

VEREIN
DEUTSCHER
INGENIEURE

3-D-Produktmodellierung
Technische und organisatorische Voraussetzungen
Verfahren, Werkzeuge und Anwendungen
Wirtschaftlicher Einsatz in der Praxis

VDI 2209

3D product modelling
Technical and organizational requirements
Procedures, tools, and applications
Cost-effective practical use

Ausg. deutsch/englisch
Issue German/English

Die deutsche Version dieser Richtlinie ist verbindlich.

The German version of this guideline shall be taken as authoritative. No guarantee can be given with respect to the English translation.

Inhalt	Seite	Contents	Page
Vorbemerkung	4	Preliminary note	4
Einleitung	4	Introduction	4
1 Anwendungsbereich	5	1 Scope	5
1.1 Modellieren im Entwicklungsprozess.	8	1.1 Modelling in the development process	8
1.2 Zusammenhang der Modellier- möglichkeiten	13	1.2 Connections between modelling possibilities	13
1.3 Aufbau der vorliegenden Richtlinie.	15	1.3 Structure of the present guideline	15
1.4 Zusammenhang mit anderen VDI-Richtlinien	16	1.4 Relation to other VDI guidelines	16
2 Voraussetzungen	17	2 Requirements	17
2.1 Organisatorisches Umfeld.	17	2.1 Organizational environment	17
2.1.1 Aufbauorganisation	17	2.1.1 Organizational structure	17
2.1.2 Ablauforganisation	18	2.1.2 Operational organization.	18
2.2 Informationstechnisches Umfeld	19	2.2 Information technology environment.	19
2.2.1 Hardware	19	2.2.1 Hardware.	19
2.2.2 Software	20	2.2.2 Software	20
2.3 Qualifizierung	22	2.3 Qualifications	22
3 Übersicht über die 3-D-Produktmodellierung	22	3 Overview of 3D product modelling	22
3.1 Modellarten	23	3.1 Types of model	23
3.2 Direkte Modellierung mit Geometrieelementen	26	3.2 Direct modelling with geometric elements	26
3.3 Parametrische Modellierung (Parametrik)	27	3.3 Parametric modelling (parametrics)	27
3.4 Featurebasierte Modellierung	29	3.4 Feature-based modelling	29
3.5 Chronologie und Erzeugnisstruktur in der Modellierung	31	3.5 Chronology and product structure in modelling	31
3.6 Standardteile aus Katalogen	33	3.6 Standard parts from catalogues.	33
3.7 Simultaneous Engineering und Concurrent Engineering.	33	3.7 Simultaneous engineering and concurrent engineering	33
3.8 Aspekte der Wissensverarbeitung	35	3.8 Aspects of knowledge processing	35

VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb

VDI-Handbuch Produktentwicklung und Konstruktion

	Seite		Page
4 Modellierungsverfahren und -werkzeuge	37	4 Modelling procedures and tools	37
4.1 Direkte Modellierung	38	4.1 Direct modelling	38
4.2 Parametrische Modellierung	38	4.2 Parametric modelling	38
4.2.1 Parameterarten	39	4.2.1 Types of parameter	39
4.2.2 Beziehungsarten	41	4.2.2 Types of relation	41
4.2.3 Arbeitstechniken	41	4.2.3 Working techniques	41
4.2.4 Wissensbasierte Parametrik	43	4.2.4 Knowledge-based parametrics	43
4.3 Featurebasierte Modellierung	44	4.3 Feature-based modelling	44
4.3.1 Modellieren mit Formfeatures	46	4.3.1 Modelling with form features	46
4.3.2 Anwendungsspezifische Features (user-defined features)	47	4.3.2 User-defined features	47
4.3.3 Features mit nicht geometrischen Eigenschaften	49	4.3.3 Features with non-geometric properties	49
4.3.4 Erweiterte Konzepte	52	4.3.4 Extended concepts	52
4.4 Chronologiebasierte Modellierung	53	4.4 Chronology-based modelling	53
4.5 Standardteile aus Katalogen	56	4.5 Standard parts from catalogues	56
5 Integration der 3-D-Produktmodellierung in den Konstruktionsprozess	59	5 Integration of 3D product modelling into the design process	59
5.1 Grundlegende Modellierungsstrategien	59	5.1 Basic modelling strategies	59
5.2 Vorbereitende Arbeiten (Planung der 3-D-Produktmodellierung)	61	5.2 Preparatory work (planning the 3D product modelling)	61
5.3 Bauräume und Beziehungen	63	5.3 Installation spaces and relations	63
5.3.1 Funktion von Bauräumen	63	5.3.1 Function of installation spaces	63
5.3.2 Beziehungen und Referenzen	65	5.3.2 Relations and references	65
5.4 Erzeugnisorientierte Modellierung (top-down)	65	5.4 Product-oriented modelling (top-down)	65
5.5 Einzelteilorientierte Modellierung (bottom-up)	67	5.5 Individual-part-oriented modelling (bottom-up)	67
5.5.1 Allgemeine Vorgehensweisen bei der Einzelteilmodellierung	68	5.5.1 General procedures in individual-part modelling	68
5.5.2 Komplexe Einzelteile	71	5.5.2 Complex individual parts	71
5.6 Erzeugnisorientierte gegenüber bauteil- orientierter Modellierung (top-down vs. bottom-up)	74	5.6 Product-oriented vs. component-oriented modelling (top-down vs. bottom-up)	74
5.7 Modellierungstechniken	83	5.7 Modelling techniques	83
5.7.1 Modellierungsformen bezüglich Konstruktionsarten	84	5.7.1 Modelling forms as relating to design types	84
5.7.2 Erstellen und Aufbereiten des 3-D-Produktmodells für ein einzelnes Bauteil	85	5.7.2 Creating and preparing the 3D product model for an individual component	85
5.7.3 Eingliedern des Bauteils in die Erzeugnisstruktur	86	5.7.3 Incorporating the component into the product structure	86
5.7.4 Parametrische Modellierung	89	5.7.4 Parametric modelling	89
5.7.5 Featurebasierte Modellierung	90	5.7.5 Feature-based modelling	90
5.8 Modellierung von außen nach innen	97	5.8 Modelling from the outside in	97
5.9 Modellierung von innen nach außen	98	5.9 Modelling from the inside out	98
6 Modellverwendung	99	6 Making use of models	99
6.1 Voraussetzungen	99	6.1 Requirements	99
6.2 Toleranzsimulation	101	6.2 Tolerance simulation	101
6.3 Ableiten von Fertigungsunterlagen	102	6.3 Derivation of production documents	102
6.4 Animation und Visualisierung	106	6.4 Animation and visualization	106
6.5 Berechnung und Simulation	106	6.5 Calculation and simulation	106
6.5.1 Analytische Berechnungen	108	6.5.1 Analytic calculations	108

	Seite		Page
6.5.2 FEM-Berechnungen	108	6.5.2 FEM calculations	108
6.5.3 Kinematik und Kinetik.	112	6.5.3 Kinematics and kinetics	112
6.5.4 Digital Mock-Up (DMU)	114	6.5.4 Digital mock-up (DMU).	114
6.6 Prototyping	115	6.6 Prototyping	115
6.6.1 Rapid Prototyping	115	6.6.1 Rapid prototyping	115
6.6.2 Rapid Tooling	116	6.6.2 Rapid tooling	116
6.7 Virtuelle Realität	116	6.7 Virtual reality.	116
6.8 Datenaustausch	119	6.8 Data exchange	119
7 Dokumentation	121	7 Documentation.	121
7.1 Produkt-/Modelldokumentation	121	7.1 Product/model documentation	121
7.2 Dokumentation des Modellierungsprozesses	122	7.2 Documentation of the modelling process	122
7.3 Datenverwaltung	123	7.3 Data management	123
8 Nutzenbetrachtung.	126	8 Consideration of benefits	126
8.1 Grundlagen	127	8.1 Basic principles	127
8.1.1 Zeiteinsparungen.	127	8.1.1 Time savings.	127
8.1.2 Direkt beeinflussbare Kosten in der Konstruktion	127	8.1.2 Directly influenceable costs in design	127
8.1.3 Auslastungsgrad des 3-D-CAD-Systems.	128	8.1.3 Percentage utilization of the 3D CAD system	128
8.1.4 Durchdringungsgrad einer 3-D-CAD-Anwendung.	129	8.1.4 Degree of penetration of a 3D CAD application.	129
8.2 Ermittlung der direkt quantifizierbaren Nutzen	129	8.2 Determination of the directly quantifiable benefits	129
8.2.1 Einsparung durch Verkürzung der Durchlaufzeit	129	8.2.1 Savings from reducing the lead time	129
8.2.2 Einsparung durch Verringerung von Schnittstellenfehlern.	129	8.2.2 Savings due to reductions in interface errors.	129
8.2.3 Einsparung durch Verringerung von Fehlleistungen in Fertigung und Montage	130	8.2.3 Savings by reduction of malperformance in production and assembly	130
8.3 Schwer quantifizierbare Nutzen	131	8.3 Benefits which are hard to quantify	131
8.4 Nicht quantifizierbare Nutzen	132	8.4 Non-quantifiable benefits	132
8.5 Praxisbeispiele	132	8.5 Practical examples	132
8.5.1 Einsparung durch Verringerung von Fehlleistungen in der Produktentwicklung	132	8.5.1 Savings by reduction of malperformance in production and assembly	132
8.5.2 Einsparung von Entwicklungszeit bei einer Gusskonstruktion	133	8.5.2 Savings in development time for a casting design	133
8.5.3 Vorteile bei der Gusskonstruktion im Änderungsfall	133	8.5.3 Advantages in casting design in the case of modifications	133
8.5.4 Einsparungen in der Prozesskette Modellbau	134	8.5.4 Savings in the model-construction process chain	134
8.5.5 Einsparungen in der Prozesskette FEM	135	8.5.5 Savings in the process chain FEM	135
8.5.6 Einsparungen im Gesamtprozess Konstruktion – Modellbauer – FEM-Analyse	137	8.5.6 Savings in the complete design – model-maker – FEM analysis process.	137
8.5.7 Einsparungen durch Rapid Prototyping.	137	8.5.7 Savings due to rapid prototyping	137
8.5.8 Einsparungen bei der Gussimulation.	138	8.5.8 Savings in casting simulation	138

	Seite
9 Empfehlungen für die Praxis	139
9.1 3-D-CAD-Einführung und -Organisation	139
9.2 Modellierungsstrategien	140
9.2.1 Vorbereitende Arbeiten	140
9.2.2 Zusammenhang der Modellier- möglichkeiten und -techniken	142
9.2.3 Strukturierungsmöglichkeiten	144
9.3 Verwendung parametrischer und featurebasierter 3-D-CAD-Modelle	145
9.4 Checklisten für die Überprüfung der Modellkonsistenz	148
9.5 Unterstützungsmöglichkeiten.	150
Glossar	151
Schrifttum	165

	Page
9 Practical recommendations	139
9.1 3D CAD introduction and organization	139
9.2 Modelling strategies	140
9.2.1 Preparatory work	140
9.2.2 Relationship between modelling possibilities and techniques	142
9.2.3 Structuring possibilities	144
9.3 Use of parametric and feature-based 3D CAD models	145
9.4 Checklists for checking model consistency	148
9.5 Support possibilities	150
Glossary	151
Bibliography	165

Vorbemerkung

Der Inhalt dieser Richtlinie ist entstanden unter Beachtung der Vorgaben und Empfehlungen der Richtlinie VDI 1000.

Alle Rechte, insbesondere die des Nachdrucks, der Fotokopie, der elektronischen Verwendung und der Übersetzung, jeweils auszugsweise oder vollständig, sind vorbehalten.

Die Nutzung dieser VDI-Richtlinie ist unter Wahrung des Urheberrechts und unter Beachtung der Lizenzbedingungen (www.vdi-richtlinien.de), die in den VDI-Merkblättern geregelt sind, möglich.

Allen, die ehrenamtlich an der Erarbeitung dieser VDI-Richtlinie mitgewirkt haben, sei gedankt.

Einleitung

Das Werkzeug CAD (Computer-Aided Design, rechnerunterstützte Konstruktion) war Mitte der Siebzigerjahre des zwanzigsten Jahrhunderts erstmals in Europa verfügbar. Zunächst – in Deutschland etwa bis in die Mitte der Neunzigerjahre – waren die 2-D-CAD-Anwendungen gegenüber den 3-D-Anwendungen statistisch deutlich in der Mehrheit (etwa 85 % zu 15 % [66]).

Nur auf verschiedenen Spezialgebieten wurde, wenn überhaupt, mit 3-D-CAD gearbeitet – vor allem in solchen Anwendungsgebieten, die mit geometrisch und/oder strukturell komplexen Produkten und den zu ihrer Herstellung benötigten Technologien zu tun haben (z.B. Karosseriebau, Flugzeugbau, Anlagenbau, Formen- und Werkzeugbau).

Im letzten Jahrzehnt des zwanzigsten Jahrhunderts kam dann eine breite Bewegung des Umstiegs von

Preliminary note

The content of this guideline has been developed in strict accordance with the requirements and recommendations of the guideline VDI 1000.

All rights are reserved, including those of reprinting, reproduction (photocopying, micro copying), storage in data processing systems and translation, either of the full text or of extracts.

The use of this guideline without infringement of copyright is permitted subject to the licensing conditions specified in the VDI notices (www.vdi-richtlinien.de).

We wish to express our gratitude to all honorary contributors to this guideline.

Introduction

CAD (computer-aided design) first became available in Europe during the mid-1970s. Initially – in Germany roughly up until the mid-1990s – 2D CAD applications were considerably more widespread than 3D applications (by 85 % to 15 % [66]).

Designers only worked with 3D CAD, if at all, in a number of specialized fields – primarily in areas of application involving geometrically and/or structurally complex products and the technologies required for manufacturing these products (for example, vehicle body construction, aircraft construction, plant and equipment manufacturing, tool- and die-making).

In the 1990s a changeover from 2D to 3D CAD got underway [72; 73; 75] across all industries and fields

2-D- auf 3-D-CAD-Systeme in Gang [72; 73; 75], die noch heute anhält – quer durch alle Branchen und Anwendungsgebiete. In einer Umfrage des VDMA im Jahr 2002 wurde festgestellt, dass 79 % der Befragten bereits 3-D-CAD zur Produktmodellierung einsetzen. Bei 77 % wurden parallel noch 2-D-Systeme verwendet. Ebenfalls 77 % der Befragten setzten CAD-Teilebibliotheken ein, 44 % FEM-Systeme. EDM/PDM-Systeme zur Verwaltung der Produktdaten kamen bei 33 % zum Einsatz, Systeme des Projektmanagements bei 35 %. Eigene Umfragen der Verfasser dieser Richtlinie im Jahr 1999 ergaben, dass bereits 25 % der befragten (meist mittelständischen) Unternehmen ausschließlich 3-D-CAD einsetzen, weitere 35 % zum Teil mit einem 3-D-Werkzeug arbeiteten und nur noch 32 % sich ausschließlich auf den zweidimensionalen Bereich beschränkten.

Auf der einen Seite hängt dies mit den Fortschritten der CAD-Technologie selbst zusammen: Die Systeme werden immer leistungsfähiger (z.B. Möglichkeit der Volumenmodellierung praktisch als Standard) und sind einfacher zu bedienen bei tendenziell immer noch sinkenden Preisen.

Auf der anderen Seite sind 3-D-CAD-Systeme Voraussetzung für die Nutzung einer Reihe von neuen Funktionen und Technologien und für die Umsetzung weitergehender Maßnahmen zur Daten- und Funktionsintegration im Produktentstehungsprozess insgesamt.

1 Anwendungsbereich

Immer mehr (häufig größere) Kunden verlangen von ihren Zulieferern nicht mehr Produktzeichnungen oder 2-D-CAD-Dateien, sondern 3-D-Produktmodelle, die in den eigenen (3-D-)Systemen weiterverarbeitet werden können. In solchen Fällen ist der Einsatz eines 3-D-CAD-Systems zur Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit unerlässlich.

Die wichtigsten Vorteile eines 3-D-CAD-Systems gegenüber einem 2-D-System sind:

- vollständigere Produktmodelle
- weniger einzeln zu erstellende und zu verwaltende Dokumente, da aus den 3-D-Produktmodellen viele Unterlagen (teil-)automatisch abgeleitet werden können (Zeichnungen, Stücklisten, Arbeitspläne, Montage- und Bedienungsanleitungen, Ersatzteilkataloge)
- frühes Erkennen und Vermeiden von funktionalen, fertigungstechnischen und anderen Problemen, dadurch weniger Optimierungszyklen im Produktentwicklungsprozess

of application – and is still in progress today. In a survey conducted by the VDMA in 2002 it emerged that 79 % of those asked were already using 3D CAD for product modelling while with 77 % 2D systems were still being used in parallel. 77 % of those asked were using CAD parts libraries, 44 % FEM systems. EDM/PDM systems for managing the product data were in service with 33 % and project management systems with 35 %. Polls conducted in 1999 by the authors of the present guideline indicated that as many as 25 % of the companies questioned (in most cases medium-sized) used 3D CAD exclusively, another 35 % used a 3D tool in some cases and only 32 % were still working exclusively in two dimensions.

On the one hand this has to do with the advances in CAD technology itself. Systems are becoming more and more powerful (for example, solid modelling is virtually a standard feature) and are easier to use while the trend in prices is still downward.

On the other hand, 3D CAD systems are a requirement for using a series of new functions and techniques and for implementing further measures in data and functional integration in the product creation process as a whole.

1 Scope

More and more customers (and frequently relatively major customers) are no longer demanding product drawings or 2D CAD files from their suppliers but rather 3D product models which they can then work on further in their own (3D) systems. In such cases the use of a 3D CAD system can be essential if competitiveness is to be retained.

The most important advantages a 3D CAD system can offer over a 2D system are:

- more complete product models
- fewer documents which need to be created and managed individually, because a large number of documents can be generated (semi-)automatically from the 3D product models (such as drawings, bills of material, operation sheets, assembly and operating instructions, spare parts catalogues)
- early detection and prevention of functional, manufacturing and other problems, resulting in fewer optimization cycles in the product development process