme und Transformationen,
- verschiedene Kopplungsbedingungen,

- Vorspannung,
- anisotrope und temperaturabhängige Materialdaten,
- Eigenschaften und Materialdaten von Dichtungselementen,
- viele Spezifikationen für Kontaktbeschreibungen,
- thermische Konvektion und Strahlung,
- statische Lasten und Randbedingungen, auch Zentrifugal- und Trägheitslasten,
- vollständige Beschreibung der Lastgeschichte von unterstützten Analyseprozeduren,
- dynamische Lastdefinitionen mit Real- und Imaginärteil,
- Unterstützung der Teilstrukturtechnik,
- Unterstützung von sog. Part-Instanzen.

Für die sofortige Visualisierung und Untersuchung des eingelesenen Modells eignet sich VisPER am Besten. Falls einige Modelleigenschaften nicht übertragen wurden, dann kann VisPER auch dazu dienen, das PERMAS-Modell zu ergänzen.

PERMAS-CCL – MpCCI-Kopplung

Die Einbindung der Kopplungsbibliothek *MpCCI* erlaubt die Kopplung von PERMAS zu CFD-Programmen, wie es im Abschnitt zu MpCCI auf Seite 75 beschrieben steht.

PERMAS-SIM3D – SIMDRIVE 3D-Interface

Postprocessing-Interface zur Ausgabe von Modelltopologie, massennormierten Schwingungseigenformen und kondensierten Matrizen für SIMDRIVE 3D und Importmöglichkeit von MBS Ergebnissen zur weiteren Verarbeitung.

- FEM, MBS, NVH Analyse mit PERMAS und SIMDRIVE 3D
- Datenaustausch mittels eines (einzelnen) PERMAS HDF Files.
- Extradaten für NVH Auswertung:
Netz und Knotenpunkte (Untermenge aller Knoten), modale Verschiebungen, modale Knotenpunktsspannungen

Weitere Schnittstellen

Neben den bisher beschriebenen Schnittstellen gibt es noch weitere Schnittstellen zu PERMAS, die von anderen Softwarehäusern entwickelt wurden, um PERMAS an ihre Software anzubinden. Die folgende Liste enthält natürlich nur die Schnittstellen, von denen wir vor Drucklegung der Produktbeschreibung erfahren haben. Die Liste muss also nicht vollständig oder korrekt sein. Jedenfalls sind diese Schnittstellen nicht Bestandteil von PERMAS und zu ihrer Funktionalität sind die jeweiligen Entwickler anzusprechen.

- **Animator4 von GNS (www.gns-mbh.com):** Das Postprocessing von PERMAS-Ergebnissen erfolgt über das MEDINA-Format.
- **ANSA von BETA CAE Systems (www.beta-cae.gr):** ANSA unterstützt das PERMAS-Eingabeformat und das MEDINA-Format (.bif, .bof) für das Postprocessing mit dem μ ETA Postprozessor.
- **Digmat (e-Xstream, www.e-xstream.com):** Die Schnittstelle generiert PERMAS Materialdaten für Spritzgussteile.
- **Ensignt von CEI (www.ensight.com):** Dieser Postprozessor liest die Ergebnisse direkt von PERMAS-Dateien.
- **Evaluator von GNS (www.gns-mbh.com):** Dieser Report-Generator liest die Ergebnisse direkt von PERMAS-Dateien.
- **FE-Fatigue von nCode (www.ncode.com):** Der Datenaustausch ist auf der Basis des MEDINA-Formats möglich.
- **FEGraph von vMach Engineering (www.vonmach.com):** Diese Software kann direkt als Postprozessor für PERMAS-Daten verwendet werden.
- **FEMFAT von MAGNA POWERTRAIN (www.femfat.com):** Die Verbindung zwischen PERMAS und FEMFAT kann auf der Basis des MEDINA-Exports in PERMAS erfolgen, da FEMFAT das gleiche Format unterstützt.
- **HyperMesh von Altair (www.altair.com):** Diese Schnittstelle unterstützt das PERMAS-Eingabeformat. Es ergänzt das PERMAS-Modul H3D (siehe Seite 129), welches die Ausgabe zum Postprocessing mit HyperView übernimmt.
- **Jupiter (Technostar, www.e-technostar.com):** Jupiter unterstützt das PERMAS-Eingabeformat.
- **MAGMALink von MAGMA**

(www.magmasoft.de): Diese Software ist ein Modul zur Übertragung von Ergebnissen aus der Fertigungssimulation mit MAGMASOFT auf FE-Netze für die Festigkeitsberechnung.

- **Materialdatenbank MARLIS von M-Base (www.m-base.de, www.marlis-cae.com):** Diese Materialdatenbank enthält Kennwerte von Stahlblechwerkstoffen und kann diese Werte als PERMAS-Materialbeschreibung ausgeben.
- **Siemens NX (Siemens PLM Software, www.siemens.com/NX):** FE-Modelle, die in NX generiert wurden, können nach PERMAS mit einer Schnittstelle exportiert werden, die von Dr. Binde Ingenieure entwickelt wurde (siehe www.drbinde.de/index.php/de/leistungen-menu/produkte/174-permas). PERMAS-Ergebnisse können in NX über eine Schnittstelle von Siemens PLM Software ausgewertet werden, die von VKI entwickelt wurde (siehe www.vki.com/2013/Products/VdmTools.html).
- **SimLab von Altair (www.altair.com):** Dieser Preprozessor verfügt über eine Schnittstelle im PERMAS-Eingabeformat.

Alle genannten Produkt- und Herstellernamen gehören Ihren Besitzern. Die Erwähnung erlaubt nicht den Schluss, dass diese Namen nicht geschützt seien.

PERMAS for Education



PERMAS4EDU ist das ideale Werkzeug um sich mit der Software vertraut zu machen oder in einem akademischen Umfeld die Finite Elemente Methode zu nutzen. Sie können die herausragenden Fähigkeiten von PERMAS und die Breite an Anwendungsmöglichkeiten mit PERMAS4EDU kennenlernen. Der Modelleditor, VisPER ist eingeschlossen. PERMAS4EDU deckt die komplette Prozeßkette vom FE-Netz bis zur Auswertung ab.

- ausgeschlossen
- Modellgrößenbeschränkungen, z.B. 16,000 Knoten, 32,000 Elemente, und 65,000 FhG
- Schnittstellen: VisPER, ANSA, ABAQUS, NASTRAN, MEDINA, und HyperWorks
- inklusive Handbücher mit >200 Anwendungsbeispielen und Tutorials
- User Forum bei INTES zum Austausch mit anderen Nutzern und mit einer Auswahl von Anwendungsbeispielen und Tipps
- Verfügbar auf Windows und Linux

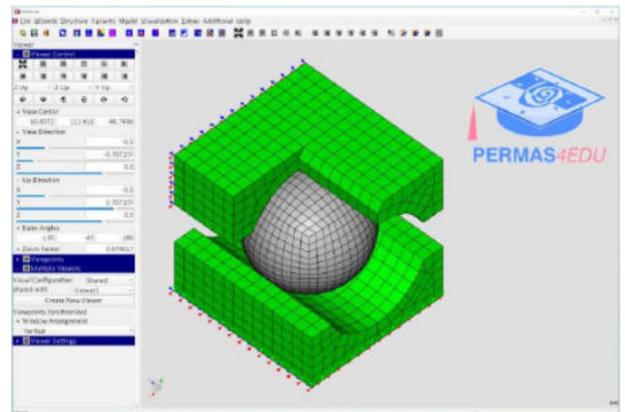


Abbildung 193: Kontaktmodell

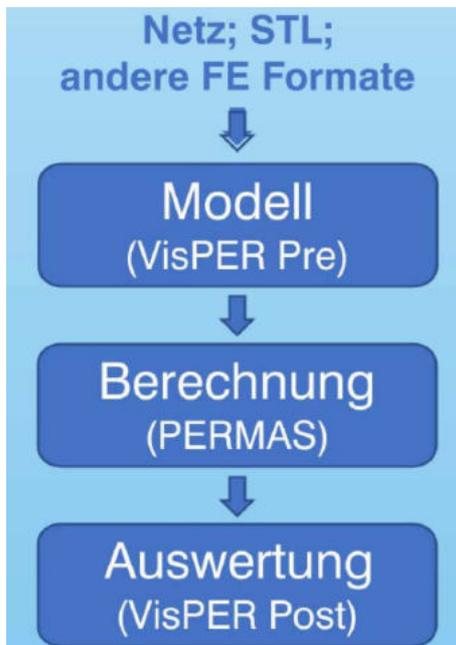


Abbildung 192: Analyseprozeßkette

PERMAS4EDU ist erhältlich über eine Registrierung unter: www.intes.de/edu

- Enthält: PERMAS, VisPER, und PERMAS Tools
- Die FEM Prozeßkette vom Netz zur Auswertung
- Ist kostenfrei für Ausbildungs- und Weiterbildungswecke. Eine kommerzielle Nutzung ist

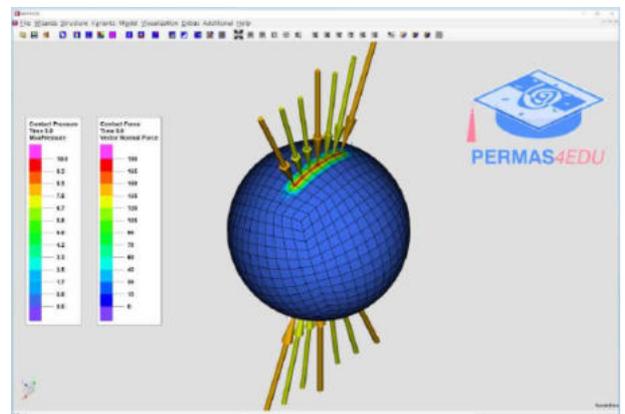


Abbildung 194: Kontaktdruck und Kräfte

Installation und mehr

Unterstützte Rechnersysteme

Für PERMAS werden die folgenden Rechnersysteme unterstützt:

Prozessor	Betriebssystem
PC x86(_64)	LINUX Debian 9/10, LINUX Ubuntu 16.04/18.04/20.04, LINUX RedHat EL6/EL7/EL8, LINUX SuSE 12/15 and compatibles Nvidia GPU (siehe Seite 125)
PC x86_64	Windows 10 64 bit

Für VisPER werden die folgenden Rechnersysteme unterstützt:

Prozessor	Betriebssystem
PC x86(_64)	LINUX glibc ≥ 2.11, NVIDIA graphics
PC x86_64	Windows 10 64 bit

Welche Plattformen mit welchen Betriebssystemversionen jeweils unterstützt werden, befindet sich in ständiger Entwicklung und muss im Einzelfall über den Kontakt auf der letzten Seite dieser Kurzbeschreibung erfragt werden.

Die in dieser Kurzbeschreibung aufgeführten Funktionen sind in der Regel auf allen unterstützten Plattformen verfügbar. Dabei sind Ausnahmen durchaus möglich (z.B. bei *Parallelisierung*, CFD-Kopplung, Schnittstellen mit fremden Programmbibliotheken (z.B. H3D, VLAB), usw.). Deshalb ist auch hier im Einzelfall eine Rückfrage über den auf der letzten Seite dieser Kurzbeschreibung genannten Kontakt zu empfehlen.

PERMAS erlaubt die volle Ausnutzung der *64 Bit-Architektur* moderner Prozessoren. Insgesamt stehen folgende Betriebsarten zur Verfügung:

- 64 bit Betriebssystem:
 - D64: Doppeltgenaue Fließpunktarithmetik auf 32 Bit Maschinenworten mit einem nutzbaren Zentralspeicher bis etwa 7 bis 8 GB.
 - S64: Einfachgenaue Fließpunktarithmetik auf 64 Bit Maschinenworten mit einem praktisch unbegrenzten Zentralspeicher (empfohlenes Minimum ist 16 GB).

Lizensierung

Die folgenden Lizenzierungsarten sind verfügbar:

- **Nodelock-Lizenz:** Die Software kann nur auf einem Rechnerknoten ausgeführt werden. Diese Lizenzierungsart ist nur als Spezialfall der Floating-Lizenz verfügbar.
- **Floating-Lizenz:** Die Software kann auf einem Rechner-Netzwerk ausgeführt werden, wobei eine festgelegte Anzahl von Lizenzen auf beliebigen Knoten des Netzwerks verwendet werden kann.

Für Floating- und Nodelock-Lizenzen ist der *Lizenzmanager* für die gesamte Buchhaltung aller Lizenzinformationen verantwortlich. Dabei werden verschiedene Server-Architekturen unterstützt:

- **Einzelserver:** Dabei arbeitet der Server unabhängig von anderen Servern im Netz und jeder Server hat seine eigenes Lizenzierungssystem.
- **Multiserver:** Dieses System besteht aus drei Servern, wobei zwei verfügbar sein müssen. Dabei hat jeder dieser Server die gesamte Lizenzinformation.

Zur Verwaltung der Lizenzserver steht eine WEB-Schnittstelle zur Verfügung.

Wartung und Portierung

PERMAS wird laufend gewartet und verbessert. Im Rahmen eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses ist die aktuelle Version die jeweils beste. Täglich werden zahlreiche Software-Tests durchgeführt und ihre Ergebnisse überprüft.

Alle eingehenden Problemberichte werden mit einem speziellen Verwaltungssystem (GNATS) erfasst und an den Verantwortlichen weitergeleitet. Jede daraus resultierende Korrektur führt zu einer eindeutig identifizierbaren Version der Software. Sollte ein Problem, das bei INTES bereits behoben ist, beim Anwender nicht umgehbar sein, wird die verbesserte aktuelle Version nachgeliefert.

Alle paar Wochen wird der Technical Newsletter aktualisiert, welcher die vorgenommenen Software-Korrekturen, ihren Anlass sowie evtl. Umgehungsmöglichkeiten auflistet. Er enthält auch wichtige Problemlösungen für häufig gestellte Fragen. Er wird

auf der INTES-Homepage in einem für Kunden reservierten Bereich veröffentlicht (siehe nächster Abschnitt). Kunden können den Technical Newsletter auch abonnieren und erhalten ihn dann automatisch per E-Mail zugeschickt.

In der Regel wird alle 2 Jahre ein größerer Entwicklungsschritt als neue Version an alle Kunden mit einem Miet- oder Wartungsvertrag ausgeliefert. Damit verbunden ist auch die Neulieferung der benötigten Dokumentation. Kunden können sich nach einer Registrierung die neuen Versionen direkt herunterladen.

Bei neuen Versionen des jeweils verwendeten Pre- und Postprozessors steht meist ohne großen zeitlichen Verzug die angepasste PERMAS-Version zur Verfügung. Sobald wichtige Änderungen in der Kompatibilität bekannt werden, werden die Anwender benachrichtigt.

Benutzerunterstützung

Für PERMAS-Anwender stehen eine Reihe von Informationsquellen zur Verfügung:

- Dokumentation,
- Schulung,
- Support-Plattform auf der INTES-Homepage,
- Hotline-Service über Telefon und E-Mail.

Insbesondere die Support-Plattform auf der INTES-Homepage enthält aktuellste Informationen zu PERMAS und stellt eine stetig wachsende Informationsquelle dar:

- Technical Newsletter mit Informationen zu aufgetretenen Software-Problemen, ihrer Umgehung und Behebung.
- PERMAS User and Support Forum zum Austausch von Informationen zwischen INTES und den Anwendern sowie zwischen den Anwendern untereinander.
- Downloads.
- PERMAS Documentation Templates zur eigenen Organisation von Workflow und Standard-PERMAS-Prozeduren.
- Informationen zur Administration von PERMAS-Lizenzen, wenn z.B. ein Rechnerwechsel ansteht.

Zusätzliche Werkzeuge

Zur Unterstützung der Anwendung von PERMAS bietet INTES auch einige zusätzliche Werkzeuge als PERMAS-Tools an, welche aber nur unter Linux- und Windows-Systemen verfügbar sind. Diese umfassen:

- **PERMAS control center:** Eine grafische Oberfläche, um PERMAS oder VisPER zu starten und mit den wichtigsten Parametern zu versehen (siehe Abb. 195). Sie unterstützt auch die folgenden Aktivitäten:
 - Öffnet und editiert eine bestehende PERMAS Steuerdatei (.uci) oder erzeugt eine neue.
 - Öffnet und zeigt PERMAS-Protokoll- und Ergebnis-Dateien (.pro/.res).
 - Archiviert einen kompletten Rechenjob über das Skript pack_permas_job, das alle Steuer- und Eingabe-Dateien der aktuellen Steuerdatei zusammenpackt und archiviert.
 - Extrahiert vollständige Beispiele aus dem PERMAS Beispiel-Handbuch zur Ausführung und Untersuchung.

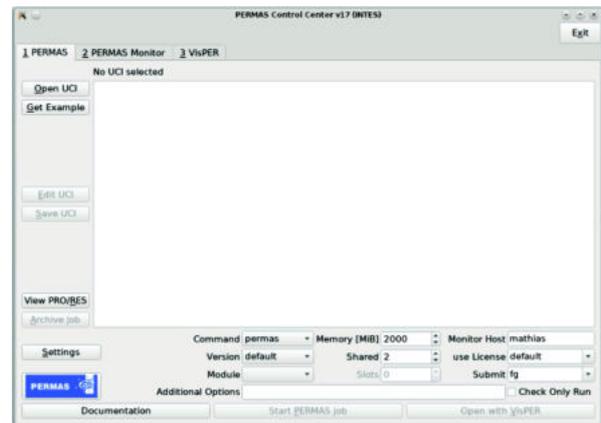


Abbildung 195: PERMAS Control Center

- **pyINTES:** Die INTES-Tools sind vollständig in *Python* geschrieben. Mit pyINTES steht ein vollständiges Python-System zur Verfügung, mit dem die vorhandenen Skripte problemlos ausgeführt werden können. Derzeit nutzt pyINTES auch Miniconda2 von Continuum Analytics, das eine ganze Reihe von zusätzlichen Python-Tools bereitstellt.
- **PERMASgraph:** Eine grafische Oberfläche zur Darstellung von xy-Diagrammen mit entsprechenden Ergebnissen aus PERMAS, MEDINA oder PATRAN,

PERMASgraph unterstützt folgende Dateiformate:

- das PERMAS-eigene Format (.hdf, .post(.gz)),
- in MEDINA-Format (.bif, .bof),
- in PATRAN-Format,
- in CSV-Format (wie von PERMAS im Spreadsheet-Format ausgegeben; .csv).

Die Diagramme können auch in verschiedenen Formaten gespeichert werden:

- Portable Network Graphics (.png),
- Encapsulated PostScript (.eps),
- PostScript (.ps),
- Portable Documents Format (.pdf),
- Microsoft Excel File Format (.xls).

Die Diagramme können auch auf einem lokalen Drucker ausgegeben werden

Zusätzliche Werkzeuge stehen für spezielle Ausgabeoperationen zur Verfügung:

- Addition bzw. Subtraktion von Kurven,
- Fourier-Transformation.

Spezielle Auswerte-Operationen sind ebenfalls verfügbar:

- Analyseprogramm für die Kopplung von Fläche zu Fläche,
- Analyseprogramm für potentielle und kinetische Energien einer gekoppelten Fluid-Struktur-Berechnung,
- Analyseprogramm für modale Anteilsfaktoren,
- Analyseprogramm für Dehnungs- und Bewegungsenergie (siehe Beispiel in Abb. 145).

- die Integration externer Verwaltungstools (wie Open Grid Engine) in PERMAS für eine bestmögliche Auslastung aller vorhandenen Maschinen verbunden mit einer Minimierung des Administrationsaufwandes. Damit wird die Lastverteilung und Job-Verwaltung erleichtert, insbesondere auch beim Einsatz von parallelen Anwendungen mit PERMAS.

- den schnellen und komfortablen Editor INTES-EMACS mit Online-Help und Dokumentation für verschiedene Dateiformate, sowie Email-Service. Dieses Zusatzwerkzeug bietet u.a. folgende Vorteile:

- Einheitliche Editierumgebung auf nahezu allen, von PERMAS unterstützten Hardware-Plattformen.
- Nutzung von Funktionstasten und Numeric-Keypad anstelle von Control- und Escape-

Sequenzen.

- Kontextabhängige Help-Funktionen und Online-Zugriff auf die gesamte PERMAS-Dokumentation.
- das Hotline-Meldesystem OTRS für die Meldung von Anwenderproblemen per E-mail.

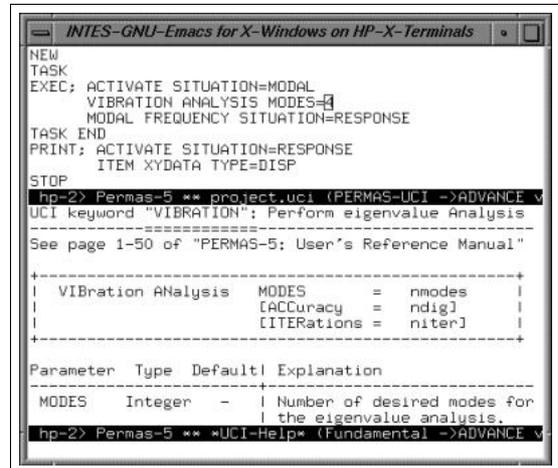


Abbildung 196: INTES-Emacs mit Kontext-Hilfe

Die PERMAS Tools stehen allen Anwendern von PERMAS zur Verfügung. INTES bietet dazu auch die Konfiguration und Anpassung an die Umgebung des Kunden an sowie die erforderliche Schulung.

Dokumentation

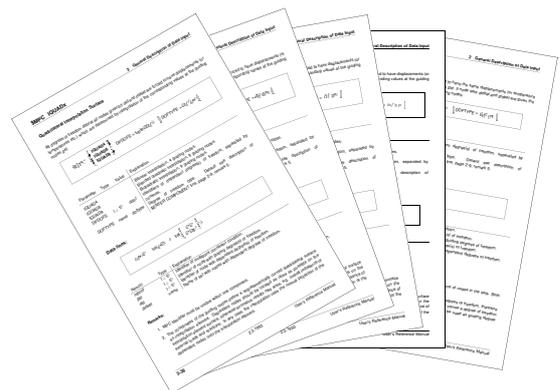


Abbildung 197: PERMAS Dokumentation

Parallel zur Entwicklung von PERMAS wird die Dokumentation stets aktuell geführt:

- Neben der Basisdokumentation
 - PERMAS Users Reference Manual,
 - PERMAS Examples Manual,

- *VisPER Users Manual*,
- *PERMAS Programmers Manual*,
- *PERMAS Installation Manual*,
- *PERMAS Tools User Manual*

stehen z.B. folgende Dokumente bereit:

- *ABAQUS Door Manual*,
- *I-DEAS Door Manual*,
- *MEDINA Door Manual*.
- *NASTRAN Door Manual*,
- *PATRAN Door Manual*.

- Übersichtlicher Aufbau, umfassendes Stichwortverzeichnis und Querverweise mit Seitenangabe (auch zwischen verschiedenen Dokumenten) sind dabei selbstverständlich.

Alle Manuals stehen als Online-Dokumentation in PDF-Dateien mit Querverweisen zur Verfügung.

Schulung

Für alle Anwendungsgebiete von PERMAS führt INTES Schulungskurse durch. Aufbauend auf einem einführenden Kurs über drei Tage zur linearen Statik mit Kontakt werden Ein- oder Zweitageskurse zu Themen wie Kontakt, Wärmeleitung, Dynamik, Optimierung, etc. durchgeführt.

Das jeweils aktuelle Programm kann über die INTES-Homepage eingesehen werden.

Weiterentwicklung

Das PERMAS- und VisPER-Entwicklungsteam arbeitet intensiv an der Erweiterung bestehender Funktionen sowie an der Implementation neuer Module, um den Anwendern auch weiterhin ein leistungsstarkes Werkzeug für die jeweils geforderten Berechnungen zur Verfügung zu stellen.

Dabei liegen die Schwerpunkte auf folgenden Entwicklungsrichtungen:

- **Integration in CAD/CAE**
Dabei geht es z.B. um eine einfachere Handhabung oder um automatische Hilfen bei der Modellbildung und der Auswertung.
- **Workflows im CAE**
Das umfasst die Analyse von Workflows, ih-

re Automatisierung und laufende Verbesserung. Ziel ist die einfache Anwendung selbst komplexer Berechnungsabläufe.

- **Komplexere Simulationen**
Hier wird vor allem an der Erweiterung und Vernetzung der Berechnungsfunktionen gearbeitet.
- **Kürzere Antwortzeiten**
Steigende Modellgrößen verlangen eine ständige Erhöhung der Effizienz der Software. Dies schließt neben algorithmischen Verbesserungen auch die Anpassung der Software an aktuelle Hardware-Entwicklungen ein.
- **Moderne Visualisierung**
Für Modelle und Ergebnisse werden moderne Verfahren und Werkzeuge für die Visualisierung entwickelt.
- **Simulationsgetriebener Entwurf**
um produktionsfähige Lösungen, z.B. für 3D Druck zu generieren.

Über die laufenden Entwicklungsprojekte und den aktuellen Stand der für die nächste Version von PERMAS und VisPER geplanten Erweiterungen informieren wir Sie gerne.

Weitere Informationen

Wenn Sie PERMAS näher kennenlernen wollen, stehen wir Ihnen jederzeit zur Verfügung. Gerne sind wir bereit, Ihren Bedarf hinsichtlich der FE-Analyse mit Ihnen zu erörtern und einen individuellen Lösungsvorschlag zu erarbeiten. Rufen Sie uns an!

Marketing:	Michael Klein
Telefon:	+49 (0)711 784 99 - 18
Fax:	+49 711 784 99 - 10
E-mail:	info@intes.de
WWW:	https://www.intes.de

Adresse:	INTES GmbH Breitwiesenstr. 28 D-70565 Stuttgart
----------	--

Index

- α -Methode, 106
- Übertragungsfunktionen, 22
- 10%-Regel, 103

- ABDG-Matrizen, 122
- Absolute Error Indicator, 67
- Absoluten Fehlerindikator, 67
- ACP, 109
- active set strategy, 117
- Adapted Convex Programming, 109
- Add&Replace Wizard, 43
- AEI, 67
- aktive Mengen-Strategie, 117
- aktive Regelung, 36
- aniisotrope Plastizität, 11
- Anisotropie, 67
- Antwort
 - im Zeitbereich, 101
 - stationäre, 100
- Antwortverhalten
 - im Frequenzbereich, 100
 - im Zeitbereich, 99
 - spektral, 103
 - zufallserregt, 103, 105
- Architektur
 - 64 Bit, 137
- Armstrong-Frederick, 90
- Assembled Situations, 23
- Assembly Situation, 11
- Ausformrichtungen, 114

- Balkenelemente
 - Standardquerschnitte, 66
- Basisvariable, 118
- Bauteilkopplung, 60
- Bauteilverbindung, 27
- Bayliss-Turkel, 104
- benutzerdefiniertes Materialverhalten, 89
- Beulen
 - linear, 92
 - nichtlinear, 88
- Bezugssystem
 - inertial, 32
 - mitdrehend, 32
- BFGS, 117
- Bogenlängenverfahren, 87
- Brake Squeal Wizard, 44
- Bremsenquietschen, 29

- CAD, 55
- Campbell, 32, 98
- CAMULTFRIC, 11
- Cauchy, 88
- CB-Kondensation, 97
- CCNG-Analyse, 26, 84, 88
- Center of Pressure, 83
- Co-Rotational, 87
- COF, 73
- Coleman-Transformation, 59
- CoMAC, 73
- Composites, 122
- CONLIN, 109
- Contact Locking, 26, 27, 83
- CONTLOCK, 11
- COP, 83
- Coriolis-Matrix, 32
- Coulomb, 80
- Coulombsches Reibgesetz, 80
- CQC, 103
- Craig-Bampton, 57, 97
 - gemischte Randbedingungen, 57, 97
- Craig-Bampton Reduktion, 106

- Dämpfung, 101
 - drehzahlabhängig, 32, 100
 - frequenzabhängig, 100
 - Material, 101
 - Matrix, 101
 - modal, 101
 - proportional, 101
 - Rayleigh, 101, 105
 - Struktur, 101
 - viskos, 101
- DAT, 55
- Design Constraint Linking, 108
- Design Exploration, 77
- Design Wizard, 44
- Dichtungselemente, 25, 83, 89
- Dimensionsoptimierung, 47, 108
- DiRect, 117
- Dividing Rectangles, 117
- Drucker-Prager, 88
- Druckmittelpunkt, 83
- dynamische Kondensation, 106

- effektive Massen, 97
- Eigenwerte
 - komplex, 98
 - reelle, 96
- eingefrorene Bereiche, 114

- Elektrostatik, 123
- Elementbibliothek, 64
- Elemente
 - Abstrahl-Randbedingung, 66
 - axialsymmetrisch, 66
 - Balken-, 65
 - Dichtung, 25
 - diskrete, 65
 - Fluid, 64
 - Fluid-Struktur-Kopplung, 66
 - Geometrie-, 66
 - halbunendliche, 66
 - Kontaktanalyse, 65
 - Last-, 65, 69
 - Membran-, 64
 - Oberflächenwellen, 66
 - Platten-, 65
 - Plot-, 66
 - Schalen-, 65
 - skalare, 65
 - Stab-, 64
 - Volumen-, 64
 - Wärmeübergang, 66, 93
- ELT, 122
- EMA, 128
- Engquist-Majda, 104
- Entwurfsrandbedingung, 114
- Erdbebenanalyse, 103
- Ergebnisse
 - Kombination, 73
 - Transformation, 73
 - Vergleich, 73
 - xy-Daten, 74
- Erweiterte Laminattheorie, 122
- exb, 128
- Experimentelle Modal-Analyse, 39
- Experimentellen Modal-Analyse, 73, 128
- externer Löser, 111
- Faserverbunde, 122
- Fast Fourier Transformation, 22
- fatigue
 - analysis, 121
 - high cycle, 121
- Fertigungsrandbedingungen, 114
- FFT, 22
- Fitting, 11
- Flächenbeschreibung, 60
- Floating-Lizenz, 137
- Fluidelemente, 64
- Form-Basisvektoren, 48, 108
- FORM/SORM, 119
- Formoptimierung, 48, 108
- FORMULA, 10
- Fourier, 68, 69
- Free Sizing, 116
- Freiform-Optimierung, 48
- Frequency Response, 100
- Frozen Regions, 114
- FUNCTION, 10
 - FORMULA, 10
 - INTEGRATE, 10
- Funktion
 - Entwurfsrandbedingung, 114
 - Grenzzustand, 118
 - Kontaktspalt, 80
 - mathematische, 68
 - Versagen, 118
- Gasket-Elemente, 83, 89
- GCA, 115
- GDC, 118
- GEOMETRY, 10
- GEOUP, 11
- Gießen, 89
- Glättung, 47, 115
- Global Convex Approximation, 115
- Global Design Centering, 118
- gnuplot, 70, 74
- grün, 2
- Grenzzustandsfunktion, 118
- große Dehnungen, 91
- GUI, 41
- Guyan, 57
- gzip, 128
- Hüllengenerierung, 47, 49, 115
- Haft- und Gleitreibung, 80
- Harmonic Balance Methode, 106
- HBM, 10
- HDF5, 71
- Herstellrandbedingungen, 47
- Hilber-Hughes-Taylor, 100, 105
- Hoffman, 122
- Hybride Geometrie, 49
- hyperelastisches Materialverhalten, 91
- HYST3, 11
- Hysterese, 106
- Inertia Relief, 21, 68, 79, 89, 97, 102, 109
- Inertialsystem, 32
- inkompatible Netze, 21
- INTEGRATE, 10
- Interpolationsgebiet, 62

- Karosserieberechnung, 21
- Kaskadenregler, 33
- Kirchhoff, 65
- Kompensationsfedern, 81
- komplexe Eigenwerte, 98
- Komponente, 57
- Kondensation, 26, 57, 97, 128
 - Craig-Bampton, 97
 - Craig-Bampton mit gemischten Randbedingungen, 97
 - dynamisch, 57, 97, 99, 128
 - statisch, 57, 97, 128
 - trocken, 26
 - verallgemeinert modal, 72, 97
- Konfiguration, 57
- Kontakt
 - Einfrieren, 26, 27, 30, 83
 - Locking, 27
 - Mehrgitter, 84
 - Status-Dateien, 26
 - Wizard, 52
- Kontakt-Wizard, 52
- Kontaktanalyse, 79
- Kontaktspaltfunktion, 80
- Kontaktstatus-Dateien, 26, 82
- Koordinatensystem
 - Lokal, 62
- Kopplung
 - Analysen, 75
 - CFD, 75
 - Flächen, 63
 - Volumen, 63
- kraftgeführte Kontakte, 81
- Kreiselmatrix, 32
- kritische Drehgeschwindigkeit, 32
- Kurzfaserwerkstoffe, 11, 89

- Laminate, 65
- Laminatoptimierung, 111, 116
- Lastkorrekturmatrix, 123
- Latin Hypercube Sampling, 77
- Layoutoptimierung, 112
- LDR, 117
- LHC, 77
- LIFE, 10
- Line of Action, 83
- Line Search, 87
- lineares Beulen, 92
- Linienbeschreibung, 60
- Lizenzmanager, 137
- Lochdetektion, 50

- Maßeinheiten, 74
- MAC, 73, 96
- Magnetostatik, 123
- Mapping der Temperaturen, 25
- Material
 - Drucker-Prager, 88
 - Eigenschaften, 67
 - Gusseisen, 90
 - Mohr-Coulomb, 88
 - Tresca, 88
 - viskoplastisch, 88
 - von Mises, 88
- Matrix
 - Coriolis, 32
 - Kreisel, 32
- Matrizenmodelle, 22, 72
- Maximale Wandstärke, 114
- maximale Wandstärke, 114
- Maxwell, 124
- MBC-Transformation, 59
- MBCB-Kondensation, 97
- Mehrkörpersimulation, 21
- Mehrziel-Optimierung, 109
- Message Tree, 45
- minimale Wandstärke, 114
- Mixed-Boundary Craig-Bampton, 97
- MKS, 21
- MLDR, 23, 98, 99
- MMO, 111
- Modalanalyse, 93, 96
- modale Anteilsfaktoren, 92, 102
- Model Updating, 24
- Modellverifikation, 69
- Mohr-Coulomb, 88
- Monte Carlo, 119
- Motorberechnung, 24
- MPC, 61, 62, 79, 127
 - allgemein, 63
 - Flächenkopplung, 63
 - Interpolationsgebiet, 62
 - Pressverbindung, 63
 - Starrkörper, 62
 - Volumenkopplung, 63
- DPSYS, 10
- RELDOF, 10
- MPC DPSYS, 10
- MPC REACTION, 11
- MpCCI, 16, 76, 132
- MS, 117
- Multi-Blade Coordinate Transformation, 59
- Multi-Level Dynamic Reduction, 23, 99

- Multi-Start-Verfahren, 117
- Multiaxialer Spannungszustand, 121
- Multimodale Optimierung, 111

- NAFEMS, 122
- Newmark, 100, 105, 106
 - β , 100, 105
- Newton, 117
- Newton-Raphson, 87, 89, 106
- nicht-parametrische Optimierung, 110
- Nodelock-Lizenz, 137
- Nullkraftfedern, 81

- OC, 109
- Optimalitätskriterien, 109
- Optimierung
 - ableitungsfrei, 117
 - Dimension, 108
 - Entwurfselemente, 66
 - Form, 108
 - Freiform, 108, 110
 - Frequenzgang, 108
 - global, 117
 - Kontaktdruck, 116, 117
 - Layout, 112
 - nicht-parametrisch, 110
 - Position, 108
 - Querschnitte, 108
 - Sicke, 108
 - Sizing, 108
 - Topologie, 112
 - Trust-Region, 116
- Optimierung
 - Laminat, 111, 116
- Optimierung für einen robusten Entwurf, 111
- Option COMPLEMENT, 80

- Parallelisierung, 16, 17, 95, 137
- Pareto, 109
- PCGen, 55
- PD, 115
- PERMAS Tools, 74
- PERMASgraph, 74, 138
- Pfadverfolgung, 106
- Plastizität
 - isotrop, 88
 - aniisotrop, 11
- Polygon-Reduktion, 47, 116
- Postprozessing, 45
- Power Spectral Density, 103
- Pressfit Wizard, 44
- Pressverbindung, 80, 84

- Primal-Dual Solution, 115
- Prony-Reihen, 103
- pyINTES, 138
- Python, 41, 75, 138

- Qietschgeräusche, 106
- Qualitätssicherung, 77

- Random Response, 103
- Rasselgeräusche, 106
- Rayleigh, 101, 105
- RBM-Assistent, 44, 81
- Regelelemente, 36
- Reibung
 - Coulomb, 80
- RELDof, 10
- Response Surface Methoden, 119
- Responsespektrum, 103
- Restart, 75
- robuster Entwurf, 37, 111
- rotierende Systeme, 31
- Rotordynamik, 32
- Rutherford-Boeing, 73

- Sampling, 77
- Sampling Wizard, 44
- Sandwichschalen, 65
- SBV, 48
- Schnittkräfte, 74
- Schnittstellen, 70
- Schraubenvorspannung, 81
- Schweißpunkt, 61
- SCP, 117
- SDM, 78
- Selbstkontakt, 79
- Sets
 - Elementsets, 67
 - Knotensets, 67
- Shape Basis Vectors, 48, 108
- Shermann-Morisson-Woodbury, 102
- Shift
 - dyn. Eigenwerte, 96
- Shift-Methode, 96
- Shift-Verfahren, 92
- Sichtbarkeitsfaktoren, 94
- Sickengenerierung, 24, 48, 108
- Simulation Data Management, 78
- simulationsbasierten Entwurf, 49
- Situation, 59
- SLP, 117
- Smooth Patch Recovery Methode, 67
- SMW, 102

- Spannungsgradienten, 67
- Spannungslupe, 26, 57, 83
- Spektraldichte, 103
- Spektrales Antwortverhalten, 103
- SPR-Spannungen, 67
- SQP, 117
- stationäre Antwort, 100
- statische Verschiebungsformen, 102, 105
- Steady-State Response, 22, 100
- Steifigkeit
 - drehzahlabhängig, 32, 100
 - Druck, 96
 - frequenzabhängig, 100
 - geometrisch, 96
 - konvektiv, 96
 - Schweißpunkt, 62
 - Zentrifugalfeld, 96
- STEP, 55
- STL, 116
- stochastische Berechnung, 118
- Strahlung, 94
- Submodeling, 57
- Submodell-Technik, 26, 57, 90
- Summationsregeln, 103
- Systemkern, 77
- Task-Scanner, 77
- Teilmodell-Analyse, 57, 83
- Teilstruktur-Wizard, 53
- Teilstrukturtechnik, 57, 59, 64, 77, 90, 106, 110, 113, 128
- Teilungsebene, 47, 114
- Temperaturfelder, 92
- Thomas, 89
- tied contact, 10
- Tooltips, 42
- Topologie-Optimierung, 112
- Transient Response, 99
- Tresca, 88
- Trimmed Body, 21
- Trust-Region-Verfahren, 116
- Tsai-Wu, 122
- UCI, 55
- Unterraumiteration, 96
- Variante, 58
- Variantenanalyse, 58
- verbundene Situationen, 23, 102
- Verfestigung
 - gemischt, 89
 - isotrop, 89
 - kinematisch, 89
 - nichtlinear kinematisch, 90
- Versagensfunktion, 38, 118
- Versagenskriterien, 111
- Versagenskriterien für Laminatschichten, 122
- Versagenswahrscheinlichkeit, 118
- Vertrauensregion-Verfahren, 116
- visko-elastischem Materialverhalten, 103
- VisPER, 5, 9, 13, 41
- Volumen-Schale-Anschluss, 63
- von Mises, 88
- Vorbeulverhalten, 92
- Vorspannungs-Wizard, 52
- Voxel, 50
- Wärmeübergangselemente, 93
- Wärmeleitung, 92
- Walzen, 89
- Werkzeugmaschine, 32
- Wirkungsrichtung, 83
- Wizard, 46, 47, 49, 52
 - Add&Replace, 43
 - Brake Squeal, 44
 - Design, 44
 - Dimensionsoptimierung, 47
 - Fluid-Struktur-Kopplung, 49
 - Formoptimierung, 48
 - Freiform-Optimierung, 48
 - Kontakt, 52
 - Pressfit, 44
 - Sampling, 44
 - Schraubenvorspannung, 52
 - Sickengenerierung, 48
 - Teilstrukturtechnik, 53
 - Topologie-Optimierung, 46
- WLIN, 117
- XML, 78
- Zienkiewicz, 67
- zufallserregte Schwingungen, 103, 105
- Zuverlässigkeitsanalyse, 118
- Zwangsbedingung
 - kinematisch, 62
- zyklische Symmetrie, 59

Kontakt:

Telefon: +49 (0)711 784 99 - 0

Fax: +49 711 784 99 - 10

E-mail: info@intes.deWWW: <https://www.intes.de>

Adresse: INTES GmbH

Breitwiesenstr. 28

D-70565 Stuttgart