

Hans-Günter Schiele

# Computergrafik für Ingenieure

Eine anwendungsorientierte Einführung



Springer Vieweg

---

# Computergrafik für Ingenieure

---

Hans-Günter Schiele

# Computergrafik für Ingenieure

Eine anwendungsorientierte Einführung

 **Springer** Vieweg

Hans-Günter Schiele  
Wilhelmshaven  
Deutschland

ISBN 978-3-642-23842-0  
DOI 10.1007/978-3-642-23843-7

ISBN 978-3-642-23843-7 (eBook)

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

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

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.

*Einbandentwurf:* WMXDesign GmbH

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media  
[www.springer-vieweg.de](http://www.springer-vieweg.de)

---

# Vorwort

Dieses Buch vermittelt in 12 Kapiteln Grundlagen zur dreidimensionalen Computergrafik. Das Thema wird aufbereitet aus der Sicht von Technikern und Ingenieuren, deren Verständnis vor allem mit ausgefeilten Skizzen befördert wird. Für Studenten einschlägiger Fachrichtungen ist das Buch aus dem gleichen Grunde hilfreich. Aber auch dem interessierten Laien wird ein verständlicher Einblick in die Computergrafik gegeben.

Es werden die gängigen Projektionsarten behandelt, das Farbmanagement erläutert und diverse Verfahren zur Visualisierung beschrieben. In den betreffenden Kapiteln sind jeweils kleine Beispiele durchgerechnet und die Ergebnisse dargestellt. Die hierzu erforderliche Mathematik beschränkt sich auf Grundkenntnisse der Matrizenrechnung und der Analytischen Geometrie und ist in einem separaten Kapitel zusammengefasst.

Hinweise zur Programmierung werden für Visual-Basic.NET gegeben (als Untermenge von Visual-Studio.NET von Microsoft), das im technischen Bereich weit verbreitet ist. Für dieses Buch genügt eine Visual-Studio Express Edition, die man kostenfrei herunterladen kann. Der Übergang zu C++ oder C# ist damit problemlos möglich. Für Programmierneulinge werden Hilfen zur Erstellung eines gleichermaßen lesbaren wie effektiven Codes bereitgestellt.

Die Motivation zu diesem Buch entwickelte sich vor allem aus der Einsicht, dass die Darstellung der Grafikmethoden in einer ingenieurgerechten Form sicher für viele Techniker hilfreich ist. Dies einerseits, weil mit bekannter Mathematik der Einstieg leichter fällt und dadurch andererseits die Hemmschwelle zur detaillierten Beschäftigung mit Computergrafik abgebaut wird. Spezielle Literatur ist in den einzelnen Kapiteln angegeben mit der Prämisse, dass diese schnell erreichbar ist (Internet) und ihr Umfang nicht ausufert. Quellen in Wikipedia sind zu finden unter [„Suchbegriff“/Wiki]. Für die Fachbegriffe werden die Definitionen aus dem „Lexikon der Computergrafik und Bildverarbeitung“ von Iwainsky/Wilhelm (Vieweg-Verlag 1993) herangezogen; diese sind im Text mit [Lexi] gekennzeichnet.

Der Text ist kurz und sachlich abgefasst, verzichtet auf eine ausschweifende Lyrik und vermeidet kryptische Beschreibungen. Die behandelten Themen sind nicht bis ins feinste Detail aufbereitet, sondern beschränken sich auf das für eine Einführung Wesentliche.

Wilhelmshaven, im Herbst 2011

*Hans-Günter Schiele*

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	v
<b>1 Übersicht</b>	1
<b>2 Perspektive und Projektion</b>	13
<b>3 Raster- und Vektorgrafik</b>	23
<b>4 Farben</b>	29
<b>5 Modellierung dreidimensionaler Szenerien</b>	41
<b>6 Arrays und Strukturen</b>	69
<b>7 Koordinatensysteme und Transformationen</b>	79
<b>8 Darstellungstransformationen</b>	99
<b>9 Visualisierung</b>	171
<b>10 Texturen</b>	291
<b>11 Mathematisches Rüstzeug</b>	309
<b>12 Hinweise für Programmierer</b>	345
<b>Sachverzeichnis</b>	361

*Computergrafik ist das Fachgebiet, das sich mit der Erzeugung, Beschreibung und Manipulation von Bildern mittels Rechner und grafischer Geräte beschäftigt. Die angewendeten Methoden und Hilfsmittel werden häufig ebenfalls unter dem Begriff Computergrafik zusammengefasst. [Lexi]*

Computergrafik begegnet uns auf Schritt und Tritt in vielerlei Ausprägung. Das beginnt morgens mit der grafischen Darstellung statistischer Daten in der Zeitung, gefolgt von den Hinweisen unseres Navigationssystems im Auto und endet im Fernsehen mit der Wetterkarte der Spätnachrichten. Rechnerbasierte Anwendungen präsentieren heute ihre Ergebnisse mittels grafischer Darstellungen in vielfältiger Form.

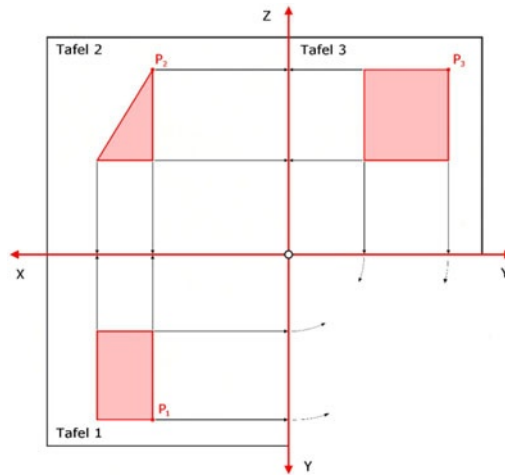
---

## 1.1 Rückschau

Die Anfänge der Computergrafik liegen schon ein halbes Jahrhundert zurück: Mitte der 1960-er Jahre hatten wir in der Luftfahrttechnik bei Dornier einen Forschungsauftrag des Bundesministeriums der Verteidigung (BMVg) abzuwickeln mit dem futuristischen Namen „Elektronische Straakung von Flugzeug-Systemmaßen“. Dahinter verbarg sich nichts Geringeres, als einen harmonischen Verlauf der Außenkonturen von Rumpf und Flügel mit gegebenen Randbedingungen elektronisch zu berechnen. Diese und andere Arbeiten waren Vorläufer vom heutigen CAD; allerdings war dieser Begriff noch nicht geboren.

Mit den ersten „leistungsfähigen“ Computern wurden dann CAD-Programme entwickelt und damit in der Luftfahrt- und Automobiltechnik erste Konstruktionszeichnungen – teilweise sogar im Maßstab 1 : 1 – elektronisch erstellt und auf überdimensionalen Plottern (1,80 · 6,00 m) gezeichnet. Diese Programme lösten nach und nach die Zeichenbretter ab, aber ihre Arbeitsweise war mit den alten Techniken nahezu identisch: Sie übernahmen die Methoden der darstellenden Geometrie





**Abb. 1.1** 2-Tafel-Projektion

auf den Computer und stellten weiterhin Objekte in 2- oder 3-Tafel-Projektionen dar, wie in Abb. 1.1.

Nur ein geübter Konstrukteur wird in dieser zweidimensionalen Zeichnung ein dreidimensionales Objekt erkennen. Diese wenig anschauliche Darstellung hat aber (für die Mechaniker in der Werkstatt) den Vorteil, dass sie maßstäblich ist. Man nimmt den Nachteil der schlechten Anschaulichkeit bewusst in Kauf, um den Maßstab zu erhalten. Andere Darstellungsarten verbessern ggf. die Anschaulichkeit auf Kosten des Maßstabs, der dabei ganz oder teilweise verloren geht. Für „Tafel“ sind in den unterschiedlichen Berufsgruppen diese Bezeichnung üblich: Grundriss, Ansicht, Draufsicht, Seitenriss, Ansicht-XZ und weitere.

Erst in einer „dimetrischen“ Projektion des Prismas wird sofort erkennbar, wie das Objekt aussieht (Abb. 1.2).

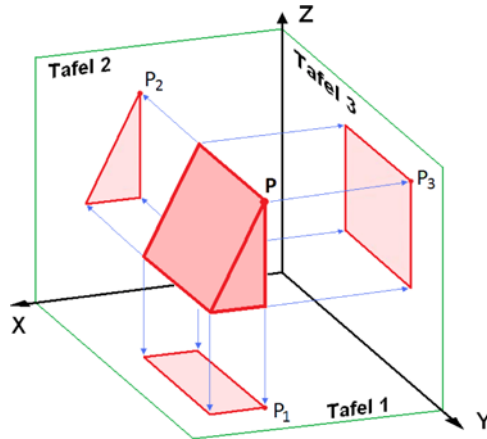
Wie schwer manche grafische Darstellung zu interpretieren ist, wird an Abb. 1.3 deutlich.

Wie schwerwiegend der Verlust der 3. Dimension beim Zeichnen auf einem ebenen, 2-dimensionalen Blatt ist, zeigt Abb. 1.4. Die Gerade liegt im linken Teil zweifelsfrei vor dem Kreis. Oder ist der Kreis vielleicht eine Kugel, ein stehender Zylinder? Im rechten Teil ist nicht klar, ob die Gerade hinter dem Objekt liegt, oder durch dieses hindurch geht.

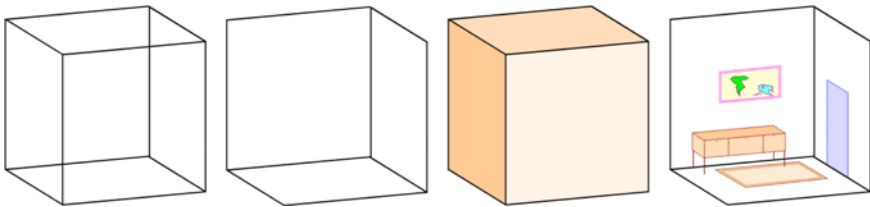
Auch die Treppe in Abb. 1.5 ist nicht eindeutig in ihrer Darstellung: Fixiert man lange genug links unten, dann ist es eine Draufsicht auf die Treppe. Fixiert man rechts oben, wird es eine Untersicht; beides ist möglich.

Die folgende ganz unsinnige „Konstruktion“ in Abb. 1.6 lässt sich zwar zeichnen, ist aber sonst nicht brauchbar.

Diese Beispiele machen deutlich, dass man 3-dimensionale Objekte nicht mit ihrem vollen Informationsgehalt auf einer 2-dimensionalen Fläche darstellen kann.



**Abb. 1.2** Dimetrische Projektion des Prismas

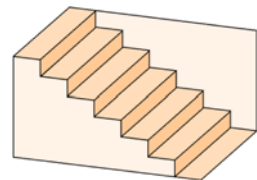


**Abb. 1.3** Interpretation grafischer räumlicher Darstellungen. *Von links nach rechts:* Alle 12 Kanten eines Würfels sind sichtbar – hat dieser Würfel Oberflächen oder handelt es sich nur um ein Drahtgestell? Wenn er Oberflächen hat, sind einige Kanten nicht sichtbar (es sei denn, die Oberflächen wären durchsichtig). Mit 9 Kanten wird daraus eine Ansicht von rechts unten, oder eine Ansicht von links oben, beide mit erkennbaren Oberflächen. Oder ist das gar keine Würfelansicht sondern die offene Ecke eines Raumes mit Blick von links oben?

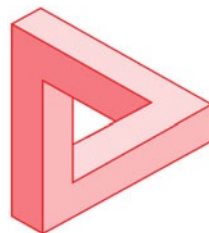
**Abb. 1.4** Grafische räumliche Darstellung 2-dimensional



**Abb. 1.5** Beispiel Treppe



**Abb. 1.6** Grafische Darstellung einer „Konstruktion“ ohne Gebrauchswert



Der Verlust einer Dimension ist gleichbedeutend mit dem Verlust von Informationen des dargestellten Objekts. Wie auch immer man dieses auf die Projektionsfläche transformiert, es kommt stets nur eine 2-dimensionale Ansicht dabei heraus. Ein Gesamteindruck kann damit nicht vermittelt werden.

Eine gewisse Verbesserung bieten stereoskopische Projektionen. Die damit erreichte „Rückgewinnung“ der 3. Dimension erfordert allerdings spezielle Hardware, mit der die Projektion betrachtet wird. Eine 2-dimensionale Kopie solcher Projektionen ist nur sehr begrenzt möglich. Den vollen 3-dimensionalen Informationsgehalt eines Objekts bietet nur der Modellbau, z. B. mit der Anfertigung eines maßstäblichen Prototyps. Hilfreich ist hierbei die CAD-Technik, wobei einige Programme aus den Zeichnungsdaten auch perspektivische Darstellungen generieren können.

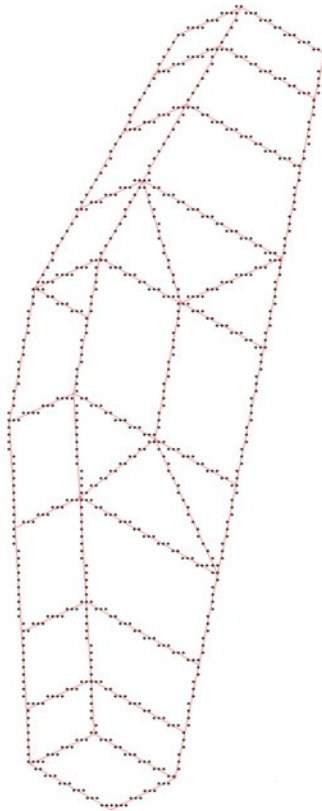
Im 19. Jh. wurde die gemalte Darstellung von der fotografischen Abbildung abgelöst. Dies ist nun keineswegs der Schlusspunkt einer langen Entwicklung. Heute geht es darum, Objekte und Szenerien in realitätsnahen Bildern darzustellen, die noch gar nicht existieren und folglich auch nicht fotografiert werden können.

Im Großen betrifft dies z. B. die Neukonstruktion eines Flugzeugs. In der Luftfahrttechnik werden schon von den ersten Entwürfen mittels 3D-Computergrafik fotorealistische Darstellungen (und Animationen) erzeugt, um potenzielle Kunden zu gewinnen und sie von Anfang an mit dem Produkt vertraut zu machen. Ein weiteres Beispiel: eine neue Brücke, deren optische Wirkung in der Landschaft mittels Fototechnik und Computergrafik sichtbar gemacht wird, lange bevor mit deren Bau begonnen wird. Im Kleinen ist dies beispielsweise der Küchenplaner, mit dem man eine neue Küche planen und auch (fast) fotorealistisch betrachten kann.

Es ist naheliegend, die Eigenschaften und Leistungen eines neuen Modells erst durch numerische und grafische Simulationen weitestgehend zu überprüfen, bevor ein teurer Prototyp gebaut wird. Die hierzu erforderliche Software hat allerdings eine lange Entwicklungsgeschichte.

Anfangs war es gar nicht vordringlicher Wunsch der Ingenieure, eine möglichst realistische Grafik von ihrem Berechnungsobjekt in Händen zu halten. Es ging vielmehr darum, die Eingabedaten für die Berechnungsprogramme zu prüfen. Fehleingaben oder sachliche Fehler lassen sich anhand einer Grafik natürlich leichter erkennen, als sie in langen Zahlenkolonnen zu finden.

Zu Beginn der Computerei fehlte es sowohl an grafikfähiger Hardware als auch an Grafik-Software, die über eine 3-Tafel-Projektion hinausging. Das einzige Gerät,



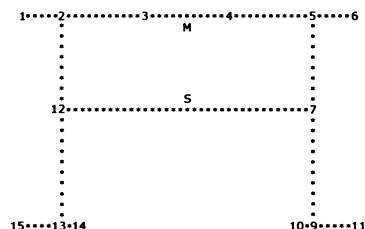
**Abb. 1.7** Printer-Plot

das in jedem Rechenzentrum zur Verfügung stand, war ein (Schnell-)Drucker, der mit gefaltetem Endlospapier gefüttert wurde. Mit dieser Hardware-Ausstattung und mit der FORTRAN-Sprache zum Programmieren machten wir uns Mitte der 1960-er Jahre an die Arbeit. Das Ergebnis waren sogenannte Printer-Plots, von denen einer hier wiedergegeben ist (Abb. 1.7). Das Bild ist nachträglich noch geschönt mit den hinterlegten „wahren“ Konturen.

Die stufige Darstellung der Linien kennen wir von unseren heutigen Geräten. Ein Zeichen auf dem Drucker wird prinzipiell genauso behandelt wie ein Pixel auf dem Bildschirm. Bei den Bildtransformationen musste man tunlichst darauf achten, dass sich die lange Seite des Bildes in Druckrichtung orientierte, damit überhaupt in der Größe etwas Wahrnehmbares dabei heraus kam.

Die Auflösung wurde trickreich noch dadurch verbessert, indem das Bild auf die doppelte Druckerbreite angelegt, gedanklich der Länge nach (in Druckrichtung) aufgeschnitten wurde und beide Hälften nacheinander gedruckt und dann zusammengeklebt wurden.

**Abb. 1.8** Dünnwandiger Trägerquerschnitt, erstellt ca. 1964 (S = Schwerpunkt, M = Schubmittelpunkt)



Betrachten wir dieses „Klopapierformat“ etwas genauer: Der Schnelldrucker schrieb horizontal 10 und vertikal – in Druckrichtung – 6 Zeilen/Zoll. Daraus folgen zwei unterschiedliche Maßstäbe für die horizontale und vertikale Auflösung. Dies ist zwar kein prinzipielles Problem und kann bei den Bildtransformationen leicht berücksichtigt werden, aber störend ist es doch.

Bei einem 17"-TFT-Bildschirm mit z. B. einer Auflösung von 1024 Pixeln horizontal und 768 Pixel vertikal wäre die vergleichbare Bildbreite der 132 Druckzeichen des Schnelldruckers auf einem vertikalen Bildschirmstreifen von

$$17'' \cdot 0,8 \cdot \frac{132 \text{ P}_x}{1024 \text{ P}_x} = 1,75'' \triangleq 4,45 \text{ cm}$$

darstellbar (von 34,5 cm Gesamtbreite). Bei einer Auflösung von  $1280 \cdot 1024$  schrumpft der Streifen auf 3,5 cm Breite.

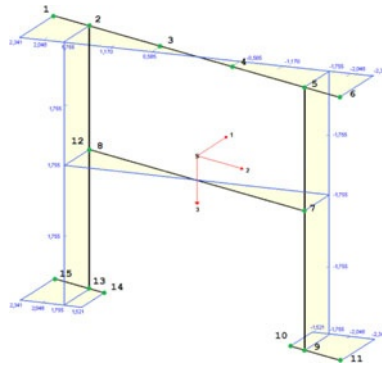
Aus heutiger Sicht und mit unseren gestiegenen Ansprüchen an Computergrafik kann man dieses Vorgehen als „Irrungen und Wirrungen“ eines Jung-Ingenieurs ansehen.

Mit Anleihen bei der Fernstechnik wurden die ersten Bildschirme für den Computer entwickelt. Für die Computergrafik hat sich damit zunächst nichts Wesentliches verbessert, weil diese Bildschirme leider nur Buchstaben, Zahlen und Sonderzeichen darstellen konnten (alpha-numerischer Zeichensatz), und der nutzbare Darstellungsbereich beschränkte sich auf 80 Zeichen pro Zeile mit maximal 24 Zeilen auf dem ganzen Bildschirm. Auch diese Zeichen hatten ein Seitenverhältnis  $\neq 1 : 1$ .

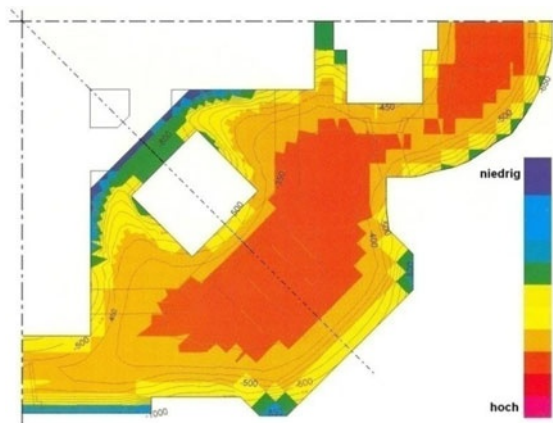
Die bis dahin schon erreichten Ergebnisse der Grafikprogrammierung – die erwähnten Printer-Plots – ließen sich auf diese Bildgröße natürlich nicht übertragen. Für einige Sonderaufgaben, z. B. der Querschnittsberechnung im Bauwesen, wurden Teillösungen umfunktioniert, um zumindest ebene Darstellungen von Bauteilen zu ermöglichen.

So relativ bescheiden die grafischen Ergebnisse (Abb. 1.8) mit der gegebenen Hardware auch waren, der Anfang war gemacht. Die gleiche Aufgabenstellung wird heute so gelöst wie in Abb. 1.9.

Ein weiterer Schwerpunkt besteht heute darin, die großen Datenmengen grafisch zu aufzubereiten, die überall in Industrie, Wirtschaft, Wissenschaft und Forschung durch Computer generiert werden. Durch Übergabe dieser Daten an geeignete Gra-



**Abb. 1.9** Dünnwandiger Trägerquerschnitt mit Ergebnisdarstellung



**Abb. 1.10** Frauenkirche Dresden, Bodenpressungen  $\frac{1}{4}$  Fundament (Die Dresdner Frauenkirche, Jahrbuch 1997)

fikprogramme ist es möglich, kompakte grafische Darstellung auch von mehrdimensionalen komplexen Ergebnisstrukturen zu erstellen.

Abbildung 1.10 ist viel anschaulicher und informativer als die zugehörige Tabelle (hier nicht aufgelistet). Die Quintessenz lässt sich mit einem Blick erfassen; die Tabellenwerte müssen Seite für Seite mühsam durchforstet werden. Diese Darstellungsform kommt außerdem der physiologischen Leistungsfähigkeit des Betrachters entgegen und wird als „Visualisierung von Ergebnissen“ bezeichnet.

Besonders anschaulich wird die räumliche Konzeption eines Entwurfes durch ein Modell zum Ausdruck gebracht. Seit den 1990-er Jahren kann das Modell auch 3-dimensional im virtuellen Raum erzeugt werden. Dabei werden die einzelnen Elemente aus den Zeichnungen maßstabsgetreu in ein geeignetes Material übertragen und daraus ggf. unmittelbar eine perspektivische Projektion generiert.

## 1.2 Einteilung und Abgrenzung

*Die Computergrafik als Teilbereich der Informatik gliedert sich im Wesentlichen in diese Hauptgebiete: [Lexi]*

- Grafische Datenverarbeitung

Diese schließt alle Verfahren ein, die durch Eingabe, Übernahme oder Generieren von Daten zur Objektbeschreibung diese in grafische Darstellungen umwandeln.

Mit dem Begriff „Generative Computergrafik“ wird Grafik umschrieben, die ausdrücklich aus rechnerinternen Modellen unmittelbar und interaktiv durch den Anwender generiert wird. Das ist unser Thema! Damit sind folgende Themen für uns nicht relevant:

- computerunterstützte Konstruktion CAD
- Präsentationsgrafiken (Business Graphics)
- Echtzeit-Bilddarstellung in Simulation und Prozesssteuerung
- Grafik in Überwachungs- und Leitsystemen
- Grafik in Werbung und Design
- Videotechnik und Animation

Ebenfalls sind die Bildverarbeitung und auch die Mustererkennung von den weiteren Erörterungen ausgeschlossen.

- Bildverarbeitung

Bei der (digitalen) Bildverarbeitung werden aus Bildern von natürlichen Objekten rechnerinterne Objekte erzeugt. Die Bildverarbeitung beschränkt sich auf das Manipulieren von Bildern bzgl. Helligkeit, Kontrast, Ausschnitt usw. In der Werbung und in bestimmten Kunstrichtungen werden viele Bilder inzwischen vollständig mit dem Computer erzeugt oder Fotografien mittels Techniken der Computergrafik überarbeitet oder verfremdet. In der Kartografie wird Computergrafik genutzt beim Hinzufügen weiterer Darstellungsebenen mit speziellen Inhalten z. B. für Navigationszwecke, in der Kriminalistik beispielsweise mit dem „biometrischen“ Personalausweis.

- Mustererkennung

Dies ist der Oberbegriff für alle Prozesse der automatischen Analyse, Beschreibung und Klassifikation von Mustern. Ziel der Mustererkennung ist entweder, ein gegebenes Muster einer bestimmten Musterklasse zuzuordnen (Klassifikation), oder eine sinnvolle Beschreibung des Musterinhaltes zu liefern (Bildbeschreibung).

Praktische Anwendungsgebiete der Mustererkennung sind zum Beispiel:

- Schriftzeichenerkennung mittels OCR (Optical Character Recognition), um den Text eines gescannten Dokumentes in editierbaren Text umzuwandeln oder mittels spezieller Lesegeräte handschriftlichen Text unmittelbar weiter zu verarbeiten.

- Spracherkennung, z. B. der Sprachcomputer eines beliebigen Kunden-„Services“, der uns mit einer Warteschleife nervt.
- Medizin, z. B. Mikroskop-Bildanalyse, EKG-Auswertung, Auswertung von Röntgenbildern, allgemeine Diagnostik, rechnerunterstützte Tomografie.
- Kriminalistik, z. B. Vergleich von Fingerabdrücken, Personenfahndung anhand biometrischer Daten und Videobildern.

Eine grundsätzliche andere Unterteilung folgt aus der jeweiligen Aufgabenstellung. Dabei geht es einerseits um hohe Bildqualität, andererseits um die computertechnische Verarbeitung in „Echtzeit“. Damit sind folgende Grafikaspekte gemeint:

- (Foto)-realistische Bildsynthese: ermöglicht die detailgetreue Nachbildung einer Szenerie mit entsprechend aufwendigen 3D-Modellen einschließlich Beleuchtung. Darin wird eine möglichst große Detailtreue verlangt; Echtzeitfähigkeit ist dafür nicht erforderlich.
- Animationen in Echtzeit: Diese geht noch einen Schritt weiter, indem auf Grundlage von Modelldaten Filme erstellt werden. Die Grenzen der Darstellung sind heute nicht mehr handwerklich bedingt, sondern eine Frage des effektiven Einsatzes der richtigen Mittel und somit letztendlich auch eine Kostenfrage. Deswegen werden meist Abstriche bei der 3D-Modellbildung hingenommen, weil eine hohe Komplexität der 3D-Modelle nur kostspielig in Echtzeit umzusetzen ist. Die Bilder erreichen daher meist nicht die Qualität der realistischen Bildsynthese. Verwendung finden Animationen in der Werbe- und Filmindustrie und zur Erzeugung von hochwertigen Spezialeffekten.

---

## 1.3 Vorschau

Bevor überhaupt etwas auf dem Bildschirm dargestellt werden kann, muss zuerst ein 3D-Modell verfügbar sein, entweder

- manuell erstellt durch den Anwender/Entwickler, oder
- generiert durch marktgängige Modellierungsprogramme, oder
- automatisch abgeleitet aus Messdaten, oder
- ergänzt/modifiziert aus Datensätzen von Berechnungsprogrammen.

Eine realistische Darstellung von 3D-Modellen auf einer 2D-Projektionsfläche erfordert außerdem geeignete Beleuchtungs- und Reflexionsmodelle. Darin können diverse Komponenten einfließen, wobei jede zusätzliche die Modellierungsgenauigkeit verbessert und die Rechenzeit erhöht. Die wesentlichen Komponenten sind:

- ambiente Lichtquellen für indirekte Beleuchtung.
- Richtungslichtquellen leuchten in eine bestimmte Richtung, z. B. Sonne.



- Punktlichtquellen sind mehrfach im Raum platziert, strahlen in alle Richtungen.
- Spotlichtquellen mit einem beschränkten Abstrahlwinkel.
- Lichtquellen allgemein,  
fest angeordnet ergeben feste Schatten,  
bewegliche Lichtquellen ergeben bewegliche Schatten.

Licht aus einer Richtung erzeugt Schatten hinter beleuchteten Objekten, Streulicht kommt aus allen Richtungen. Die zunehmende Entfernung zwischen beleuchtetem Objekt und Lichtquelle sowie zwischen Objekt und Betrachter führt zur Abnahme der Lichtintensität.

Für die Lichtverteilung sind zum Teil auch die Eigenschaften der Facetten-Oberflächen verantwortlich, sie haben u. a. Einfluss auf:

- diffuse Reflexion
- Spiegelung
- Transparenz und Transmission

Von der Qualität der Modellierung und dem gewählten Beleuchtungsmodell hängt die erreichbare Qualität der Grafik ab. Der numerische Aufwand zu ihrer Erzeugung reicht von „einfach und gering“ bis „kompliziert und rechenintensiv“, wobei die Rechenzeiten durchaus zwischen dem 1- bis 100-Fachen liegen in der Abfolge dieser Modelle:

- Liniengrafik oder Drahtmodell: Hier werden nur die Kanten der Facetten dargestellt. Die zwischen den Kanten liegenden Oberflächen werden ignoriert, sodass man im gleichen Bild sowohl ‚vordere‘ als auch ‚hintere‘ Kanten sieht. Die aufwendige Lösung der Verdeckung von Teilbereichen durch Facetten entfällt.
- Facettenmodell ohne Beleuchtung: Wie oben; zusätzlich wird die Verdeckung von Teilbereichen durch Facetten ermittelt. Nur die sichtbaren Facetten werden dargestellt und eingefärbt.
- Facettenmodell mit punktförmiger Beleuchtung (Sonne, Scheinwerfer): Wie oben; zusätzlich sind die Koordinaten der Lichtquelle und die Grundfarben der Facetten erforderlich. Damit wird die Farbintensität der Oberflächen abhängig von der Beleuchtungsrichtung berechnet. Ermittlung der Schattenbereiche.
- Facettenmodell mit gemischter Beleuchtung (Radiosity): Wie oben; zusätzlich sind Daten über die Oberflächen der Facetten erforderlich und Angaben zu ambienten Lichtquellen und Streulicht. Berechnet werden die Lichtverteilung und Farbintensität der Oberflächen, der Verlauf des reflektierten Lichtes, die Schattenbereiche.
- Facettenmodell mit gemischter Beleuchtung als Reflexionsmodell (RayTracing): Wie oben; zusätzlich sind Daten zum Reflexionsvermögen der Facetten-Oberflächen erforderlich. Berechnet werden: die Farbintensität der Oberflächen, Verlauf und Verteilung des reflektierten Lichtes, die Schattenbereiche. Hinzu kommen ggf. noch Spezialeffekte wie Nebel oder Rauch.

**Abb. 1.11** Grafische Animation von Ballflug und Abdruck beim Tennis



Abschließend sei nochmals auf das Thema **Animationen** eingegangen: In der Videotechnik bei Film und Fernsehen werden zunehmend reale Bilder mit Elementen der Computergrafik verbunden. Seit ca. 2005 laufen bei einigen TV-Anbietern Versuche, Produktionen aus mehreren Kameraperspektiven aufzunehmen, von denen der Betrachter zu Hause sich interaktiv selbst eine auswählen kann. Die Kamerapositionen sind dabei allerdings schon während der Aufnahme festgelegt, der Betrachter hat darauf keinen Einfluss. Im Grunde werden also nur zwei oder drei zwar unterschiedliche aber ansonsten herkömmliche Videobilder gesendet, die man sich mit einem zugehörigen Decoder auswählen kann.

Einen großen Schritt weiter in kombinierter Videotechnik und Computergrafik ist man im Tennis. Bei strittigen Entscheidungen besteht auf einigen großen Tennisanlagen seit ca. 2007 die Möglichkeit, den Ball-Flug grafisch zu überprüfen. Hierzu erfolgen Bildanalysen der Aufnahmen von bis zu 10 Videokameras die dann mittels Computergrafik beim Sender zu einer einzigen Animation synthetisiert werden und den Ballflug sowie seinen Abdruck an der ‚Aus‘-Linie zeigt. Die fertige Animation wird als ganz normale, herkömmliche Videosequenz gesendet.

Angesichts solcher Möglichkeiten und bei der heutigen digitalen Fernsehtechnik wird sicher auch bald der Wunsch des Fernsehzuschauers (oder der Fernsehmacher) realisiert, jede Szenerie aus seinem individuellen Standpunkt zu betrachten. Richtet man beim Tennis das Augenmerk nur auf den Ball, so müssen bei einer TV-Produktion die Videobilder aller Kameras gesendet werden, um daraus die zum individuellen Standpunkt des Betrachters passende szenische Darstellung berechnen zu können, sofern das zum gewählten Standpunkt überhaupt möglich ist. Der rechentechnische Aufwand ist ganz erheblich und muss beim Betrachter vor Ort erbracht werden. Die für diese Technik erforderlichen neuen TV-Geräte mutieren dann zu leistungsstarken Grafik-PCs – oder auch umgekehrt: Ein PC wird zum Kern der Fernsehgeräte.

Wir sehen mit beiden Augen und unser Gehirn verarbeitet beide leicht versetzte Bilder zu einem einzigen. Mit diesem räumlichen Eindruck sind wir in der Lage, den Abstand von Objekten mühelos einzuschätzen. Ist jedoch ein Auge abgedeckt, ist es viel schwerer, die Entfernung richtig einzuschätzen. Nur unsere Erfahrung über die ungefähren Abstände zu den Dingen verhindert dann größere Fehler, z. B. beim Greifen einer Tasse.

Die bildliche Darstellung von Szenerien ist so alt wie die Menschheit. Schon die Künstler der Antike bemühten sich, mittels Raumtiefe und Verkürzungen die Szenerien realistisch darzustellen, doch ohne bis ins letzte Detail ausgeführte Perspektivkonstruktionen. In Pompeji fand man Wandfresken mit Darstellungen, in denen die Wohnräume mit einem gemalten Garten verbunden waren. In der antiken Tafelmalerei gab es anfangs rein plakative szenische Darstellungen. Erst mit Giotto (G. di Bondone, 1266(?)–1337, italienischer Maler) setzte die räumlich-illusionistische Erfassung der Realität ein.

In der fünften Novelle des sechsten Tages rühmt Giovanni Boccaccio (1313–1375) in seinem „Decamerone“ die malerischen Fähigkeiten Giottos:

**„Giotto [...] war mit so vorzüglichen Talenten begabt, daß die Natur [...] nichts hervorbringt, was er mit Griffel, Feder oder Pinsel nicht dem Urbild so ähnlich darzustellen gewußt hätte, daß es nicht als Abbild, sondern als die Sache selbst erschienen wäre, weshalb denn der Gesichtssinn der Menschen nicht selten irregeleitet ward und für wirklich hielt, was nur gemalt war. Er ist es gewesen, der die Kunst wieder zu neuem Lichte erhoben hat, nachdem sie Jahrhunderte lang wie begraben unter den Irrtümern derer lag, die durch ihr Malen mehr die Augen der Unwissenden zu kitzeln, als der Einsicht der Verständigen zu genügen, bestrebt waren.“**

Mit Anwendung der Zentralprojektion durch Brunelleschi (ca. 1420) und Masaccio wurde diese Entwicklung fortgesetzt. Leonardo da Vinci (1452–1519) und Al-

brecht Dürer (1471–1528) haben die Zentralprojektion – auch Zentralperspektive genannt – später angewandt und beschrieben. Leonardo untersuchte erstmals die Ursachen der Nah- und Fernwirkung von Farben und die Auflösung der Konturen. Heute sind beide Aspekte als Luft- und Farbperspektive bekannt.

---

## 2.1 Perspektive

*Perspektive ist eine Technik zur Vermittlung eines räumlichen Eindrucks durch ein Bild auf einer Fläche, in dem dreidimensionale Objekte und Szenen so dargestellt werden, wie sie beim natürlichen Sehvorgang wahrgenommen würden.* [Lexi]

Die gesamte Computergrafik basiert im Grunde auf dem Sehen mit nur einem Auge. Dass dabei Informationen verlorengehen – siehe oben – ist leicht nachvollziehbar. Alle Bemühungen laufen darauf hinaus, den Informationsverlust für den Beobachter so gering als möglich zu halten. Die Einbeziehung von Perspektive gehört zu den wichtigsten Hilfsmitteln zur Vermittlung eines räumlichen Eindrucks.

Im Zusammenhang mit grafischen Darstellungen werden die Bezeichnungen „Perspektive“ und „Projektion“ häufig gleichbedeutend verwendet. In ihrer anderen Bedeutung beschreibt „Perspektive“ die Lebenssituation, Zukunftsaussicht oder Betrachtungsweise einer Sache. In diesem Sinne wurde in der Malerei der Antike die „Bedeutungsperspektive“ angewandt; s. u.

Die nachfolgende Übersicht ist kurzgefasst, Details werden anschließend bei den Projektionen nachgeliefert.

- **Bedeutungsperspektive**

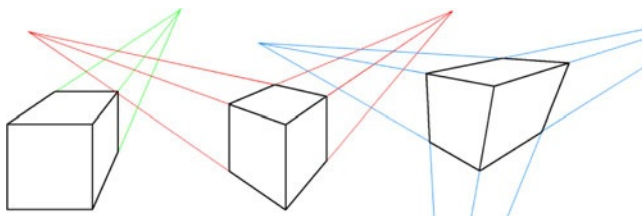
Die Bildkomposition wurde derart vorgenommen, dass die wichtigen Personen zentral und überproportional groß dargestellt wurden. Weitere Personen wurden gemäß ihrer Bedeutung in der Größe gestaffelt um die Obrigkeit herum platziert. Dies wurde auch dann angewendet, wenn ein Untergebener vor der Obrigkeit angeordnet ist und deshalb eigentlich größer als diese erscheinen müsste. Heute findet man diesen Begriff nur noch in der Kunstgeschichte.

- **Zentralperspektive**

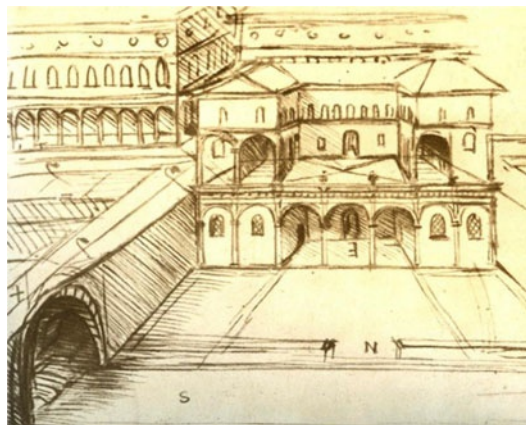
Bei der Zentralperspektive treffen sich parallele Kanten scheinbar in einem fernen Punkt am Horizont, dem Fluchtpunkt (Abb. 2.1). Nach der Anzahl der Fluchtpunkte unterscheidet man Einpunkt-, Zweipunkt- und Dreipunkt-Perspektiven.

Ein schönes Beispiel einer Perspektive mit einem Fluchtpunkt in der Raumtiefe hat Leonardo da Vinci gezeichnet (Abb. 2.2).

Und auch im Kunsthandwerk der alten Meister findet man Beispiele mit perspektivischen Darstellungen, wie z. B. die schmiedeeiserne Tür aus dem Jahre 1664 im Dom St. Peter zu Osnabrück (Abb. 2.3).



**Abb. 2.1** Einpunkt-, Zweipunkt- und Dreipunkt-Perspektive



**Abb. 2.2** Beispiel einer Perspektive mit einem Fluchtpunkt in der Raumtiefe

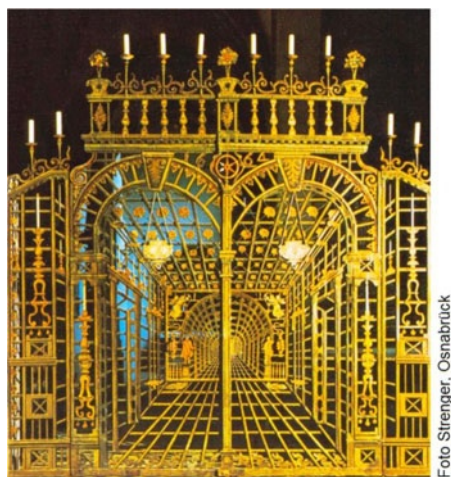


Foto Strenger, Osnabrück

**Abb. 2.3** Schmiedeeiserne Tür aus dem Jahre 1664 im Dom St. Peter zu Osnabrück

- Froschperspektive und Vogelperspektive  
Ergeben sich durch eine besondere Lage des Horizonts.
- Parallelperspektive (ein Begriff der Architektur)  
Parallele Kanten verlaufen in der parallelperspektivischen Darstellung gleichfalls parallel, laufen also nicht in einem Fluchtpunkt zusammen. Es wird unterschieden, ob die Projektionsstrahlen senkrecht oder schief auf die Projektionsfläche treffen.
- Zu den parallelperspektivischen Darstellungen gehören die isometrische, die dimetrische und die trimetrische Darstellung.
- Kavalierperspektive,
  - Kabinettperspektive und
  - Militärperspektive

sind allesamt schiefe Parallelprojektionen, die sich nur durch unterschiedliche Projektionswinkel und Verkürzung ihrer Seiten unterscheiden.

- Luftperspektive  
Bei der Luftperspektive wird der Tiefeneindruck dadurch verstärkt, indem man den Kontrast vom Vorder- zum Hintergrund abschwächt, die Helligkeit aber steigert. Dabei entsteht durch die nach hinten undeutlicher werdenden Konturen ein Scharf/Unscharf-Effekt.
- Farbperspektive  
Sorgt ebenfalls für einen besseren Tiefeneindruck, indem im Vorder-, Mittel- und Hintergrund unterschiedliche Farbtöne dominant eingesetzt werden.
- Umgekehrte Perspektive (inverse perspective mapping)  
Bei fotografischen Abbildungen kann man die dort vorhandene Perspektive – z. B. die „stürzenden Linien“ in der Architektur – durch eine mathematischen Transformation kompensieren, sodass parallele Linien wieder parallel erscheinen und die ursprünglichen Proportionen wieder zurückgewonnen werden.

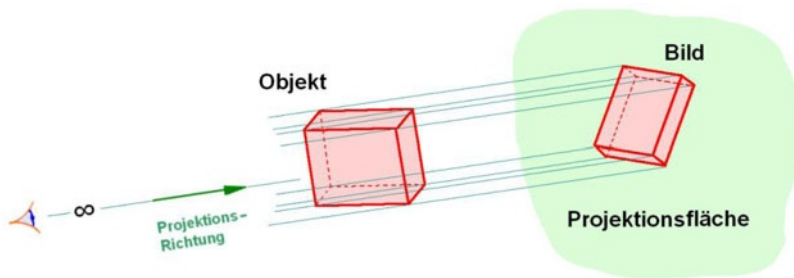
Einige dieser Perspektiven resp. Projektionen sind eher „Konstruktionen“ für den Zeichentisch und können auch ohne Computerprogramm mühelos mit den üblichen Zeichenwerkzeugen nach gegebenen Normen erzeugt werden.

---

## 2.2 Projektion

*Projektion ist die Abbildung eines geometrischen Objektes auf ein Gebilde niedrigerer Dimension. [Lexi]*

In der Computergrafik sind die am häufigsten benutzten Projektionsarten die Zentral- und die Parallelprojektion. Die Zentralprojektion entspricht eher dem natürlichen Sehen, weil die Objekte mit zunehmender Entfernung immer kleiner dargestellt werden. Nachteilig ist, dass Winkel nicht erhalten bleiben und folglich die



**Abb. 2.4** Projektionsstrahlen bei der Parallelprojektion

Maßhaltigkeit nicht stimmt. Diese Projektionsart eignet sich besonders für Simulationsanlagen und für Computerspiele. Die Parallelprojektion hat den Vorteil, dass sie Winkeltreu ist, dass also die Winkel auch in der Projektion erhalten bleiben. Nachteilig ist, dass man im fertigen Bild nicht unterscheiden kann, ob ein Gegenstand in der ursprünglichen 3-D-Welt weiter vorne oder weiter hinten lag.

### 2.2.1 Parallele oder Parallelprojektion

*Spezielle Form der Projektion, bei der die Projektionsstrahlen aus einem im Unendlichen liegenden Projektionszentrum kommen und deshalb parallel verlaufen. Bei der Parallelprojektion liefern parallele Kanten im Original auch parallele Kanten im Bild. Durch entsprechende Wahl der Beobachterposition ergeben sich spezielle Darstellungen wie die Isometrie oder Dimetrie. [Lexi]*

Man unterscheidet bei der Parallelprojektion wie die Projektionsstrahlen auf die Projektionsebene treffen (Abb. 2.4):

- *Schiefe Projektion*

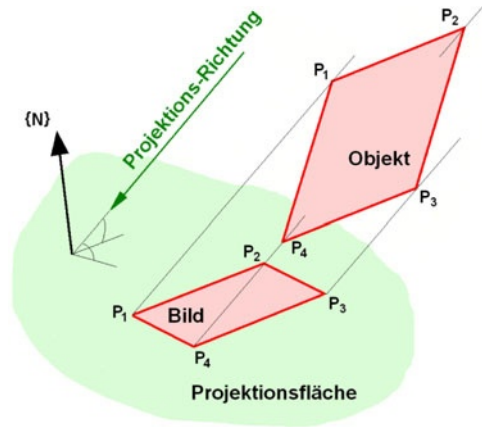
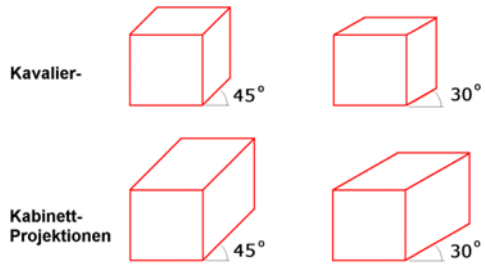
Die Projektionsstrahlen treffen in einem beliebigen Winkel auf die Projektionsebene, d. h., der Normalenvektor  $\{N\}$  der Projektionsebene ist nicht parallel zur Projektionsrichtung (Abb. 2.5).

Würde man dieses Viereck noch etwas drehen, ließe sich auch mit einer orthografischen Projektion das gleiche Bild erzeugen. Interessant wird diese Projektionsart in Zusammenhang mit Lichtquellen, die die Szenerie beleuchten. Die daraus entstehenden Schatten sind dann für jede Lichtquelle gesondert zu berechnen und im Gesamtbild darzustellen.

Neben dieser allgemeinen Projektion gehören hierher zwei weitere, die in der Computergrafik allerdings wenig gebräuchlich sind (Abb. 2.6). Beide werden bevorzugt beim technischen Zeichnen angewandt.

- *Kavalierprojektion*

Belegt wurde diese Art der Darstellung durch den Mathematiker Bonaventura Francesco Cavalieri (1598–1647, italienischer Mönch, Mathematiker und

**Abb. 2.5** Schiefe Projektion**Abb. 2.6** Kavalier- und Kabinettprojektionen

Astronom). Er arbeitete auf dem Gebiet der Geometrie und lehrte in Bologna. Seine Berechnungen von Oberflächen und Volumina nahmen Methoden der Infinitesimalrechnung voraus.

Die Kanten der Flächen, die parallel zur Projektionsebene liegen, bleiben unverkürzt. Nur die in die Tiefe verlaufenden Kanten verkürzen sich um die Hälfte. Es gelten somit die Seitenverhältnisse 1 : 1 : 0,5.

– *Kabinettprojektion*

Die senkrecht zur Projektionsebene verlaufenden Strecken werden unverkürzt dargestellt.

- *Senkrechte bzw. orthografische Projektion*

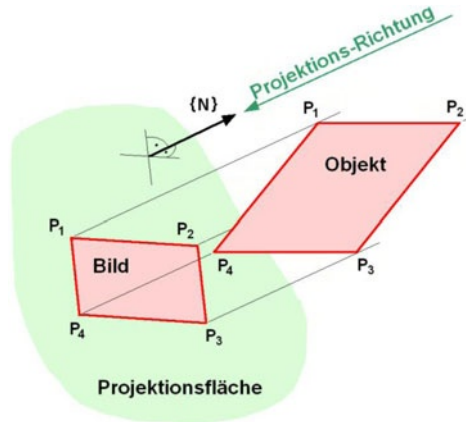
Die Projektionsstrahlen treffen senkrecht auf die Projektionsebene, der Normalenvektor  $\{N\}$  der Projektionsfläche ist also parallel zur Projektionsrichtung. Die orthografische Parallelprojektion liefert absolut maßgetreue Bilder von räumlichen Objekten (Abb. 2.7).

- *3-Tafel-Projektionen*

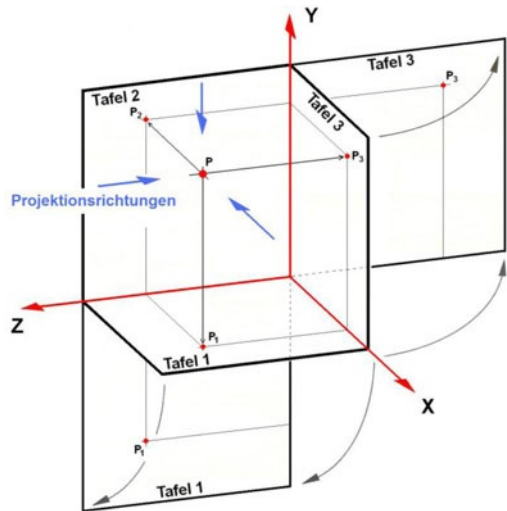
Die Projektionsstrahlen sind parallel zu den 3 Koordinatenrichtungen. Die 3 Zeichenebenen werden von jeweils 2 Koordinatenachsen gebildet, z. B. Tafel 2 von der Y-Z-Ebene. Die Tafeln 1 und 3 werden gedanklich aufgeklappt und



**Abb. 2.7** Senkrechte bzw. orthografische Projektion



**Abb. 2.8** 3-Tafel-Projektion



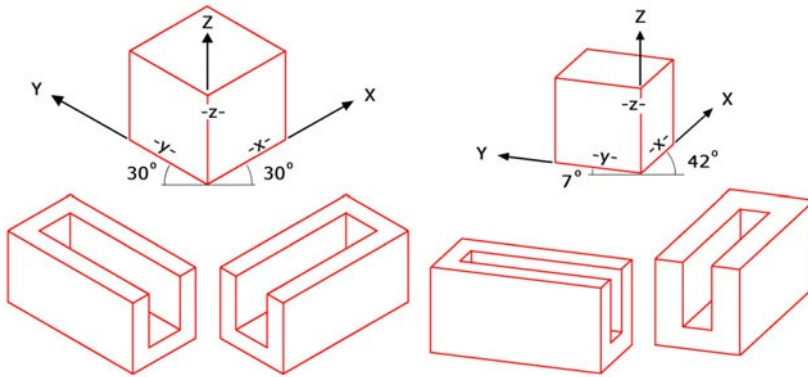
zusammen mit Tafel 2 in einer Zeichenebene dargestellt (Abb. 2.8). Dies ist gängige Praxis im technischen Zeichnen; sowohl manuell als auch mit CAD-Programmen.

- *Axonometrische Projektionen*

Die Zeichenebene ist nicht parallel zu einer der 3 Koordinatenebenen. Hier wird weiter in drei Kategorien bezüglich der Projektionswinkel mit den Koordinatenachsen differenziert:

- *Isometrisch*

Die Winkel zwischen der Projektionsrichtung und den drei Koordinatenachsen sind gleich,  
die Skalierung für alle drei Achsen ist einheitlich, d. h.,



**Abb. 2.9** Isometrische und dimetrische Darstellung

die Abmessungen des Objekts werden im gleichen Maßstab dargestellt und senkrechte Kanten der Z-Richtung bleiben senkrecht (Abb. 2.9).

– *Dimetrisch*

Die Winkel zwischen der Projektionsrichtung und nur zwei Koordinatenachsen sind gleich,

die Skalierung für alle drei Achsen ist unterschiedlich, senkrechte Kanten der Z-Richtung bleiben senkrecht und dies ermöglicht verschiedene Darstellungsvarianten (Abb. 2.9).

– *Trimetrisch*

Beliebige Winkel zwischen der Projektionsrichtung und den Koordinatenachsen und

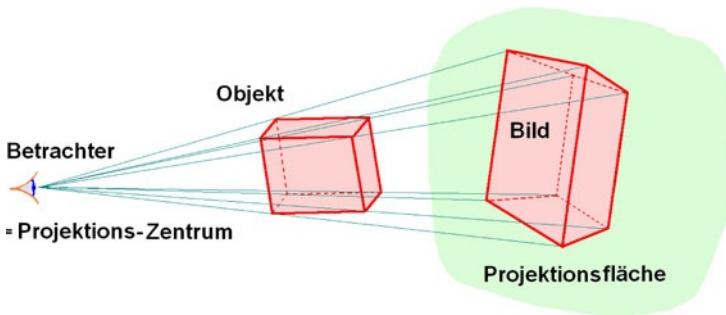
die Skalierung ist beliebig.

## 2.2.2 Perspektivische oder Zentralprojektion

*Projektion, bei der die Projektionsstrahlen von einem endlichen Projektionszentrum in Form eines Geradenbüschels ausgehen und ein Bild auf der Projektionsebene an den jeweiligen Durchstoßpunkten erzeugen. Auch Zentralperspektive oder nur Perspektive genannt. [Lexi]*

Das am häufigsten genutzte Element der Perspektive sind Fluchtpunkte, in denen sich in der zweidimensionalen Darstellung solche Geraden schneiden, die in der dreidimensionalen Szene parallel verlaufen. Damit verbunden ist, dass Objekte mit wachsender Entfernung von der Beobachterposition in der Darstellung immer kleiner werden (perspektivische Verkürzung).

Bei der einfachsten Perspektive laufen alle Projektionsstrahlen in einem Punkt zusammen. Dieser Fluchtpunkt ist der Standpunkt des Beobachters resp. das Projektionszentrum. Weil dieses in endlicher Entfernung vom Objekt liegt, sind die Projektionsstrahlen nicht parallel (Abb. 2.10).



**Abb. 2.10** Perspektivische oder Zentralprojektion

Wenn der Abstand der Bildebene vom Projektionszentrum vergrößert wird, vergrößert sich auch die Abbildung maßstabsgerecht. Bei Punkten, die auf dem gleichen Projektionsstrahl liegen, wird nur der dem Projektionszentrum nächst gelegene gesehen. Alle anderen sind hinter diesem verdeckt.

Diejenige Senkrechte auf der Bildebene, die gleichzeitig durch das Projektionszentrum geht, ist die Bildachse. Auf der Bildachse ist das Bild unverzerrt. Je weiter Projektionsgeraden von der Bildachse abweichen, desto größer wird die Verzerrung, d. h., Kanten werden verkürzt und Oberflächen verzerrt dargestellt.

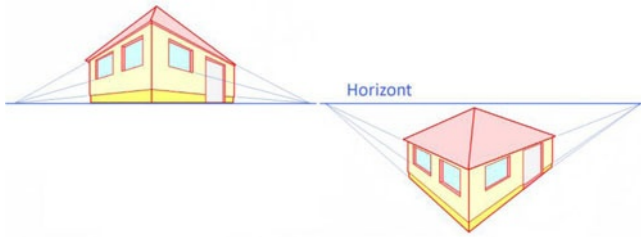
Typische Anwendungen finden sich z. B.

- in der Fotografie beim Entzerren von Schrägaufnahmen (stürzende Linien in der Architektur),
- in der Fotogrammetrie bei der Auswertung und Ausmessung von Luftbildern und
- in der Kartografie für Kartennetzentwürfe (gnomonische Projektion).

Besonders in der Architektur werden beide Perspektiven eingesetzt. Hierbei spielen die waagerechten, zur Grundebene parallelen Ebenen (Höhenebenen) eine besondere Rolle. Die durch das Projektionszentrum verlaufende Höhenebene schneidet die Bildebene im Horizont. Liegt der Horizont der Bildebene relativ zum Objekt sehr tief, so spricht man von einer *Froschperspektive*, liegt er sehr hoch, von einer *Vogelperspektive* (Abb. 2.11).

### 2.2.3 Zusammenfassung der Projektionsarten

- Parallele oder Parallelprojektion.
  - Senkrechte bzw. orthografische Parallelprojektion: Die Projektionsstrahlen treffen senkrecht auf die Projektionsebene.
    - \* 3-Tafel-Projektion: Die Zeichenebene ist parallel zu einer der Koordinatenebenen.



**Abb. 2.11** Frosch- und Vogelperspektive

- \* Allgemeine Projektionen.
- \* Axonometrische Projektionen: Die Zeichenebene ist nicht parallel zu einer der drei Koordinatenebenen.
  - isometrisch,
  - dimetrisch und
  - trimetrisch.
- Schief: Die Projektionsstrahlen treffen schief auf die Projektionsebene.
  - \* Allgemeine Projektionen,
  - \* Kavalierprojektion und
  - \* Kabinettprojektion.
- Perspektivische oder Zentralprojektion: Die Projektionsstrahlen konvergieren und laufen zusammen in
  - 1, 2 oder 3 Fluchtpunkten,
    - \* Frosch- und
    - \* Vogelperspektive.

## 2.3 Stereoprojektion

Eine grundlegend andere Methode, dem Beobachter die räumliche Darstellung zu vermitteln, ist die Stereoskopie. Dabei werden zwei nahezu gleiche Bilder erzeugt („stereo pairs“ = stereoskopische Halbbilder), deren Projektionen sich nur durch das leicht horizontal verschobene Projektionszentrum – dem Auge – unterscheidet. Diese Verschiebung entspricht dem durchschnittlichen Augenabstand eines Menschen. Jedes Auge nimmt jeweils ein geringfügig unterschiedliches Bild auf, die erst im Gehirn zu einem einzigen dreidimensionalen Bild verschmolzen werden und erst dann die Tiefenwahrnehmung ermöglicht.

Aus Sicht der Computergrafik bedeutet dies nur, dass dieselbe Szene mit zwei leicht unterschiedlichen Projektionszentren berechnet werden muss. Außer einem größeren Rechenaufwand ergibt sich daraus nichts prinzipiell Neues. Das eigentliche Problem ist, wie man beiden Augen gleichzeitig unterschiedliche Bilder präsentiert. Hierzu Weiteres im Abschn. 8.7.

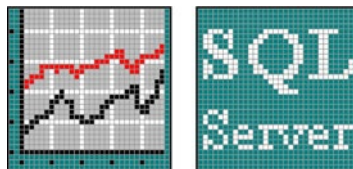
*Eine Rastergrafik ist aus einzelnen kleinen Flächenelementen (Bildelementen) zusammengesetzt, die ihrerseits unterschiedlich gefärbt bzw. mit verschiedenen Grauwerten belegt sein können und ein Raster bilden.*

*Eine Vektorgrafik ist aus grafischen Primitiven wie Linien, Kreisen, Polygonen oder allgemeinen Kurven (Splines) zusammengesetzt. [Lexi]*

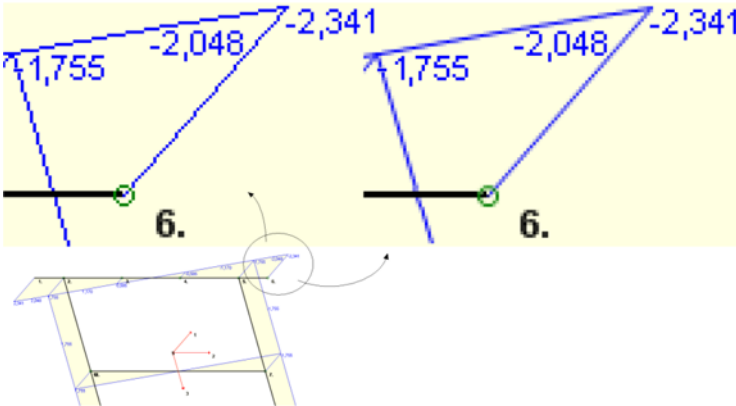
## 3.1 Rastergrafik

Rastergrafiken werden in einem Raster aus einzelnen Bildpunkten (Pixel) erzeugt, von denen jedes einzelne unterschiedlich gefärbt sein kann, z. B. Bitmaps und digitale Bilder. Mit dem Betriebssystem wird die Größe der Pixel-Matrix für den ganzen Bildschirm – im Rahmen seiner technischen Möglichkeiten – ein- oder umgestellt. Je feiner diese Einstellung gewählt wurde (je mehr Pixel auf der verfügbaren Fläche vorhanden sind), umso kleiner werden vorgefertigte Grafiken dargestellt, beispielsweise die Icons in Abb. 3.1.

Bezüglich seiner Größe ist eine Rastergrafik daher an diejenige Pixelmatrix gebunden mit der sie erstellt wurde; in obigen Beispielen jeweils in einer  $32^2$  Pixelmatrix. Bei Darstellung auf einem anderen Ausgabegerät mit einer anderen Auflösung können sich merkbare Unterschiede ergeben.



**Abb. 3.1** Beispiele für Icons



**Abb. 3.2** „Treppeneffekt“ bei Vergrößerung

Der große Vorteil von Rastergrafiken besteht darin, dass flächenhafte Darstellungen viel leichter erzeugt werden können. Dies geschieht durch Einfärben aller Pixel innerhalb einer Berandung. **GDI+** stellt hierfür verschiedene grafische Grundobjekte zur Verfügung, wie Linien, Polygone, Kreise, Ellipsen und andere Kurven. Zur Füllung der Flächen werden **Floodfill**-Algorithmen verwendet. Eine realistische Darstellung von komplexen Szenarien lässt sich nur durch farbliche Differenzierung ihrer Oberflächen (Facetten) erreichen, mit denen die Szenerie modelliert wurde. Die Vektorgrafik ist hierfür nicht besonders gut geeignet.

Allerdings leiden Rastergrafiken an Darstellungsproblemen wie dem Treppeneffekt, der ein Ergebnis der begrenzten Bildauflösung (Pixelanzahl) ist. Dieser Nachteil ist prinzipiell nicht zu vermeiden. Besonders bei kleinen Schriftzeichen ist dies ein Problem. Methoden, die die als Folge der Rasterung auftretenden unerwünschten Effekte abzuschwächen suchen, werden **Antialiasing** genannt. Der Treppeneffekt lässt sich deutlich reduzieren, wenn auch die ein Pixel umgebenden Bildregion in die Rasterung mit einbezogen wird. Selbst kleine Details fließen so in die Farbe eines Pixels ein, auch wenn diese zwischen zwei Pixeln liegen sollten.

In Abb. 3.2 ist der eingekreiste Ausschnitt in zwei Vergrößerungen dargestellt: links ohne, rechts mit Aktivierung der Antialiasing-Funktion. Die Linien sind nicht glatt durchgezogen, sondern punktweise aneinander gereiht. Durch eine höhere Auflösung, also kleinere und mehr Pixel im Darstellungsbereich, kann die Grafik soweit verbessert werden, dass dieser Nachteil optisch kaum noch sichtbar ist. In der Vergrößerung sieht die Grafik mit Antialiasing-Effekt eher noch unruhiger aus als ohne diesen. Bei normaler 1 : 1-Betrachtung wirken die geraden Linien jedoch wesentlich glatter.

Auch zur Ausgabe von Computergrafiken auf Papier oder Folie kommen hauptsächlich Rastergrafik erzeugende Geräte zum Einsatz, wie z. B. Nadel-, Tintenstrahl- oder Laserdrucker. Für die Ausgabe von mittels CAD erstellten