

# Inhaltsverzeichnis

|                                                  |           |
|--------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Einführung</b>                             | <b>1</b>  |
| 1.1 Natürliche und virtuelle Welten              | 2         |
| 1.2 Computeranimation                            | 3         |
| 1.3 Virtuelle Realität                           | 4         |
| 1.4 Gliederung des Inhaltes                      | 6         |
| <b>2. Ein Apfel fällt vom Baum</b>               | <b>7</b>  |
| 2.1 Die Szene                                    | 8         |
| 2.1.1 Wie sieht die Szene aus ?                  | 8         |
| 2.1.2 Was passiert in der Szene ?                | 8         |
| 2.2 Die Physik                                   | 9         |
| 2.2.1 Massenpunkt                                | 10        |
| 2.2.2 Bewegung                                   | 10        |
| 2.2.3 Schwerkraft                                | 10        |
| 2.2.4 Reibung                                    | 11        |
| 2.2.5 Der Aufprall                               | 12        |
| 2.2.6 Rollen und Liegenbleiben                   | 13        |
| 2.3 Die Simulation                               | 14        |
| 2.3.1 Das Simulationsmodell                      | 14        |
| 2.3.2 Ablauf der Simulation                      | 15        |
| 2.3.3 Numerische Integration                     | 17        |
| 2.4 Die Visualisierung                           | 18        |
| <b>3. Dynamik starrer Körper</b>                 | <b>21</b> |
| 3.1 Starre Körper                                | 22        |
| 3.1.1 Geometrie und Koordinatensysteme           | 22        |
| 3.1.2 Masse und Massenmittelpunkt                | 24        |
| 3.1.3 Lineare Bewegung und Rotation              | 24        |
| 3.1.4 Arbeit, kinetische Energie und Impuls      | 25        |
| 3.1.5 Trägheitsmoment, Drehmoment und Drehimpuls | 26        |
| 3.1.6 Drehimpulssatz                             | 27        |
| 3.2 Zwei Körper                                  | 27        |
| 3.2.1 Berührung                                  | 28        |
| 3.2.2 Kollision oder Kontakt                     | 29        |

|           |                                                |           |
|-----------|------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.3     | Kontaktkräfte .....                            | 30        |
| 3.2.4     | Kontakte und Bewegung .....                    | 31        |
| 3.2.5     | Kollision .....                                | 32        |
| 3.3       | Kollisionserkennung .....                      | 35        |
| 3.3.1     | Kollisionszeitpunkt .....                      | 35        |
| 3.3.2     | Rechenaufwand .....                            | 36        |
| 3.3.3     | Hüllkörper und Objektgruppierungen .....       | 37        |
| 3.3.4     | Nutzung zeitlicher Kohärenz .....              | 38        |
| 3.3.5     | Raumbezogene Verfahren .....                   | 39        |
| 3.4       | Gesteuerte Dynamik .....                       | 40        |
| 3.4.1     | Zwangsbedingungen .....                        | 41        |
| 3.4.2     | Zwangskraft und inverse Dynamik .....          | 42        |
| 3.4.3     | Virtuelle Arbeit .....                         | 44        |
| 3.4.4     | Spezialeffekte in der Animation .....          | 45        |
| 3.4.5     | Raum-Zeit-Zwangsbedingung .....                | 45        |
| <b>4.</b> | <b>Kinematische Strukturen .....</b>           | <b>49</b> |
| 4.1       | Lampe, Arm, Körper .....                       | 50        |
| 4.2       | Gelenkverbindungen .....                       | 50        |
| 4.2.1     | Schiebegelenk .....                            | 51        |
| 4.2.2     | Drehgelenk .....                               | 52        |
| 4.2.3     | Kombinierte Gelenke .....                      | 53        |
| 4.3       | Kinematische Ketten .....                      | 53        |
| 4.3.1     | Vorwärtskinematik .....                        | 54        |
| 4.3.2     | Denavit-Hartenberg-Notation .....              | 55        |
| 4.3.3     | Inverse Kinematik .....                        | 56        |
| 4.3.4     | Numerische Lösung .....                        | 58        |
| 4.3.5     | Deutung und Berechnung der Jacobi-Matrix ..... | 59        |
| 4.4       | Dynamik .....                                  | 61        |
| 4.5       | Beispiel: Schreibtischlampe .....              | 62        |
| 4.5.1     | Aufbau .....                                   | 62        |
| 4.5.2     | Vorwärtskinematik .....                        | 63        |
| 4.5.3     | Inverse Kinematik .....                        | 65        |
| <b>5.</b> | <b>Deformierbare Objekte .....</b>             | <b>67</b> |
| 5.1       | Deformation .....                              | 68        |
| 5.2       | Elastodynamische Modelle .....                 | 69        |
| 5.2.1     | Lagrangesche Elastodynamik-Gleichung .....     | 70        |
| 5.2.2     | Elastische Energie .....                       | 71        |
| 5.2.3     | Beschreibung verschiedener Materialien .....   | 73        |
| 5.2.4     | Diskretisierung der Dynamikgleichung .....     | 73        |
| 5.2.5     | Eindimensionaler Feder .....                   | 75        |
| 5.3       | Masse-Feder-System .....                       | 77        |
| 5.3.1     | Das Prinzip .....                              | 77        |
| 5.3.2     | Konstruktionskriterien .....                   | 78        |

|           |                                              |            |
|-----------|----------------------------------------------|------------|
| 5.3.3     | Inelastische Verformungen .....              | 79         |
| 5.3.4     | Rotationsfeder .....                         | 79         |
| 5.4       | Partikelsystem .....                         | 80         |
| 5.4.1     | Partikeldynamik .....                        | 80         |
| 5.4.2     | Kräfte .....                                 | 81         |
| 5.4.3     | Anzahl von Partikeln .....                   | 82         |
| 5.4.4     | Hierarchie .....                             | 82         |
| 5.4.5     | Geometrie, Farbe und Rendering .....         | 82         |
| 5.5       | Wasserwellen und -spritzer .....             | 83         |
| 5.5.1     | Höhenfeldmodell .....                        | 84         |
| 5.5.2     | Explizite Wellenfunktionen .....             | 86         |
| 5.5.3     | Wasseroberfläche und externe Objekte .....   | 89         |
| 5.5.4     | Wasserspritzer und -schaum .....             | 90         |
| 5.5.5     | Rendering-Aspekte .....                      | 91         |
| <b>6.</b> | <b>Virtuelle Lebewesen .....</b>             | <b>93</b>  |
| 6.1       | Menschen, Tiere und Roboter .....            | 94         |
| 6.2       | Der Körper und das Bewegungssystem .....     | 95         |
| 6.2.1     | Skelett .....                                | 95         |
| 6.2.2     | Muskeln, Gewebe und Haut .....               | 96         |
| 6.2.3     | Gesichtsausdruck .....                       | 98         |
| 6.3       | Bewegungsbeschreibung und -simulation .....  | 99         |
| 6.3.1     | Ziel-orientierte Bewegungsbeschreibung ..... | 99         |
| 6.3.2     | Hierarchie der Bewegungssteuerung .....      | 99         |
| 6.3.3     | Bewegung der Gliedmaßen .....                | 100        |
| 6.4       | Selbständige Bewegungen .....                | 102        |
| 6.4.1     | Sensoren .....                               | 103        |
| 6.4.2     | Aktuatoren .....                             | 104        |
| 6.4.3     | Kontrollmechanismen .....                    | 105        |
| 6.5       | Sensor-Aktuator-Netzwerk .....               | 106        |
| 6.5.1     | Das Prinzip .....                            | 106        |
| 6.5.2     | Konstruieren eines SAN .....                 | 107        |
| 6.5.3     | Parametrisierung .....                       | 108        |
| 6.6       | Evolutionsmodell .....                       | 109        |
| 6.6.1     | Das Prinzip .....                            | 109        |
| 6.6.2     | Genotypen und Phänotypen .....               | 110        |
| 6.6.3     | Das Gehirn und Nervensystem .....            | 110        |
| 6.6.4     | Evolution .....                              | 111        |
| <b>7.</b> | <b>Virtuelle Welten .....</b>                | <b>115</b> |
| 7.1       | Alles, was dazu gehört .....                 | 116        |
| 7.2       | Die Szene .....                              | 117        |
| 7.2.1     | Visuelle Informationen .....                 | 117        |
| 7.2.2     | Spezielle Objekte für die Darstellung .....  | 118        |
| 7.2.3     | Objektverhalten .....                        | 120        |

|       |                                                     |     |
|-------|-----------------------------------------------------|-----|
| 7.2.4 | Struktur .....                                      | 121 |
| 7.2.5 | Relationen .....                                    | 122 |
| 7.2.6 | Objektklassen .....                                 | 123 |
| 7.2.7 | Benutzer und Benutzeraktionen .....                 | 126 |
| 7.3   | Das Geschehen .....                                 | 127 |
| 7.3.1 | Zwei Sichten .....                                  | 127 |
| 7.3.2 | Ereignisse und Aktionen .....                       | 128 |
| 7.3.3 | Sensoren, Bedingungen und Regelwerke .....          | 131 |
| 7.4   | Die Modellierung .....                              | 132 |
| 7.4.1 | Modellierungssprachen .....                         | 132 |
| 7.4.2 | Interaktive Modellierung .....                      | 134 |
| 7.4.3 | Simulationsgestützte Modellierung .....             | 136 |
| 7.5   | Simulation und Präsentation .....                   | 136 |
| 7.5.1 | Simulation .....                                    | 136 |
| 7.5.2 | Präsentation .....                                  | 138 |
| 7.5.3 | Zeit und Zeitintervalle .....                       | 138 |
| 8.    | <b>Beispiele</b> .....                              | 143 |
| 8.1   | Blockschieben .....                                 | 144 |
| 8.2   | Schnee .....                                        | 144 |
| 8.3   | Schreibtischlampe .....                             | 144 |
| 8.4   | Gallenblasenoperation .....                         | 145 |
| 8.5   | Wasserwellen und -spritzer .....                    | 145 |
| 8.6   | Menschenmodell .....                                | 145 |
| 8.7   | Virtuelle Lebewesen .....                           | 145 |
| 8.8   | Anwendungsperspektive: virtuelles Prototyping ..... | 146 |