

Pro/MECHANICA® verstehen lernen

Paul Kloninger

Pro/MECHANICA[®] verstehen lernen

ab Version Wildfire[®] 4.0

 Springer

Dipl.-Ing. Paul Kloninger
Pestalozzistr. 21
36137 Großenlüder
Deutschland
pkloninger@web.de

ISBN 978-3-540-89017-1

e-ISBN 978-3-540-89018-8

DOI 10.1007/978-3-540-89018-8

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 2009 Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk-sendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem Papier

9 8 7 6 5 4 3 2 1

springer.de

Vorwort

*„Man sollte alles so einfach wie möglich
sehen - aber auch nicht einfacher“.*

Albert Einstein

Dem Leser liegt hier ein Anwenderbuch für die Software MECHANICA vor. Im Gegensatz zu den theoretischen, wissenschaftlichen Werken finden sich in dieser Abhandlung nur einfache, in der Technik allgemein bekannte Formeln und Zusammenhänge. Weiterhin sucht man vergeblich nach einer beiliegenden CD-ROM, denn die Buchbeispiele sind mit wenigen Mausclicks aufgebaut. Die Vorgehensweise wird Schritt-für-Schritt erklärt und sehr detailliert mit Screenshots versehen, sodass der Anwender jederzeit das Buch als Nachschlagewerk verwenden kann. Zwecks der Übersichtlichkeit werden alle zitierten Menübefehle durch **Fettdruck** hervorgehoben, die Optionen und Schaltflächen in den entsprechend erscheinenden Definitionsfenstern zusätzlich in **<dreieckige Klammern>** genommen.

An dieser Stelle möchte ich mich bei den Mitarbeitern des Springer Verlags bedanken, die das Vertrauen in dieses Buchprojekt mit mir teilten. Ferner danke ich meinem langjährigen Arbeitgeber ibb Konstruktionsdienstleistungs GmbH, wo ich die Gelegenheit erhalten habe, MECHANICA zu erlernen und mich dafür zu begeistern.

Berlin, September 2008

Paul Kloninger

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
1 Methodik in MECHANICA	3
1.1 P-Methode	3
1.2 Vorgehensweise in MECHANICA	4
1.3 Integration in Pro/ENGINEER	6
1.4 Leistungsmerkmale	6
1.5 Plattformen für MECHANICA	7
1.6 Geometriebeschreibung	8
1.7 Plausibilitätsprüfung	9
1.8 Konvergenzmethoden in MECHANICA	9
1.9 Zusammenfassung Kapitel 1	10
Literaturverzeichnis	10
2 Methodik in Pro/ENGINEER	11
2.1 CAD-System Pro/ENGINEER	11
2.2 Arbeitsmodus in Pro/ENGINEER	12
2.3 Bedienoberfläche in Pro/ENGINEER	13
2.4 Zusammenfassung Kapitel 2	16
Literaturverzeichnis	16
3 Aufgabe: Darstellung des Ein-Massen-Schwingers	17
3.1 Einstieg in MECHANICA	17
3.2 Ersatzmodell	20
3.3 CAD-Modell	21
3.4 Statische Analyse	23
3.5 Modalanalyse	34
3.6 Dynamische Zeitanalyse	38
3.7 Dynamische Frequenzanalyse	47
3.8 Zusammenfassung Kapitel 3	53
Literaturverzeichnis	53

4 Aufgabe: Einfacher Träger als Balkenmodell	55
4.1 Aufgabenstellung Balkenmodell	55
4.2 Ersatzmodell	55
4.3 CAD-Modell	57
4.4 Statische Analyse	59
4.5 Zusammenfassung	82
Literaturverzeichnis	82
5 Aufgabe: Lochscheibe als ebener Spannungszustand	83
5.1 Aufgabenstellung Lochscheibe	83
5.2 Ersatzmodell	83
5.3 CAD-Modell	84
5.4 Statische Analyse	85
5.5 Zusammenfassung Kapitel 5	107
Literaturverzeichnis	107
6 Aufgabe: Dünnes Rohr als ebener Dehnungszustand	109
6.1 Aufgabenstellung dünnes Rohr	109
6.2 Ersatzmodell	109
6.3 CAD-Modell	110
6.4 Statische Analyse	111
6.5 Zusammenfassung Kapitel 6	122
Literaturverzeichnis	123
7 Aufgabe: Pressverband als 2D-Achsensymmetrie	125
7.1 Aufgabenstellung Pressverband	125
7.2 Ersatzmodell	125
7.3 CAD-Modell	127
7.4 Statische Analyse der Hohlwelle	128
7.5 Kontaktanalyse	135
7.6 Zusammenfassung Kapitel 7	153
Literaturverzeichnis	154
8 Aufgabe: Dünne Platte als Schalen- und Volumenmodell	155
8.1 Aufgabenstellung Kreisplatte	155
8.2 Ersatzmodell	155
8.3 CAD-Modell	156
8.4 Schalenmodell	157
8.5 Volumenmodell geometrisch nichtlinear	169
8.6 Zusammenfassung Kapitel 8	179
Literaturverzeichnis	179
9 Aufgabe: Knickstab als Instabilitätsproblem	181
9.1 Aufgabenbeschreibung Knickstab	181
9.2 Ersatzmodell	181

9.3	CAD-Modell	182
9.4	Statische Analyse	184
9.5	Beulanalyse	188
9.6	Zusammenfassung Kapitel 9.	194
	Literaturverzeichnis	195
10	Aufgabe: Wärmeleitstab in THERMAL.	197
10.1	Aufgabenbeschreibung Wärmeleitstab	197
10.2	Ersatzmodell	197
10.3	CAD-Modell	198
10.4	Stationäre Analyse.	200
10.5	Transiente Wärmeanalyse	205
10.6	Zusammenfassung Kapitel 10.	210
	Literaturverzeichnis	211
11	Zwei Aufgaben zur autodidaktischen Weiterbildung	213
11.1	Zwei-Massen-Schwinger	213
11.1.1	Ersatzmodell	213
11.1.2	CAD-Modell	214
11.1.3	FE-Modell in MECHANICA	215
11.1.4	Modalanalyse.	218
11.1.5	Dynamische Zeitanalyse	220
11.1.6	Ergebniskontrolle.	222
11.2	Flanschverschraubung.	223
11.2.1	Ersatzmodell	223
11.2.2	CAD-Modell	224
11.2.3	FE-Modell in MECHANICA	225
11.2.4	Erste Kontaktanalyse.	241
11.2.5	Zweite Kontaktanalyse	242
11.2.6	Endanalyse.	243
11.3	Allgemeine Tipps	245
	Literaturverzeichnis	247
12	Stichwortverzeichnis.	249

Auflistung verwendeter Formelzeichen und Abkürzungen

A	1. Koeffizient der homogenen Lösung, Stabquerschnitt
B	2. Koeffizient der homogenen Lösung, Balkenbreite
D	Nenndurchmesser
D_{na}	Außendurchmesser der Nabe
D_{ni}	Innendurchmesser der Hohlwelle
E	Elastizitätsmodul
E_{FEDER}	gespeicherte Federenergie
F	Kraft
F_k	Knicklast
\vec{F}	Kraftvektor
G	Gravitation
\vec{G}	Gravitationsvektor
H	Balkentiefe
I	Flächenträgheitsmoment
L	Balkenlänge, Stablänge
L_0	Federlänge ungespannt
M_B	Biegemoment
P_{Fuge}	Flächenpressung im Pressverband
P_i	Innendruck
Q	Wärmemenge
\dot{Q}	Wärmestrom
R	mittlerer Rohrradius, Plattenradius
T	Temperatur
ΔT	Temperaturdifferenz
$W_{\text{GRAVITATION}}$	Arbeit der Schwerkraft
X, Y, Z	kartesische Koordinatenachsen
a	Beschleunigung
c	spezifische Wärmekapazität
d	Dämpfungskoeffizient
f_{max}	maximale Durchbiegung
g	Erdbeschleunigung
k	Federsteifigkeit

m	Masse
p	Druck
t	Zeit, Scheibendicke, Rohrdicke, Plattendicke
Δt	Aufheizdauer
x, y	Verschiebung
$\dot{x}, \dot{y}, \dot{y}'$	Geschwindigkeit
\ddot{x}, \ddot{y}	Beschleunigung
α_k	Formzahl
γ	Auslenkung
λ	Wärmeleitzahl
σ_0	Nennspannung
σ_t	Tangentialspannung
σ_x	Kerbspannung in X-Richtung
$\sigma_{x\max}$	maximale Kerbspannung in X-Richtung
ω	Eigenkreisfrequenz
ω_0	Eigenfrequenz
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
Abb.	Abbildung
Abschn.	Abschnitt
Aufl.	Auflage
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa (etwa)
d. h.	das heißt
etc.	et cetera (und so weiter)
evtl.	eventuell
GB	Gigabyte
gem.	gemäß
ggf.	gegebenenfalls
HTML	textbasierte Internet-Programmiersprache
inkl.	inklusive
IPE	Stahlträger als I-Profil mit parallelen Flanschflächen
JPEG	Grafikformat
Kap.	Kapitel
MS EXCEL	Tabellenkalkulationsprogramm von Microsoft
Nr.	Nummer
PC	Personal Computer
STRG	Steuerungstaste
TIFF	Grafikformat
usw.	und so weiter
u. A.	unter Anderem
u. U.	unter Umständen
vs.	versus (gegen)
z. B.	zum Beispiel

Einleitung

Das Tool MECHANICA ist eine bekannte und verbreitete Software von Parametric Technology Corporation (PTC). Heutzutage benutzt man die Funktionalität überwiegend in Verbindung mit Pro/ENGINEER, einem der weltweit führenden CAD-Programme (CAD = Computer Aided Design). Das war nicht immer so, da MECHANICA ursprünglich unabhängig von Pro/ENGINEER entwickelt und später in die CAD-Umgebung integriert wurde. Dennoch gibt es noch immer einige Spezialisten, die MECHANICA losgelöst von CAD einsetzen. Diese Arbeitsweise gehört keineswegs zum Schwerpunkt der Abhandlung, denn die Zielgruppe entspricht nicht dem Buchkonzept.

Die vorliegende Arbeit richtet sich in erster Linie an die Studenten aber auch Ingenieure der Fachbereiche Maschinenbau, Mechatronik, Bauingenieurwesen etc. Das sind hauptsächlich (angehende) Konstrukteure, die neben der schöpferischen Tätigkeit der Produktentwicklung bestimmte Eigenschaften ihrer Konstruktionen virtuell untersuchen möchten. Darin liegt der Kern der Motivation für dieses Buch: Der Autor möchte damit erreichen, dass möglichst vielen Anwendern der Zugang zu MECHANICA geöffnet und erleichtert wird.

Im Rahmen der Hochschulausbildung hat man sehr wahrscheinlich einen CAD-Lehrgang belegt, vielleicht war das sogar Pro/ENGINEER oder CATIA, um hier die wichtigsten Vertreter der CAD-Welt zu erwähnen. Diese Kurse haben erfahrungsgemäß leider keinen hohen Anspruch an die Qualität und Inhalte. Erst im Beruf sind dann teure Schulungen von entsprechenden Anbietern richtig effektiv. In selteneren Fällen gibt es einen Lehrgang in einem FEM-Tool (FEM = Finite-Elemente-Methode), wie z. B. MECHANICA. Danach erhält man in den meisten Fällen eine Schulungsunterlage, die ein späteres Auffrischen von dem gelernten aber vergessenen Wissen ermöglicht. Für viele sind das somit die einzigen Nachschlagewerke, da die heute vorhandene Literatur zu MECHANICA recht dürftig ist.

Insgesamt haben wir in der Bundesrepublik Deutschland eine große Anzahl an Anwendern und Interessenten von Pro/ENGINEER und MECHANICA. Davon gibt es nur ganz wenige Ingenieure, die als Berechnungsspezialisten zu 50-100 % mit

MECHANICA arbeiten. Die breite Masse nutzt das Programm eher gelegentlich. Das hat folglich zur Konsequenz, dass unqualifizierte und teilweise einfach falsche Berechnungsergebnisse präsentiert und verwertet werden. Natürlich wird von dem Anwender nicht verlangt, dass er alle mathematischen Zusammenhänge und Hintergründe kennt, Differenzialgleichungen löst oder Ähnliches. Dazu sind die meisten Ingenieure auch nicht ohne Weiteres in der Lage. Dennoch ist das Kennen einiger grundlegenden Sachverhalte und Gesetzmäßigkeiten unabdingbar, ohne das gewisse Verständnis von der Problematik ist kein Arbeiten mit FEM zulässig und möglich.

Im ersten Kapitel des Buches werden die wichtigsten Merkmale und Regeln beim Arbeiten mit MECHANICA erklärt. Vor allem sollen die besonderen herausragenden Eigenschaften des Programms erläutert und die entsprechenden Konsequenzen dargelegt werden. Im zweiten Abschnitt der Abhandlung erfolgt eine Kurzvorstellung des CAD-Systems Pro/ENGINEER. Ab dem dritten Kapitel wird anhand von einfachen Beispielen das Basiswissen in MECHANICA gebildet und damit die Voraussetzung für das spätere Arbeiten mit dem Programm geschaffen. Einige der Beispiele setzen die Funktionalitäten (ab) der Version Wildfire 4.0 voraus.

Im Laufe der stetigen Entwicklung des CAD-Systems Pro/ENGINEER wurden unterschiedliche Arten der Implementierung von MECHANICA vorgenommen. Von den ursprünglichen vier optionalen Modulen STRUCTURE, THERMAL, VIBRATION und MOTION sind heute nur zwei Basisarten der Lizenzierung möglich. Die einfache Option MECHANICA hat einige wesentliche Einschränkungen im Funktionsumfang, sodass die vollständige Abarbeitung der Buchbeispiele erst mit der erweiterten Lizenz Advanced MECHANICA möglich ist.

1 Methodik in MECHANICA

1.1 P-Methode

MECHANICA zählt im Allgemeinen zu einem von vielen FEM-Programmen, ähnlich wie ANSYS, MARC, NASTRAN, ABAQUS etc. Die Anwendung der FEM setzt Kompetenz und Erfahrung voraus, denn die Programme rechnen alles, was formal richtig erscheint. Dabei sind die Problemstellungen aus der Praxis meist durch keine exakte Lösung abgesichert. Vor allem ist die Größe des Fehlers unbekannt. Das Vertrauen in die Ergebnisse der FEM ist somit schwer zu gewinnen.

In der FEM erfolgt die diskrete Beschreibung eines Kontinuums, indem die Geometrie mittels vieler kleiner Elemente idealisiert wird. Setzt man voraus, dass der Anwender alle sonstigen Annahmen und Randbedingungen (größte Fehlerquelle) korrekt getroffen hat, dann ist die Genauigkeit der Ergebnisse nur von der Elementzahl abhängig. Je feiner das Netz, umso genauer kann die Geometrie beschrieben werden. Aus dem Grund werden diese Programme als h-Versionen (h-relativer Elementdurchmesser) bezeichnet. Das Beherrschen solcher Systeme bedarf unbedingt eines Spezialisten, da allein eine unpassende oder zu grobe Vernetzung eine verlässliche Ergebnisbewertung ausschließt.

MECHANICA basiert im Gegensatz zu h-Versionen auf der sogenannten p-Methode. Das Elementverhalten wird mit Polynomfunktionen höherer Ordnung approximiert. Dabei nimmt die Genauigkeit eines Elementes zu, zum einen durch mehr Freiheitsgrade in den Knoten und zum anderen durch die exaktere geometrische Randanpassung (Abb. 1-01).

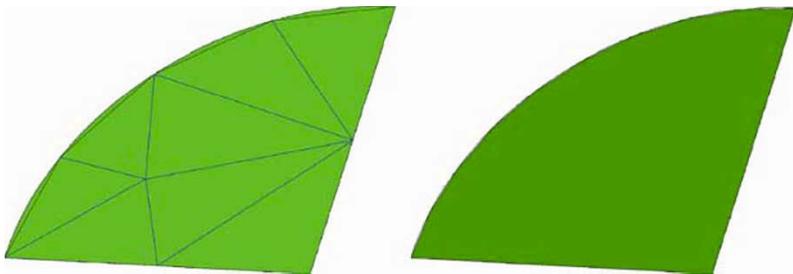


Abb. 1-01: Geometrieberandung der h- vs. p-Dreiecksvernetzung. Die Abbildung links zeigt eine h-Vernetzung mit 8 Dreieckselementen, die Randanpassung erfolgt polygonartig. Das rechte Bild stellt ein einziges p-Dreieckselement dar, die Krümmung wird exakt abgebildet.

Der mathematische Hintergrund der p-Elemente ist bei dem einfachen Lösungsansatz hilfreich, wenn man voraussetzt, dass die Funktion Genauigkeit über

die Anzahl der Freiheitsgrade gegen die exakte Lösung des FE-Modells monoton konvergiert. Somit kann die Ergebnisgenauigkeit theoretisch allein durch die Erhöhung der Polynomgrade erreicht werden, das vernetzte Modell wird dabei nicht verändert.

Die analoge Vorgehensweise bei der h-Methode erfordert hingegen eine schrittweise höhere Diskretisierung, mit anderen Worten eine feinere Vernetzung. Die Netzverfeinerung sollte dann so lange erfolgen, bis das zuletzt berechnete Ergebnis keinen Unterschied mehr zur vorherigen Auswertung aufweist und damit gegen einen bestimmten Wert konvergiert. In der Praxis werden meistens aus Zeit- und Kostengründen lediglich eins bis maximal zwei solche Iterationsschritte durchgeführt.

Die schematische Darstellung in der Abb. 1-01 verdeutlicht die Vernetzungsstrategie in MECHANICA. Der Vorteil liegt in der einfacheren und robusteren Modellierung, außerdem hilft die eingebaute Konvergenz der p-Elemente, die Unsicherheiten bei der Netzgenerierung wegzunehmen. Dies ist in einer h-Version besonders kritisch, dort muss der Anwender selbst die Konvergenzbetrachtung aufstellen und bewerten.

Um die quantitativen Unterschiede zwischen der h- und der p-Vernetzung aufzuzeigen, ist in der Abb. 1-02 beispielhaft die vernetzte Struktur einer Viertelplatte dargestellt, standardmäßig mit h- sowie p-Tetraedern vernetzt.

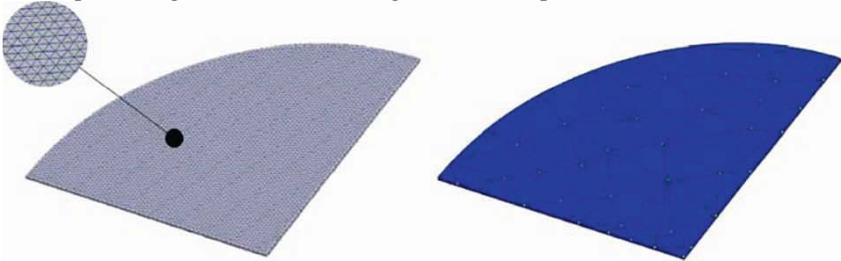


Abb. 1-02: Viertelplatte als feines h-Netz vs. grobes p-Netz. Die Netzstruktur links ist sehr engmaschig und typisch für die h-Methode. Auf der rechten Seite ebenfalls typisch die relativ grobe p-Vernetzung.

Die Anzahl der erforderlichen Volumenelemente kann bei der p-Methode oft hundertfach kleiner sein als bei einer h-Version.

1.2 Vorgehensweise in MECHANICA

FEM-Programme nutzen im Prinzip den gleichen Formalismus. Typischerweise laufen die Bearbeitungsschritte folgendermaßen ab:

- Geometrieaufbereitung in CAD: Vorarbeiten für die FE-Analyse
- Wechsel zum FEM-Programm: Direkt oder mittels einer Schnittstelle
- Bildung des FE-Modells: Preprozessor – intern oder extern
- Rechenlauf: Solver – intern oder extern
- Auswertung der Ergebnisse: Postprozessor – intern oder extern
- Plausibilitätskontrolle

Die wesentliche Aufgabe des Preprozessors ist die Bildung eines berechenbaren FE-Modells inkl. Materialeigenschaften, Randbedingungen, Lasten, Vernetzung etc. Damit entsteht ein System von Differentialgleichungen, das von einem numerischen Gleichungslöser, auch Solver genannt, näherungsweise aufgelöst wird. Anschließend werden sekundäre Ergebnisse wie z. B. die Spannungen ausgerechnet. Für die Ausgabe der berechneten Größen wird ein sogenannter Postprozessor verwendet, der die Darstellung von selbsterklärenden Farbfüllbildern, kurz Farbplots, oder auch Graphen ermöglicht.

Grundsätzlich anders wird die Vorgehensweise in MECHANICA definiert:

1. Geometrie aufbauen
2. Eigenschaften zuweisen
3. Randbedingungen definieren
4. Lasten aufbringen
5. Elemente auswählen und vernetzen
6. Analyse definieren
7. Rechenlauf durchführen
8. Ergebnisse überprüfen
9. Designparameter definieren
10. Sensitivitätsstudien durchführen
11. Optimierung
12. Geometrie aktualisieren

Hierbei wird ausdrücklich nicht mehr auf die Begriffe Preprozessor, Solver, Postprozessor usw. hingewiesen. Die Integration von MECHANICA in CAD hat hier den wesentlichen Vorteil, dass keine Schnittstellen notwendig sind. Die Geometriebeschreibung wird zwar im Hintergrund zwischen CAD und FEM ständig übersetzt, das geschieht jedoch unter der gleichen Bedienoberfläche und nahezu unbemerkt für den Anwender.

1.3 Integration in Pro/ENGINEER

Die Integration von MECHANICA in Pro/ENGINEER bietet eine Vielzahl an Vorteilen. In erster Linie entfällt die Datenkonvertierung, die ansonsten bei der Nutzung eines eigenständigen FEM-Programms erforderlich wäre. Das spart meist enorm viel Zeit, insbesondere bei Iterationsschleifen, wenn aufgrund von Konstruktionsänderungen eine erneute Simulation verlangt wird. Weiterhin wird das gleiche Datenmodell von Pro/ENGINEER verwendet, d. h. alle Simulationsdaten inkl. Modelleinheiten und Materialeigenschaften werden in der Konstruktionsdatei gespeichert. Die Ausnahme bildet die Netzdatei, die ggf. vor der Analyse extra abgespeichert wird. Die Netzdaten können sehr groß werden und würden die Performance erheblich ausbremsen.

Innerhalb der Architektur von Pro/ENGINEER kommuniziert MECHANICA erfolgreich mit anderen optionalen Tools wie BMX (Behavioral Modeling Extension) bei Konstruktionsstudien oder MDO (Mechanism Dynamics Option) bei dem Import von dynamischen Lasten usw. Weiterhin ist MECHANICA mit erweiterten Modellierung-Tools wie vereinfachten Darstellungen, Vererbungs-Features und Verschmelzungen von Baugruppen kompatibel. Besonders hervorzuheben ist die parametrische Variation der Geometrie und der Eigenschaften im Simulationsmodell. Damit sind Optimierungs- und Sensitivitätsstudien möglich, die Aufschluss über die unterschiedlichen Konstruktionstypen geben.

1.4 Leistungsmerkmale

Standardmäßig bieten alle FEM-Programme die Durchführung einer linearen Verformungs- und Spannungsanalyse. Der Aufbau erfolgt dann meist modular, indem weitere Optionen zur Berechnung beispielsweise dynamisch belasteter Strukturen, thermischer Aufgaben oder Strömungsprobleme etc. dazu kommen.

MECHANICA beinhaltet insgesamt zwei Module: STRUCTURE und THERMAL. In STRUCTURE können strukturmechanische Probleme idealisiert und gelöst werden, THERMAL ist hingegen für Wärmeanalysen zuständig. Die beiden Optionen sind miteinander verknüpft, sodass beispielsweise eine zum bestimmten Zeitpunkt in THERMAL berechnete Temperaturverteilung als thermische Last in STRUCTURE übernommen werden kann. Weiterhin ist indirekt die Option VIBRATION verfügbar (in STRUCTURE enthalten), die eine dynamische Untersuchung von schwingungsbelasteten Strukturen sowie die Durchführung von Erdbebenanalysen erlaubt.

In MECHANICA sind traditionsgemäß parametrische Sensitivitäts- und Optimierungsstudien implementiert. Diese Analysetypen erlauben wie schon oben angedeutet eine automatische Strukturuntersuchung auf der Basis einer Parametervariation. Eine derartige Assoziativität zwischen MECHANICA und der

Repräsentation aus Pro/ENGINEER ermöglicht beispielsweise eine automatische Gewichtsoptimierung der Struktur innerhalb gewisser Parametergrenzen, wobei bestimmte Bedingungen (z. B. Einhalten der zulässigen Spannung) erfüllt werden müssen. Diese Funktionalität ist zwecks der Verkaufsargumentation äußerst wirkungsvoll, das praktische Nutzen ist jedoch eingeschränkt, da hierbei extreme Anforderungen an Ressourcen und Rechenzeiten gestellt werden. In der Version Wildfire 4.0 bietet MECHANICA weiterhin folgende Analysearten (Tabelle 1-01):

Tabelle 1-01: Analysearten in MECHANICA

Modul	Analysetypen
STRUCTURE	lineare statische Analyse geometrisch nichtlineare statische Analyse mit großen Verformungen nichtlineare statische Analyse mit hyperelastischen Materialeigenschaften statische Kontaktanalyse (nichtlinear) statische Vorspannungsanalyse lineare Beulanalyse (Beullastfaktoren) Modalanalyse Modalanalyse mit Vorspannung Ermüdungsanalyse (optional, eigene Lizenz erforderlich)
THERMAL	stationäre Wärmeanalyse transiente Wärmeanalyse
VIBRATION	dynamische Zeitanalyse
(Teil von STRUCTURE)	dynamische Schwingungsanalyse stochastische Antwortanalyse Erdbebenanalyse

Die Lizenz Pro/ENGINEER *Advanced MECHANICA* schließt alle oben beschriebenen Analysearten ein, bis auf die Ermüdungsanalysen. Diese Funktionalität ist separat unter der Bezeichnung *Fatigue Advisor* erhältlich. Weiterhin beinhaltet MECHANICA einen FEM-Modus für die Integration einer h-Version wie ANSYS oder NASTRAN.

1.5 Plattformen für MECHANICA

Aktuell werden ab Wildfire 4.0 die Betriebssysteme Microsoft Windows XP oder Vista, UNIX Solaris oder HP-UX unterstützt. Die älteren Windows-Versionen wie Windows 2000 sind nur bis Wildfire 3.0 kompatibel. Zwischenzeitlich gab es Versuche, die PTC Produkte auch unter LINUX zu betreiben, für MECHANICA bisher leider ohne Erfolg.

Bei dem Vergleich von Windows XP bietet die 64-bit Variante eindeutige Vorteile, da man einen praktisch unbegrenzten Arbeitsspeicher adressieren kann, bei 32-bit Windows XP ist bei maximal 3 GB Schluss. Diese Grenze kann bei einem großen Volumenmodell durchaus erreicht werden.

1.6 Geometriebeschreibung

Für eine FE-Analyse wird die zu untersuchende Geometrie in CAD erstellt, sofern die Komplexität des echten Bauteils berücksichtigt werden soll. In manchen Fällen kann die Struktur direkt in FEM aufgebaut werden, z. B. wird ein Fachwerk oft mit Balken- und Stabelementen idealisiert. Für diese Idealisierung sind keine 3D-Daten erforderlich, auch die Massen können als einzelne Massenpunkte abgebildet sein usw. Grundsätzlich geht man aber davon aus, dass die Teile und die Baugruppen aus einem 3D CAD-Programm stammen und somit in digitaler Form vorliegen.

Die Geometrie wird dann von dem FEM-Programm eingelesen. In MECHANICA erfolgt der Geometrietransfer schnittstellenfrei und unbemerkt für den Anwender. Fehlerhafte 3D-Daten sind allerdings immer noch ein Thema. Im Entwicklungsprozess sind manchmal „Schnellschüsse“ gefordert, die später nicht unbedingt bereinigt werden. Eine gute Kontrolle der Geometrie ist eine Oberflächenkopie von dem gesamten Teil, die assoziativ in ein leeres FE-Bauteil übertragen wird. Wenn sich aus dieser geschlossenen Fläche ein Volumen bilden lässt, dann ist das schon eine beinahe Erfolgsgarantie für das Volumenmodell in MECHANICA. Dabei spielt auch die Genauigkeit der Modellierung eine große Rolle. Im Maschinenbau hat sich die absolute Genauigkeit von mindestens 0,01 mm bewährt.

Die Erstellung eines Volumenmodells ist die häufigste Art der Geometrieüberführung in MECHANICA. Zum einen erreicht man damit weitestgehend realistische Ergebnisse, zum anderen sind nur so einige Optionen im Hinblick auf die Beulproblematik, geometrische Nichtlinearität, Hyperelastizität etc. verfügbar. Alternativ zu 3D-Modellen gibt es folgende 2D-Idealisierungen:

- ebener Dehnungszustand
- ebener Spannungszustand
- 2D-Achsensymmetrie

Unabhängig von dem Problemtyp muss die Physik der Aufgabe richtig verstanden worden sein, um die Erfassung und Abbildung eines Problems zu ermöglichen.

1.7 Plausibilitätsprüfung

MECHANICA verfügt über einen leistungsfähigen Postprozessor, der eine Ergebnisausgabe typischerweise als Farbplot oder Graph ermöglicht. Diese Ergebnisdarstellungen lassen sich ausgezeichnet aufbereiten, z. B. können die Farbübergänge verwischt, die Bildauflösung extrem hoch eingestellt werden usw. Dies trübt den kritischen Blick für mögliche Fehler. Außerdem sind hier fehlende theoretische Kenntnisse häufig die Ursache von Fehlentwicklungen. Streng genommen sollte der Anwender sein Modell permanent iterativ überprüfen, um mögliche Fehler auszuschließen. Die ingenieurmäßige Sorgfalt, die sogar „penibel“ sein darf, entscheidet über die Genauigkeit der Simulation.

Die Simulation rentiert sich erst, wenn der Anwender nicht nur die Erfassung und Abbildung eines Problems sicher gelernt hat, sondern auch die Ergebnisinterpretation beherrscht.

1.8 Konvergenzmethoden in MECHANICA

MECHANICA nutzt zwei unterschiedliche Konvergenzarten: Adaptive Einschnitt-Konvergenz und die adaptive Mehrfachkonvergenz. Weiterhin hat man die Möglichkeit für eine Schnellanalyse ohne Konvergenz, dabei werden alle Elementkanten mit der Polynomordnung 3 gerechnet. Zum Vergleich: Das würde einem h-Element mit zwei Zwischenknoten pro Elementkante entsprechen. Diese grobe Analyseart ist nur vorab zur Kontrolle des FE-Modells geeignet, um beispielsweise Fehler im Modell auszuschließen.

Adaptive Einschnitt-Konvergenz nutzt standardmäßig den direkten Block-Gleichungslöser (löst alle Gleichungen gleichzeitig im Block auf), der das Modell in zwei Schritten rechnet. Im ersten Durchlauf erhalten alle Elementkanten die Polynomordnung 3, daraufhin erfolgt im zweiten Schritt die adaptive Konvergenz. Adaptiv deshalb, weil die Elementkanten unterschiedliche, nach entsprechenden Konvergenzkriterien festgelegte Polynomgrade erhalten. Dabei wird die lokale Schätzung des Spannungsfehlers ermittelt, der zur Bewertung der Ergebnisqualität genutzt wird. Diese Methode ist schnell und für die meisten Problemstellungen gut geeignet. Nachteilig ist die insgesamt mangelnde Qualitätskontrolle für die Berechnungsergebnisse.

Die adaptive Mehrfachkonvergenz ist im Vergleich zur Einschnitt-Konvergenz deutlich aufwändiger. Der Solver startet standardmäßig mit der Polynomordnung 1 für alle Kanten, im zweiten Schritt werden alle Elementkanten mit der Polynomordnung 2 gerechnet. Ab da beginnt die adaptive Konvergenz, d. h. der Solver erhöht die Polynomgrade der Kanten so lange, bis die Konvergenzkriterien erfüllt werden oder der maximal gesetzter Polynomgrad (bis 9 möglich) erreicht wird. Der Anwender hat eine Vielzahl an Möglichkeiten, die Mehrfachkonvergenz

zu steuern. Man kann beispielsweise die Polynomgrade einschränken, dass der Solver gleich bei der Ordnung 2 beginnt, aber nur bis zum Polynomgrad 7 rechnen darf. Weiterhin können eigene Konvergenzkriterien definiert, die Konvergenztoleranz (in %) verschärft werden usw.

Nach jedem Rechenschritt der Mehrfachkonvergenz werden die Ergebnisse berechnet und gespeichert, damit hat man nicht nur das Endergebnis, sondern auch alle Zwischenresultate. Das ermöglicht vor allem die Auswertung entsprechender Konvergenzkurven, anhand deren man die Ergebnisgüte bewerten kann.

Für den Anwender ist es wichtig zu wissen, dass ein grobes p-Netz u. U. erst bei hohen Polynomgraden konvergiert. Im Falle von Singularitäten (Steifigkeitssprünge, Punktlasten etc.) ist überhaupt keine Konvergenz an den fraglichen Stellen möglich. Somit kann eine Netzverfeinerung sehr hilfreich sein, um eine schnelle Konvergenz zu erreichen, auf Kosten der Elementzahl natürlich, dabei sollten die evtl. vorhandenen Singularitäten isoliert werden.

1.9 Zusammenfassung Kapitel 1

Advanced MECHANICA stellt ein preiswertes, leistungsfähiges und äußerst zuverlässiges Werkzeug dar, um das Verhalten von Teilen und Baugruppen unter thermischen sowie strukturmechanischen Lasten virtuell zu simulieren. Als herausragendes Merkmal wird die eingebaute Konvergenzkontrolle der p-Methode unterstrichen, die den Anwender von den Unsicherheiten bei der Netzgenerierung entlastet, denn die Ergebnisqualität wird bei den meisten Problemstellungen nicht über die Netzverfeinerung erreicht. Die Problematik von unpassenden Elementtypen stellt sich prinzipiell nicht.

Literaturverzeichnis

- Klein B (1999) FEM Grundlagen und Anwendungen der Finite-Elemente-Methode, 3 Aufl, VIEWEG, ISBN 3-528-25125-5
- Parametric Technology Corporation (2008) Pro/ENGINEER Wildfire 4.0 MECHANICA, Help Topic Collection
- Schmidt A (1995) Finite-Elemente-Analyse - aus der Sicht des Anwenders, Mitteilung Nr 20, Institut für Maschinenwesen, TU Clausthal, ISSN 0947-2274

2 Methodik in Pro/ENGINEER

2.1 CAD-System Pro/ENGINEER

Pro/ENGINEER ist seit vielen Jahren eines der weltweit führenden CAD-Systeme, insbesondere im Bereich des Maschinenbaus. Dieser Tatsache liegt die Leistungsfähigkeit der Software zugrunde. Wo manche CAD-Programme an ihre Grenzen stoßen, kann sich Pro/ENGINEER noch richtig entfalten. Die Datenrepräsentation bietet die Möglichkeit, mathematisch exakte komplexeste Geometrien zu erzeugen, die vor allem dann auch dynamisch beeinflussbar bleiben. Dabei erhält ein Modell aus Pro/ENGINEER eine hierarchische Entstehungsgeschichte. Diese wiederum kann zu jedem Zeitpunkt verändert werden, ohne dass ein grundlegend neuer Geometrieaufbau erfolgen muss. Die Modelle sind durchgängig assoziativ. Dies bildet die Grundlage für ein Datenmodell, das sich über alle Produktlebensphasen erstreckt. Die Datenrepräsentation beinhaltet somit nicht nur die Geometriedaten, bildliche und zeichnerische Darstellungen, Berechnungsmodelle, digitale Fertigungsdaten, Kinematikdefinitionen etc. Diese Auflistung kann noch lange fortgesetzt werden, und es kommen immer neue Modellmerkmale hinzu.

Die Bedeutung des Produktdatenmodells von Pro/ENGINEER wird erst im Zusammenspiel mit einem PDM-System (PDM = Produktdatenmanagement) wie z. B. Windchill von PTC deutlich. Im Rahmen der Globalisierung sind viele Unternehmen weltweit vertreten. Die allgemeine Kommunikation, aber auch der Datenaustausch oder Katalogrecherchen erfolgen über das Internet. Entscheidend ist dabei die zentrale Datenverwaltung mittels Datenbankmanagement. Das PDM-System gewährleistet hier die Datensicherheit und sorgt für die Qualitätssicherung, eine Datenredundanz wird vermieden. Die Effizienz steigt dabei enorm und die Kosten werden gesenkt. Dennoch ist der Nachteil der Komplexität von solchen Systemen nicht zu vernachlässigen. Die meist individuell kundenspezifisch konfigurierten Systeme werden träge und manchmal wird ein Upgrade zu einer echten Herausforderung. Die Kosten für die entsprechende Unterstützung durch Fachkräfte können ebenfalls erheblich ansteigen.

Weiterhin bezeichnen wir Pro/ENGINEER als einen universellen Hybrid-Modellierer, um damit zum Ausdruck zu bringen, dass Pro/ENGINEER sowohl im Bereich der Volumenerzeugung stark ist als auch die Flächenmethodik und Berandungstopologien beherrscht. Wir möchten hier nicht behaupten, dass Pro/ENGINEER das „beste“ CAD-Programm darstellt, es gibt einige gleichwertige Systeme auf dem Markt. Dennoch wurde seitens PTC ein Grundstein für die dauerhafte Konkurrenzfähigkeit gesetzt, indem die Wildfire Generationen eingeführt wurden. Die ursprünglich umständliche, auf mathematisch-deduktive Herangehensweise ausgerichtete Handhabung wurde nun modern, intuitiv und interaktiv. Damit ist die Software leichter zu erlernen

geworden, ohne den bewährten Programmkern von Pro/ENGINEER strukturell zu verändern.

Die Computertechnologie wird ebenfalls immer leistungsfähiger. Das beeinflusst die CAD-Systeme allgemein äußerst positiv. Bis vor kurzem waren nur spezielle Rechner mit besonders guter Performance für Pro/ENGINEER geeignet. Mittlerweile bedeutet die Anschaffung von CAD-Rechnern keine größere Investition mehr. Weiterhin bietet die zukunftssträchtige 64-bit Technologie bisweilen ungeahnte Möglichkeiten, z. B. können damit auf einem PC größere Baugruppen mit mehreren Tausend Einzelteilen stabil gehandhabt und verarbeitet werden.

2.2 Arbeitsmodus in Pro/ENGINEER

Im Rahmen dieser Abhandlung kann die umfangreiche Funktionalität von Pro/ENGINEER nicht erfasst werden. Gezeigt wird lediglich das Prinzip der Konstruktionsmethodik (Wildfire 3.0 bzw. 4.0), um dem Anwender den Zusammenhang zwischen Pro/ENGINEER und MECHANICA darzulegen.

Typischerweise erfolgt die Konstruktion in Pro/ENGINEER in folgenden Arbeitsmodi ab:

- Modellierung der Einzelteile einer Konstruktion (Teilemodus)
- Zusammensetzen der Bauteile zu einer Baugruppe (Baugruppenmodus)
- Erstellen von technischen Zeichnungen (Zeichnungsmodus), die von den Einzelteilen und Baugruppen abgeleitet werden

Dem entsprechend unterscheiden sich die Dateierweiterungen:

- Teilemodus: xxxxx.prt (PART)
- Baugruppenmodus: xxxxx.asm (ASSEMBLY)
- Zeichnungsmodus: xxxxx.drw (DRAWING)

Prinzipiell gibt es eine andere alternative Konstruktionsmethode, das sogenannte Top-Down-Design. Hierbei entstehen die Einzelteile aus einem Skelett-part der übergeordneten Baugruppe. Die Veränderungen im Skelettmodell beeinflussen alle damit verbundenen Teile und Unterbaugruppen.

Zwischen Pro/ENGINEER-Objekten besteht ansonsten in der Regel die bi-direktionale Assoziativität. Das bedeutet, dass sich zwei Objekte gegenseitig beeinflussen, z. B. das Modell und die daraus abgeleitete Zeichnung. Modellmodifikationen bewirken entsprechend Zeichnungsänderungen und umgekehrt. Für MECHANICA sind natürlich nur Teile und Baugruppen von Bedeutung, der Zeichnungsmodus von Pro/ENGINEER hat keine Relevanz.

Viele Funktionen sind natürlich als Icon verfügbar (Abb. 2-01), außerdem kann der Anwender die Palette der Schaltflächen selbst erweitern oder benutzerdefinierte Makros erstellen, um eine Menüfolge z. B. mit einem eigenen Icon oder mit einem Tastaturkürzel auszuführen. In der Tabelle 2-01 sind die standardmäßig vorhandenen Tastaturkürzel aufgelistet.

Tabelle 2-01: Funktionen der Tastaturkürzel

Funktion in Pro/ENGINEER	Tastaturkürzel
Neue Datei erstellen	STRG + N
Vorhandene Datei öffnen	STRG + O
Aktuelle Datei speichern	STRG + S
Regenerieren (Aktualisieren)	STRG + G
Modell in Standardorientierung setzen	STRG + D
Suchen	STRG + F
Bildaufbau	STRG + R
Kopieren	STRG + C
Einfügen	STRG + V
Löschen	Entf
Letzte Aktion widerrufen	STRG + Z
Noch einmal ausführen	STRG + Y

Weiterhin ist unbedingt eine 3-Tasten-Maus erforderlich, um effizient mit Pro/ENGINEER arbeiten zu können. Dabei wird an der Stelle der mittleren Maustaste ein Scrollrad bevorzugt, um ein Objekt im Arbeitsfenster zu zoomen. Nachfolgend werden die wesentlichen Mausfunktionen im 3D-Modus von Pro/ENGINEER aufgelistet, damit auch ein Neueinsteiger die Übungen in diesem Buch effektiv bearbeiten kann:

- Objekt im Arbeitfenster drehen:  → Mittlere Maustaste gedrückt halten und die Maus bewegen
- Objekt im Arbeitfenster zoomen: STRG +  → STRG-Taste und die mittlere Maustaste gedrückt halten und die Maus nach oben bzw. nach unten bewegen, noch einfacher - das Mousrad scrollen
- Objekt im Arbeitfenster verschieben: UMSCHALT +  → UMSCHALT-Taste und die mittlere Maustaste gedrückt halten und die Maus bewegen
- Objekt im Arbeitsfenster um die Normalrichtung drehen: STRG +  → STRG-Taste und die mittlere Maustaste gedrückt halten und die Maus nach links bzw. nach rechts bewegen

Die ersten beiden Funktionen erlauben eine schnelle Ein-Tasten-Bedienung mit der mittleren Maustaste (Scrollrad). Für das Feinzoomen wird zusätzlich zum Scrollen die UMSCHALT-Taste gedrückt, für das Grobzoomen – die STRG-Taste.

Bei größeren Baugruppen ist der Einbau von neuen Einzelteilen oft umständlich und unübersichtlich, z. B. wenn eine kleine Schraube in einer Motorbaugruppe platziert werden soll. In diesem Fall hat der Anwender folgende Mausfunktionen, um die Komponente während des Einbaus zu orientieren:

- Komponente auf eine Referenz ziehen: STRG + ALT +  → STRG-Taste, ALT-Taste sowie die linke Maustaste gedrückt halten und die Maus bewegen
- Komponente drehen: STRG + ALT +  → STRG-Taste, ALT-Taste sowie die mittlere Maustaste gedrückt halten und die Maus bewegen
- Komponente verschieben: STRG + ALT +  → STRG-Taste, ALT-Taste sowie die rechte Maustaste gedrückt halten und die Maus bewegen

Abschließend werden die Steuerungsmöglichkeiten der Maus aufgelistet:

- Hervorgehobene Geometrie wählen:  → linke Maustaste klicken
- Verborgene Geometrie mit Abfrage hervorheben:  → rechte Maustaste solange klicken, bis das gewünschte Objekt hervorgehoben wird
- Objekte zur Auswahl hinzufügen: STRG +  → STRG-Taste gedrückt halten und mit der linken Maustaste anklicken
- Sätze von Flächen oder Kanten erstellen: UMSCHALT +  → UMSCHALT-Taste gedrückt halten und mit der linken Maustaste anklicken, z. B. eine Kante der Kette mit der linken Maustaste anklicken, dann die UMSCHALT-Taste gedrückt halten und die nächste Kante der Kette anklicken
- Auswahl revidieren:  → linke Maustaste neben dem Objekt (im Hintergrund) klicken

Die Philosophie der modernen interaktiven Steuerung ab der Version Pro/ENGINEER Wildfire basiert auf der bekannten Tatsache, dass die Geschwindigkeit beim Geometrieaufbau steigt, wenn die Aktionen an bereits ausgewählten Objekten vorgenommen werden. Die älteren Pro/ENGINEER Versionen nutzten das umgekehrte Modellierungsprinzip. Nach einer Reihe von Befehlen, mit denen der

Anwender seine Konstruktionsabsicht festlegen musste, erfolgte die Auswahl des Objekts. Daraufhin war u. U. die geplante Operation aufgrund geometrischer Widersprüche nicht möglich, was einen erheblichen Zeitverlust bedeutete. Wesentlich schneller ist die Objektauswahl mit der Maus, wonach ausschließlich die geometrisch möglichen Aktionen aktiv werden.

Diese Merkmale steigern die Effizienz des Konstruktionsprozesses und erleichtern vor allem das Erlernen des CAD-Programms.

2.4 Zusammenfassung Kapitel 2

Pro/ENGINEER ist ein zukunftssicheres CAD-System. Die höchstmögliche geometrische Komplexität, verbunden mit relativ einfacher Handhabung gewährleisten eine zuverlässige Kundentreue. Die flexiblen modularen Optionen bieten jedem Unternehmen eine für seine Bedürfnisse maßgeschneiderte Lösung.

Weiterhin gilt Pro/ENGINEER als ein universeller Hybrid-Modellierer, der sowohl im Bereich der Volumenerzeugung als auch im Flächenaufbau stark ist. Die Vielseitigkeit des CAD-Programms bedeutet für MECHANICA immense Vorteile. Der Geometrietransfer erfolgt nicht nur schnittstellenfrei, die Assoziativität der Pro/ENGINEER-Objekte bleibt auch in MECHANICA voll erhalten.

Literaturverzeichnis

Parametric Technology Corporation (2008) Pro/ENGINEER Wildfire 4.0, Help Topic Collection

3 Aufgabe: Darstellung des Ein-Massen-Schwingers

3.1 Einstieg in MECHANICA

Die nachfolgenden Aufgaben sind derart zusammengestellt, dass der Anwender anhand von einfachsten Beispielen die Methodik sowie die Grundlagen von MECHANICA versteht. Zu den Aufgaben sind teilweise Handrechnungen beigefügt, wobei keine komplizierten Formeln verwendet werden, sondern nur die im allgemeinen Maschinenbau üblichen und bekannten Zusammenhänge.

Die CAD-Genauigkeit in Pro/ENGINEER wird hier mit 0,001 mm absolut (Abb. 3-01) gesetzt. Das gewährleistet eine in den meisten Fällen ausreichend feine Auflösung des FE-Modells. Im Teilemodus erreicht man diese Einstellung über das Menü **Editieren**→**Setup...**, daraufhin erscheint der Menü-Manager (Abb. 3-01):



Abb. 3-01: Menü-Manager im Teilemodus von Pro/ENGINEER. Aus dem Menü-Manager „TEIL EINRICHTEN“ werden die für MECHANICA wesentlichen Einstellungen bzgl. Material, Genauigkeit und Einheiten vorgenommen.

Neben der Genauigkeit ist das System der Einheiten besonders wichtig: In Deutschland hat sich für MECHANICA das System [mmNs] durchgesetzt (Abb.