

Schritte zu den methodischen Grundlagen des 3D-CAD-Modellierens

Das Buch, das ich schreiben wollte, würde einen anderen Blickwinkel haben als die CAD-Fachbücher, die ich bislang kannte. Dass ich aber inhaltlich bei den methodischen Grundlagen des 3D-CAD Modellierens landen würde, war überhaupt nicht klar. Diese Geschichte will ich erzählen.

Prägend für die Bearbeitung von Konstruktionsaufgaben sind häufige Entscheidungen. Für jede konstruktive Aufgabenstellung sind grundsätzlich viele Lösungsansätze denkbar, um die geforderte Funktion sicher zu stellen¹. Um den optimalen Ansatz einzugrenzen ist die Anwendung von Konstruktionsmethoden nützlich: Diese unterstützen die Klärung der Aufgabenstellung, verkleinern den Lösungsraum, machen Entscheidungen nachvollziehbar und dokumentieren diese. Beispiele für Konstruktionsmethoden sind: Funktionsstruktur, Morphologischer Kasten und Nutzwertanalyse².

Bei der Erstellung des 3D-CAD-Modells stellt sich die Frage, welche Methoden hierbei zur Anwendung kommen. Vielen Anwendern fällt auf, dass 3D-CAD-Modelle ein Verhalten besitzen: Bei Änderungen reagiert das Modell unerwartet, mit einem oft unerwünschten Ergebnis. Um den Fehler zu korrigieren, muss das Modell repariert werden. Dabei beobachte ich in der Praxis, dass viele Anwender nur begrenzte Anstrengungen unternehmen, die Ursachen dieser Probleme systematisch zu verstehen und ihre Modelle so zu gestalten, dass derartige Effekte vermieden oder besser beherrscht werden können. Offensichtlich bleiben früh eingeübte Routinen unverändert, das vorrangige Ziel ist die konsistente Darstellung der Konstruktion auf dem Bildschirm. Es ist überraschend, dass die Akzeptanz für Regeln und Methoden in der 3D-CAD Anwendung gering ist. Modelle könnten folgende Anforderungen erfüllen: Änderungsstabil, konsistente Modell Orientierung und Positionierung im Raum, benutzerfreundliche Handhabung, die Wiederverwendung vorhandener Informationen, u.v.m. Das sind objektive Merkmale für Modellqualität und Anwendungseffizienz.

¹ Die Gründe für die Varianz der Konzepte, der Gestaltung und der Bauteil-Dimensionierung sind die Ausbildung des Konstrukteurs, seine Erfahrung und Kreativität, sein räumliches Vorstellungsvermögen, und dessen Hartnäckigkeit bei der Optimierung des Designs.

² Siehe auch: Konstruktionslehre, Methoden und Anwendungen; Pahl, Beitz; Springer-Verlag Berlin

Die Überzeugung, dass Methoden den Modellierungsprozess vereinfachen, motivierte mich dazu, Regeln und Methoden für effizientes Modellieren zu identifizieren, zu erarbeiten und festzuhalten. Die These ist, dass deren Anwendung eine hohe Modellqualität kennzeichnen. Inhaltliche Schwerpunkte waren die Bedeutung des Ursprungssystems, Ableitungen, das Wiederverwenden von Parametern, die Definition von Bewegungsstellungen und der Top-down Ansatz. Im Vordergrund stand dabei nicht die Funktionsweise einzelner INVENTOR Befehle (also das „wie“), sondern deren Vor- und Nachteile, Möglichkeiten und Grenzen. Zur Untersuchung dieser Gesichtspunkte wurden CAD-Experimente mit den jeweiligen INVENTOR-Features durchgeführt. Das ist die Idee meines ersten Buches **Merkmale effizienten Modellierens**³. Insgesamt sind hier 54 Regeln zur Verbesserung der Modellqualität und der Effizienz beim Modellieren formuliert.

Bei der Nachbetrachtung dieses Buches sind mir aber folgende Punkte aufgefallen:

1. Eine Sammlung von Regeln und Merkmalen ist noch keine Methode.
2. Und damit bleibt auch die Antwort auf die Frage offen, was unter einer strukturierten Vorgehensweise konkret zu verstehen ist (Das ist die verbreitete Forderung klassischer Schulungsliteratur).

Damit ist ein methodischer Ansatz zur zuverlässigen Sicherstellung einer reproduzierbar hohen Modellqualität noch nicht erkennbar. Die Idee ist, ein methodischer Ansatz müsste sich als eine Folge logischer Arbeitsschritte darstellen lassen. Die VDI-Richtlinie 2221⁴ beschreibt ein Modell der Produktentwicklung, das hier als Vorlage dienen kann. Die Arbeitsschritte sind hier: Klären der Aufgabenstellung, Ermitteln der Funktionsstruktur, Suche nach Lösungsprinzipien, Bewerten von Lösungskonzepten, etc. Dieses Schema ist allgemein gültig, also branchenunabhängig (Nebenbei: Meine Texte beziehen sich nicht auf eine bestimmte INVENTOR Version).

(Anmerkung: Für die 3D-Produktmodellierung wurde eine VDI-Richtlinie veröffentlicht⁵: Zwar finden sich hier nützliche Empfehlungen für die Praxis, ein methodischer Ansatz ist allerdings nicht erkennbar.)

³ Das Buch ist seit September 2026 nicht mehr lieferbar.

⁴ VDI 2221, Entwicklung technischer Produkte und Systeme

⁵ VDI 2209, 3-D-Produktmodellierung – Technische und organisatorische Voraussetzungen – Verfahren, Werkzeug und Anwendungen – Wirtschaftlicher Einsatz in der Praxis.

Die entscheidende Überlegung zur Formulierung eines methodischen Ansatzes war die These, dass die Qualität eines 3D-CAD-Modelles in der frühen Modellierungsphase bestimmt wird. Grundlegende Entscheidungen zu diesem Zeitpunkt beeinflussen den gesamten weiteren Modellierungsprozess. Ein Gedankenschritt weiter folgt die Erkenntnis: Ja, es gibt einen Moment, der **allen** 3D-CAD-Modellen gemeinsam ist, eben die frühe Modellierungsphase. Das ist die Voraussetzung für die Entwicklung einer Methode. Dabei ist es nachvollziehbar, dass diese Phase mit allgemeingültigen logischen Schritten gestaltet werden kann. Die frühe Modellierungsphase ist weniger eine Frage der Softwarebedienung als vielmehr ein Prozess strukturierten und logischen Denkens. Die frühe Modellierungsphase lässt sich durch allgemeingültige logische Schritte gestalten, weil hier die Modellstruktur entsteht und die zugrunde liegenden Strukturierungsprinzipien für alle 3D-CAD-Modelle gleich sind. Die Organisation der logischen Schritte in der frühen Modellierungsphase nenne ich **Top-down Entwurfsstrategie**:

- „Entwurf“: Bezug auf frühe Modellierungsphase.
- „Top-down“: Focus auf die Wiederverwendung von Informationen.
- „Strategie“: Standardisierte optimale Vorgehensweise

Die Beschreibung der Top-down Entwurfsstrategie ist der Schwerpunkt meines zweiten Buches **3D-CAD Entwurf mit Autodesk Inventor**⁶.

Anschließend beschäftigte ich mich mit Fragestellungen der CAD-Didaktik. Hier wird z.B. untersucht, wie Studierende eine strukturierte Vorgehensweise beim Modellieren erlernen können. Das Wichtigste, was ich dabei lernte, ist der Unterschied zwischen deklarativem und prozeduralem Wissen⁷, zwei Begriffe aus der kognitiven Psychologie. **Deklaratives** Wissen ist das Faktenwissen, welches sprachlich formulierbar und damit kommunizierbar ist. **Prozedurales** Wissen ist Erfahrungswissen und kann nicht ohne weiteres vermittelt werden. Die Bedeutung dieser Unterscheidung wird mit der Betrachtung der einzelnen Phasen der 3D-CAD Lernkurve klar. Diese zeigt (symbolisch und qualitativ) den Fortschritt der

⁶ Herstellung und Verlag: BoD – Books on Demand, Norderstedt, 2024, ISBN: 9783758320453

⁷ Rynne, Anthony; Gaughran, William. 2007. Cognitive modeling strategies for optimum design intent parametric modeling (PM). Computers in Education Journal 18(3). S.58

Anwendungskompetenz als Funktion der Anwendungszeit der Software. So ist die frühe Lernphase durch einen raschen Lernfortschritt gekennzeichnet. Die Lerninhalte sind deklaratives Wissen und damit eindeutig vermittelbar (Die Inhalte der INVENTOR Online Hilfe, von Trainings Handbücher oder Seminaren sind fast ausschließlich deklaratives Wissen). Mit der Vertiefung der Grundlagen werden Routinen eingeübt, damit wird die Lernkurve flacher. Anschließend gewinnt eine neue Wissenskomponente an Bedeutung, das prozedurale Wissen. Der Zuwachs am Erfahrungswissen ist abhängig von der Motivation des Anwenders, die Lernkurve dieser Komponente wird deutlich flacher ausfallen. Hilfestellung durch kommunizierbare Anleitungen sind in dieser Phase z.B. Best-Practice Empfehlungen⁸. Ich habe mich weitgehend für prozedurales Wissen interessiert, was mir lange Zeit nicht bewusst war. Prozedurales Wissen bestimmt die Qualität eines 3D-CAD Modells. Ist es nur unzureichend vorhanden, können Modelle instabil sein. CAD-Systeme selbst besitzen keinen Button für die optimale Vorgehensweise. Dennoch gibt es einen Moment, der einen methodischen Ansatz für eine strukturierte Vorgehensweise ermöglicht. Mit dieser Grundlage lässt sich die Top-down Entwurfsstrategie weiterentwickeln und zugleich ein methodisches Fundament für das 3D-CAD Modellieren schaffen.

Das Ringen um die richtige Sprache beanspruchte einen großen Teil der Arbeitszeit am Text. Eine konsistente Definition, das eindeutige und klare Verständnis bestimmter Begriffe ist mir wichtig. Das war kein linearer, stetiger Prozess, sondern viele kleine Schritte über einen langen Zeitraum. Die zentrale prozedurale Kompetenz ist die Organisation der Entwurfsphase mit folgenden Organisationsprinzipien:

- *Die Entwurfsansicht*
- *Die Entwurfsabsicht (design intent)*⁹
- *Der Top-down Ansatz*

⁸ Siehe z.B.: Paul Munford & Luke Mihelic; Reliable Modelling Techniques for Complex Part Design in Inventor; Autodesk Class Handout MFG226705

⁹ Martin II, David. Design Intent in Creo Parametric (Creo Power Users Book 7), (S.3-4), 2020, Kindle-Version.

(Anmerkung: Obwohl sich das Buch an Nutzer des 3D-CAD-Programms Creo richtet, bietet es allen Nutzern eines 3D-CAD-Systems einen umfassenden Überblick zum Thema.)

Weitere wichtige Begriffe sind:

- *Die räumlich visuelle Vorstellung*
- *CAD-Automation*

Das Verständnis der Zusammenhänge zwischen den Begriffen ist nun der wichtigste Baustein der **Top-down Entwurfsstrategie**. Ausgangspunkt der Konstruktion ist die **räumlich visuelle Vorstellung** des Lösungskonzeptes. Diese Voraussetzung besteht unabhängig von der Konstruktionsmethode, also unabhängig davon, ob die Konstruktion am Zeichenbrett oder mithilfe von 2D-, bzw. 3D-CAD Systeme umgesetzt wird. Die Erzeugung der räumlich visuellen Vorstellung kann auf vielfältige Weise erfolgen. Sie basiert auf der Berücksichtigung verfügbarer Informationen im Sinne des Top-down Ansatzes, der Kenntnissen über Orientierung und Position im dreidimensionalen Raum sowie den Anforderungen von Abläufen, Schnittstellen, oder Bauraumbegrenzungen. Skizzen, Vorlagen, und ähnliche Hilfsmittel unterstützen den Prozess. Die Fähigkeit zur räumlich visuellen Vorstellung¹⁰ ist dabei unverzichtbar, da die Entwicklung einer Lösung nicht mit einem leeren Blatt Papier beginnt. Mit der räumlich visuellen Vorstellung folgen die Prämissen, dass die Orientierung und Position einer 3D-Komponente im dreidimensionalen Raum bekannt ist und dass es eine Ansichtsrichtung gibt, die die meisten Informationen bezüglich Form und Abmessungen enthält. Damit kann die **Entwurfsansicht** als Schlussfolgerung der Prämissen abgeleitet werden. In 2D ist das der Zeichenbereich, in dem die Konstruktion beginnt, in 3D-CAD ist es der Inhalt der 1. Skizze. Die Entwurfsansicht ist eine Projektion. Das Konzept der Normalprojektion ist die Grundlage jeder technischen Zeichnung¹¹. Eine weitere Folgerung betrifft die Ursprungsebene für die erste Skizze: Die ist senkrecht zur Projektionsrichtung der Entwurfsansicht, also der Ansicht mit den meisten Informationen. Die Schritte zur 1. Skizze und die Darstellung der Entwurfsansicht sind eindeutig, kommunizierbar und stellen damit deskriptives Wissen dar. Mit der Entwurfsansicht wird das prozedurale Wissen für diese Phase auf die räumlich visuelle Vorstellung der Aufgabenstellung herunter gebrochen. Nachdem die Entwurfsansicht skizziert wurde, müssen deren geometrische Merkmale

¹⁰ Die zentrale Kompetenz ist hier das räumliche Vorstellungsvermögen, die spatiale Kompetenz

¹¹ 2011. Tabellenbuch Metall. Verlag Europa Lehrmittel. S. 65

bezüglich Abmessungen, Form und Gestalt sowie Orientierung und Position bestimmt, d.h. festgelegt werden. Ziel ist es, ein vorhersehbares und konsistentes Verhalten der Skizze bei nachträglichen Änderungen sicherzustellen. Damit wird die **Entwurfsabsicht** (design intent) abgebildet. Beispiele hierfür sind die Definition von Parallelitäten zwischen Flächen, die Berücksichtigung von Symmetrien, sowie die Festlegung von Beziehungen zwischen Abmessungen. Die Bestimmung der Entwurfsabsicht basiert auf prozeduralem Wissen und kann mit zahlreichen Techniken und Methoden erfolgen, wie z.B. Abhängigkeiten, Parameter, Konstruktionslinien oder Blöcke. Für die Sicherstellung und den Erhalt der Entwurfsabsicht nach Änderungen ist insbesondere das Konzept der Bemaßung-, bzw. Parametrisierung von zentraler Bedeutung. Wird eine definierte Bedingung bei einer späteren Modelländerung angesprochen und nicht wie erwartet interpretiert, können die Festlegungen der Skizze jederzeit angepasst werden. Die Entwurfsansicht ist ein Zwischenschritt und geht letztlich in die Entwurfsabsicht über. Obwohl die Definition der Entwurfsabsicht eine große Bedeutung für die Modellstabilität hat, ist die Formulierung eines Leitfadens für die Festlegung der Entwurfsabsicht schwierig, da diese eine signifikante prozedurale Komponente besitzt.

Der **Top-down** Ansatz¹² stellt das dritte Prinzip einer strukturierten Vorgehensweise dar. Für das Verständnis dieser Vorgehensweise lassen sich zahlreiche Quellen finden. Ich schlage hier eine zweigeteilte Definition vor. Grundsätzliches Thema des Top-down Ansatzes ist die Organisation der Informations-Struktur des 3D-CAD Modelles. Der Begriff gibt einen Hinweis auf die Vorgehensweise: Er beschreibt den Ausgangspunkt *Top* und die Richtung *down*. Ich erkenne folgende Anwendungsfelder:

1. Der Bezug auf Informationen, die als Ausgangspunkt für den Entwurf, verfügbar sind, also der Informations-Status vor Beginn der Modellierung. Hierbei konzentrieren wir uns auf den Kern der Aufgabenstellung. Das Ergebnis ist die Entwurfsansicht. Der Informations-Status besteht aus Parametern oder geometrischen Merkmalen, welche sowohl die Aufgabenstellung als auch das Konzept beschreiben. Ohne diese Elemente ist kein Entwurf möglich. Der Bezug auf den Informations-Status stellt sicher, dass während der frühen Entwurfsphase nicht untergeordnete Gesichtspunkte der

¹² Martin II, David. Top down with Creo Parametric (Creo Power Users Book 7), 2017, Kindle-Version (siehe auch Fußnote 8)

Gestaltung im Vordergrund stehen. Um die Bedeutung der ersten Skizze für die Top-down Vorgehensweise zu verstehen und einzuordnen lohnt auch ein Blick in die jüngere Geschichte des Konstruierens. Innerhalb von 30 Jahren veränderte sich die Konstruktionspraxis von der Arbeit am Zeichenbrett, über das Konstruieren mit 2D-CAD Systemen bis zur 3D-Modellierung. Top-down ist auch die Frage, womit die Entwicklung der Entwurfsansicht startet. In 2D stellte sich diese Frage nicht, der Top-down Ansatz war alternativlos. Konstruieren am Zeichenbrett war Top-down pur!

2. Das zweite Anwendungsfeld des Top-down Ansatzes ist die Wiederverwendung, Vererbung oder Verknüpfung von Informationen im Modellierungsprozess. In einer 2D-Baugruppenzeichnung repräsentiert eine Linie oft die Grenze zweier benachbarter Bauteile. Die benachbarten Flächen von 3D-CAD Komponenten besitzen im 3D-CAD Modell zunächst keine Beziehung. Die Information über Dimension, Form, Orientierung und Position ist redundant. Nach der Änderung der ersten Komponente muss die Zweite entsprechend angepasst werden. Inventor bietet aber zahlreiche und flexible Möglichkeiten, hier eine Verknüpfung einzurichten. Geometrische Merkmale können abgeleitet, d.h. in andere Bauteile vererbt werden, ebenso können Parameter abgeleitet oder selektiv verknüpft werden. Optimierungsschleifen und Skalierungen können damit schnell umgesetzt werden, grundsätzlich wird das Fehlerrisiko verringert. Eine reduzierte Redundanz bedeutet auch eine geringere Modellkomplexität.

Es stellt sich die Frage, ob und ab welchem Umfang der Aufwand für die Verknüpfung von Parameter gerechtfertigt ist. Die Übertragung globaler Merkmale, beispielsweise von Hauptabmessungen aus einem Mastermodell in mehrere Komponenten ist sinnvoll und effizient. Die Vererbung der Parametrik konstruktiver Details bietet nur begrenzten Nutzen. Dagegen ist die Bewertung der Wiederverwendung geometrischer Merkmale eindeutig positiv. Dies lässt sich dadurch begründen, dass die geometrischen Details benachbarter Bauteile ohnehin in Skizzen erfasst werden müssen. Daher stellt sich die Frage, warum die Skizzenerstellung für mehrere benachbarte Bauteile nicht in einem gemeinsamen Zusammenhang erfolgen sollte. Dieser Ansatz entspricht dem Vorgehen in der zweidimensionalen Konstruktion, etwa am Zeichenbrett. Zwar erhöht sich dadurch der Umfang der Skizze, die praktische Grenze, d.h. die Komplexität wird durch die Auswertbarkeit

der Profile bestimmt. Der Ansatz für dieses Konzept ist das Arbeiten mit Blöcken, d.h. Skizzenblöcke erfassen die Entwurfsansicht mehrerer benachbarter Bauteile. Die Fähigkeit, eine Entwurfsansicht z.B. in einem integralen 2D-Layout darzustellen, ist ein Schlüssel für die Effizienz und Qualität eines 3D-CAD-Modelles. Die Methode hat erstaunliche Vorteile in der frühen Modellierungsphase: Sie ermöglicht die schnelle Erstellung aussagekräftiger Konzepte.

Die bisherige Darstellung macht deutlich, dass der Top-down Ansatz weit mehr umfasst als die Skelett Modellierung. AUTODESK INVENTOR bietet zahlreiche Möglichkeiten zur Wiederverwendung von Informationen. Insbesondere die hohe Flexibilität beim Arbeiten mit Blöcken eröffnet vielfältige Vorgehensweisen, die sich unter dem Begriff CAD-Automatisierung zusammenfassen lassen.¹³

Nach der Klärung der Organisationsprinzipien ist die Definition von Bewegungsstellungen der letzte Schritt der Top-down Entwurfsstrategie. Voraussetzung ist die Konsistenz der Ursprünge. Der Befehl *FIXIEREN UND AM URSPRUNG PLATZIEREN* ermöglicht das automatische Platzieren von Komponenten. Damit lassen sich bereits in der frühen Entwurfsphase Bewegungsstellungen definiert, um beispielsweise Prozessabläufe und Bewegungskonzepte anschaulich zu präsentieren. Die Definition von Bewegungsstellungen ist damit Teil der Entwurfsabsicht.

¹³ An dieser Stelle ist hervorzuheben, dass das Strukturieren von Geometrie mit der Block-Funktion bereits in den allerersten Versionen von AUTODESK AUTOCAD verfügbar ist (1980er Jahre)!

Des Weiteren sei darauf hingewiesen, dass AUTODESK INVENTOR mit der Funktion *KOMPONENTE ERSTELLEN* eine leistungsfähige Top-down Modellierungsumgebung bereitstellt. Auf Basis einer Masterdatei werden zahlreiche Arbeitsschritte zum Aufbau einer Baugruppe automatisiert.

Damit stellt sich die Frage, warum Autodesk das Potenzial des Top-down-Ansatzes nicht deutlicher hervorhebt und weiterentwickelt (Einschränkungen gibt es z.B. beim Management der Vererbungen: Die Parameter von Blocks skizzen werden nach der Block-Definition nicht mehr angezeigt. Meine Abhilfe ist aktuell eine Bildschirmaufnahme.)

Der vorliegende Text fasst einen Vorschlag für eine strukturierte Vorgehensweise beim 3D-CAD-Modellieren zusammen. Er zeigt die Logik der frühen Entwurfsphase sowie die daraus abgeleiteten Arbeitsschritte. Dazu werden die zentralen Begriffe definiert und ihre Zusammenhänge dargestellt. Im Fokus stehen Modellverhalten und die Modellqualität, die frühe Entwurfsphase als gemeinsamer Ausgangspunkt aller 3D-CAD-Modelle, deskriptives und prozedurales Wissen, die räumlich visuelle Vorstellung sowie die Kenntnis von Orientierung und Position einer Komponente. Weiterhin werden die Konsistenz der Komponenten-Ursprünge, die Entwurfsansicht, die Entwurfsabsicht, der Informations-Status, der Top-down Ansatz, die CAD-Automatisierung, Bewegungsstellungen und schließlich die **TOP-DOWN ENTWURFSSTRATEGIE** behandelt. Die folgende Grafik zeigt abschließend die Zusammenhänge zwischen den Organisationsprinzipien der Entwurfsphase als wichtigste Bausteine der Top-down Entwurfsstrategie.

