

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