



Virtuelle Realität Haptik

G. Zachmann
Clausthal University, Germany
cg.in.tu-clausthal.de



Nicht-visuelle Displays

- Haptik = Berührungs- und Kraftsinn (griech. *haptesthai* = berühren)
- *Force-Feedback* = Kraftrückkopplung
- Was wird dargestellt ("gerendert"):
 - Kräfte auf Hand / Arm des Users ausgeben
 - Oberflächenbeschaffenheit darstellen (rau, Maserung, Gummi, ...)
 - Formen darstellen (z.B. à la Nagelbrett)
Frage: wie liegt der neue Rasierer in der Hand?
- Anwendungsfelder:
 - Training in der minimalinvasiven Chirurgie (Arzt fühlt mehr, als dass er sieht)
 - Spiele? (erhöht Präsenz)
 - Industrie: Virtuelle Montagesimulation (verbessert *User-Performance* beim Greifen und Plazieren), Design (Fühlen der Oberfläche)

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation – WS 10/11 Haptik 2

Menschliche Haptik

- Taktile Information:
 - Sensoren in der Haut
 - Details einer Form, Textur, Reibungswiderstand, ...
 - *Human Factors* der Fingerkuppe:
 - 0.15 mm bei Position eines Punktes
 - 1 mm räumliche Auflösung (Trennung 2er Punkte)
 - Wahrnehmbarkeitsschwelle: 0.06 Mikron Grat, bzw. 2 Mikron Punkt
 - Zeitliche Auflösung: 1 kHz (vergl. Auge!)
- Kinaesthetische (propriozeptive) Information:
 - Sensoren in den Muskeln
 - Großräumige Form, Federwiderstand, ...
 - *Human Factors*:
 - 2 bzw. 1 Grad (Finger bzw. Schulter)
 - 0.5-2.5 mm (Finger)

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation – WS 10/11 Haptik 3

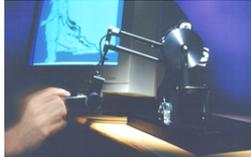
Panoptikum haptischer Geräte (*Force-Feedback*)



CyberForce



(movie)
Sarcos
(movie)



Phantom



CyberForce

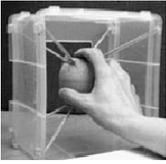


"Maglev"
(magnetic levitation device)



Tsukuba
(movie)





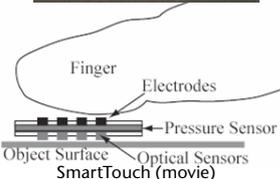
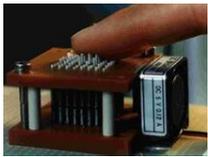
G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation – WS 10/11 Haptik 4



Two-Handed Multi-Fingers Haptic Interface Device: SPIDAR-8

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation – WS 10/11 Haptik 5

Taktile Displays



CyberTouch

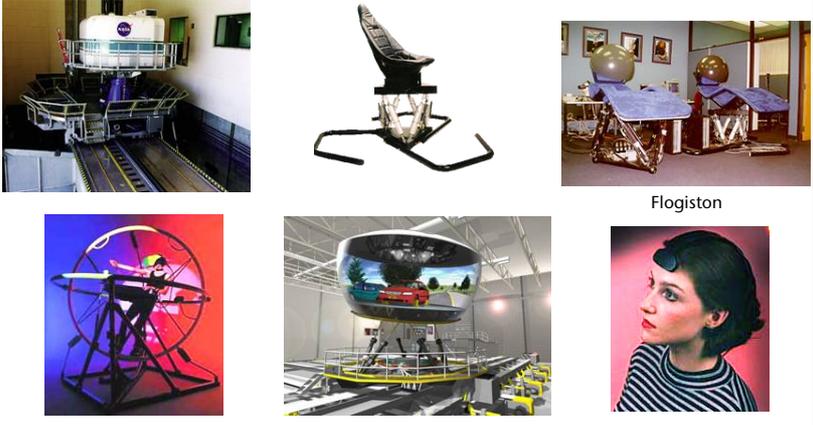
AURA INTERACTOR

Feellex

Finger Electrodes Pressure Sensor Object Surface Optical Sensors SmartTouch (movie)

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation – WS 10/11 Haptik 6

Andere Displays

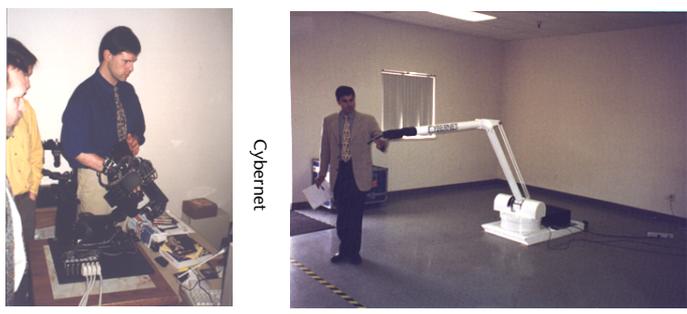


Flogiston

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation – WS 10/11 Haptik 7

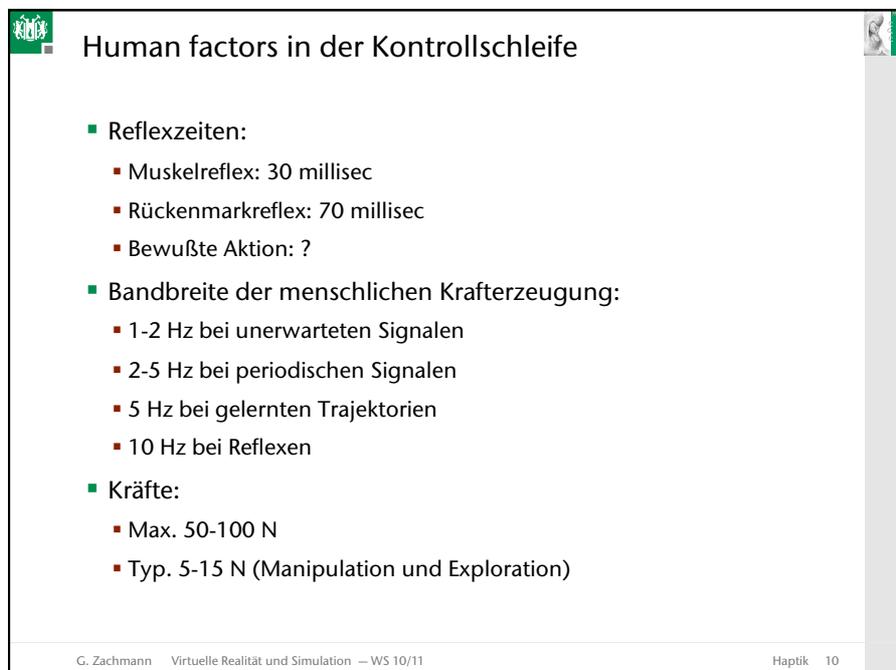
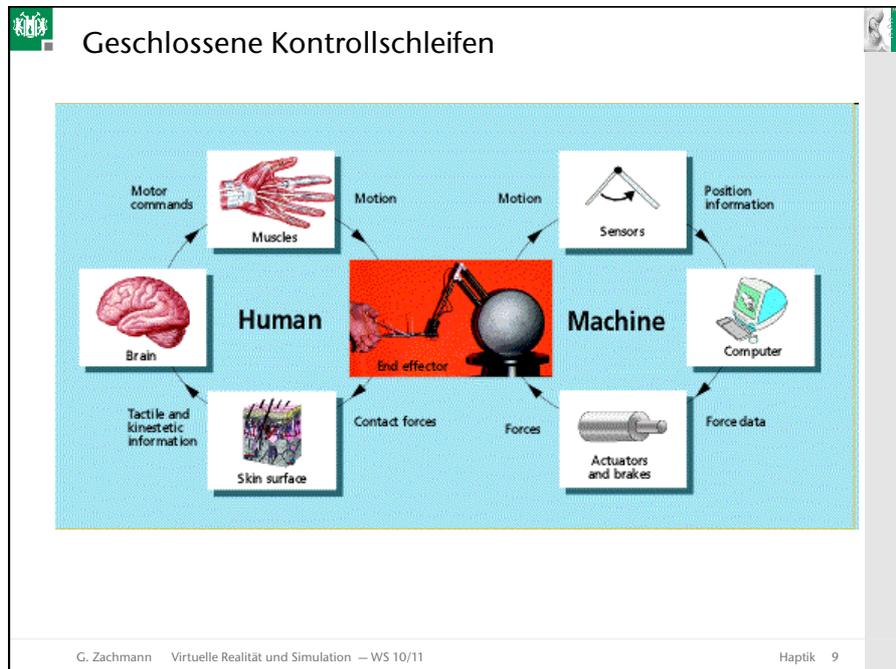
Freiheitsgrade

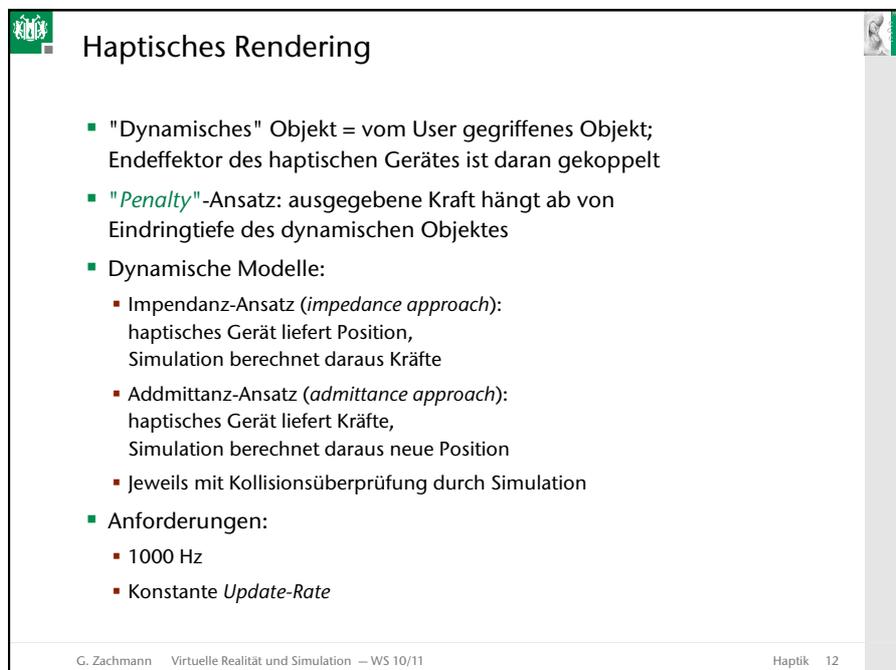
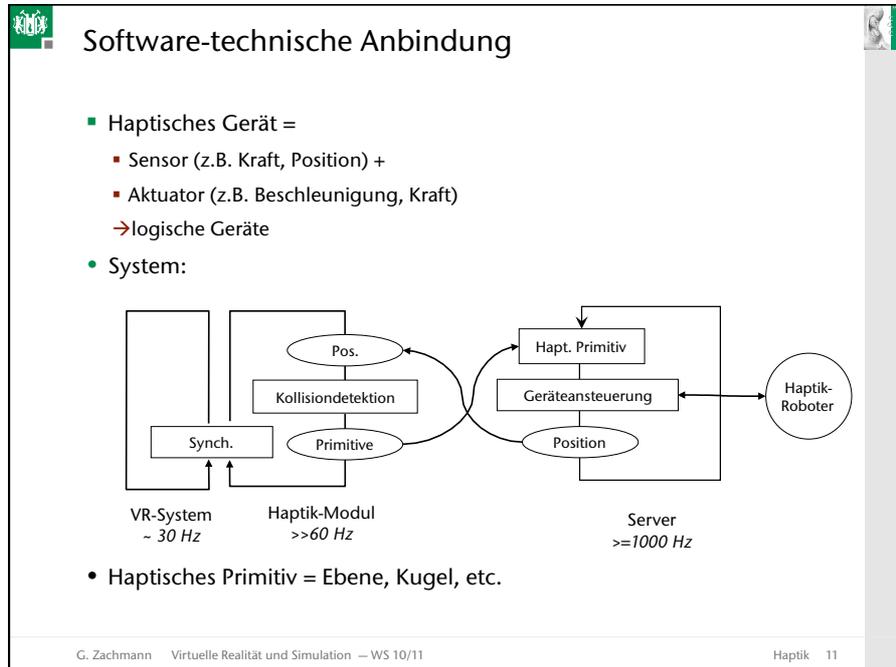
- Anzahl darstellbarer DOFs, typ. ≤ 6 bei *Force-Feedback*
- Anzahl innerer DOFs (~ Gelenke u.ä.)



Cybernet

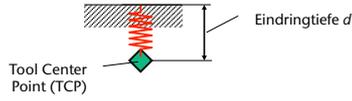
G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation – WS 10/11 Haptik 8

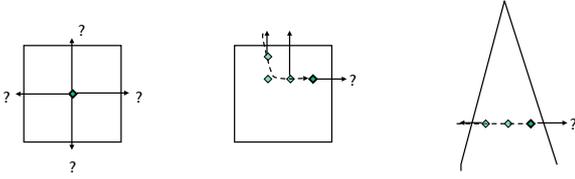




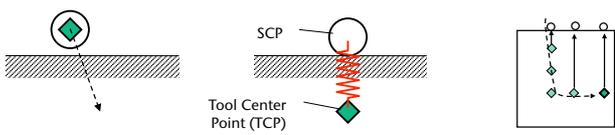
Surface Contact Point (nur 1 Punkt ...)

- Rückstellkraft über *Hooke'sches Gesetz*:

$$F = k \cdot d$$

- Frage: Welches ist die Eindringtiefe?
 - Naïve Methode: ordne jedem inneren Punkt eine Eindringtiefe und eine Rückstellrichtung zu
 - Problem: die Historie wird ignoriert



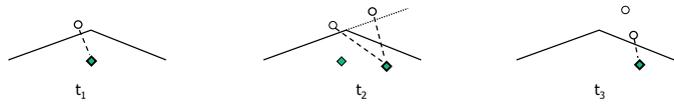
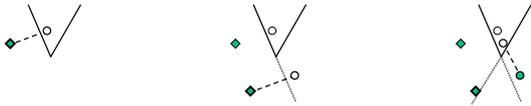
G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation – WS 10/11 Haptik 13

- Fazit: man braucht die Historie
- Idee: repräsentiere Historie als "Surface Contact Point" (SCP)
 
- Bestimmung der Constraints:

Iteriere max 3x:

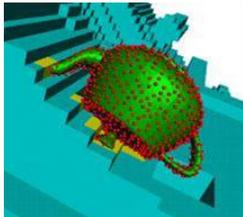
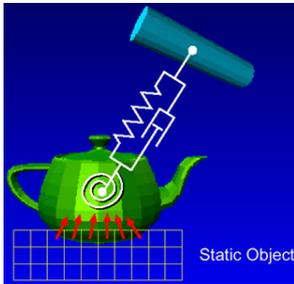
 - bestimme Polygon p , das $\overline{SCP^{t-1}TCP^t}$ schneidet;
 - bestimme SCP^t , das Abstand minimiert und auf $\text{support}(p)$ liegt;
 - wiederhole mit $TCP^t := SCP^t$
- Numerische Stabilität: SCP "anheben"
- Zeitliche Kohärenz → nur Polygone in der Nachbarschaft betrachten

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation – WS 10/11 Haptik 14

- SCP \mathbf{x} berechnen:
 minimiere $\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{TCP}}\|^2$
 unter den Bedingungen $\mathbf{n}_i \mathbf{x} - d_i = 0, \quad i \in [1, n], \quad n \leq 3$
 Lagrange'sche Multiplikatorenregel liefert triviales LGS, das man
 "festverdrahtet" lösen kann.
- Beispiel des Algos für eine konvexe Kante:

- Beispiel konkave Kante:


G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation – WS 10/11 Haptik 15

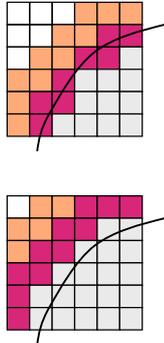
Voxels and Points (viele Punkte ...)

- Keine Polygone:
 - bewegtes Obj = Points
 - Rest der Szene = Voxels
- Generelle Idee:
 1. Bestimme Kräfte für alle eingedrungenen Punkte
 2. Bestimme Gesamtkraft für dynamisches Objekt
 3. Bestimme Kraft für haptisches Gerät

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation – WS 10/11 Haptik 16

Voxel-Map

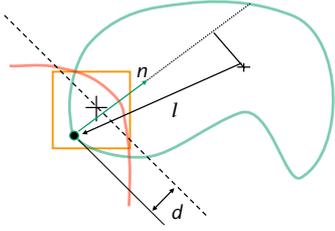
- Voxmap = Distanzfeld
- Erzeugung:
 - Scan-Konvertierung der Oberfläche → Voxel, die von Oberfläche geschnitten werden
 - Breadth-first search vom Rand des "Universums" → alle Voxel außerhalb
 - Restliche Voxel = innen
 - Berechne für jedes der inneren Voxel den minimalen Abstand zur Oberfläche
 - Alternative: Abstand von der Oberfläche nach innen propagieren mittels Chamfer-Methode



G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation – WS 10/11 Haptik 17

Kraft in 1 Punkt

- Kraft / Drehmoment aus 1 Punkt:
 - Richtung der Kraft = Punktnormale
 - Eindringtiefe = Abstand von Punkt zu Ebene durch Voxelmittelpunkt und Punktnormale
 - Kraft $\mathbf{F} = k_v \mathbf{n}$
 - Drehmoment $\mathbf{M} = \mathbf{l} \times \mathbf{F}$
- Warum nicht *Voxel-Normale*?
 - Richtung wäre nicht abhängig von Objekt-Rotation
 - Unstetigkeit auch in der Krafrichtung, wenn Objekt transliert



G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation – WS 10/11 Haptik 18

Die "virtuelle Kopplung"

- 6-DOF Feder/Dämpfer-System
- Kräfte zwischen Handle und dyn. Obj.:

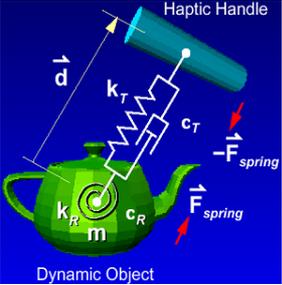
$$\mathbf{F} = k_T \mathbf{d} - c_T \mathbf{v}$$

$$\mathbf{M} = k_R \theta - c_R \omega$$

wobei

k_T, c_T = transl. Steifigkeit / Viskosität
 k_R, c_R = rot. Steifigkeit / Viskosität
 \mathbf{d}, θ = transl./rot. Auslenkung
 \mathbf{v}, ω = transl./rot. Geschwindigkeit

- Details:
 - Alle Vektoren im Handle-Koordinatensystem (oder dyn. Obj.)
 - Werte von \mathbf{v} nur die Komponente entlang \mathbf{d} aus
 - Setze Viskosität auf 0, falls \mathbf{v} vom Handle wegzeigt



G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation – WS 10/11 Haptik 19

Bewegung des dynamischen Objektes

- Gesamtkraft auf das dynamische Objekt

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_{Feder} + \frac{1}{N} \sum_{i=1 \dots N} \mathbf{F}_i$$

analog für die Drehmomente

- Integriere *Newton-Euler* Bewegungsgleichungen mit

$$\mathbf{F} = m \mathbf{a}$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{J} \alpha + \omega \cdot \mathbf{J} \omega$$

wobei

\mathbf{F}, \mathbf{M} = Kraft, Drehmoment im Schwerpunkt
 \mathbf{a}, α = Transl.-, Rot.-Beschleunigung
 m, \mathbf{J} = Masse, Trägheitstensor
 ω = Drehgeschwindigkeit

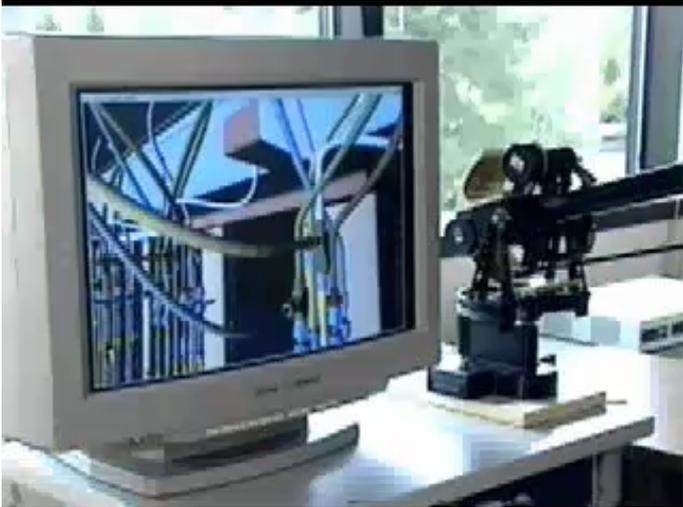
- Voraussetzung: konstantes Δt oder im voraus bekannt

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation – WS 10/11 Haptik 20

Algo Zusammenfassung

1. Kollision checken
2. Kräfte und Drehmomente aus jedem Punkt bestimmen
3. Gesamtkraft des dynamischen Objektes bestimmen
4. Neue Beschleunigungen für das dynamische Objekt bestimmen
5. Neue Position bestimmen
6. Kräfte für das haptische Gerät bestimmen

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation – WS 10/11 Haptik 21



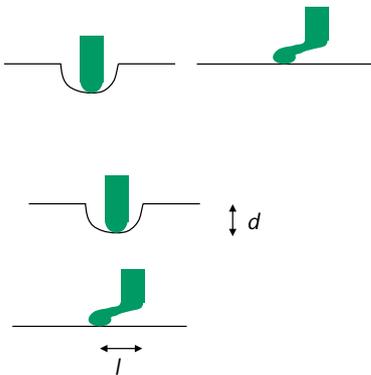
G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation – WS 10/11 Haptik 22

Reibung für 1 Punkt

- Modell:
 - Oberfläche = Membran
 - Tool = lateral flexibler Stift
- Kräfte:
 - Normal:

$$F_N = k_N \cdot d$$
 - Lateral:

$$F_L = k_L \cdot l$$
- Point of Attachment:
 - Punkt auf Oberfläche, wo Erstkontakt stattgefunden hat
 - Bzw., Kontaktpunkt mit realem Tool durch Simulation festgelegt

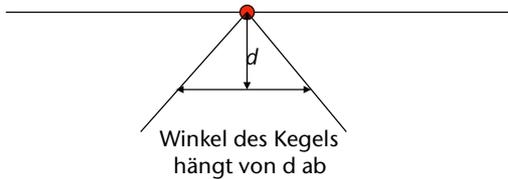


G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation – WS 10/11 Haptik 23

- Reibungskraft:

$$F_R = c_f \cdot F_N = c_f \cdot k_N \cdot d$$
- "Cone of friction":
 Übergang zwischen statischer Reibung und kinetischer Reibung

$$F_N > F_R \Leftrightarrow k_L \cdot l > c_f \cdot k_N \cdot d$$



Winkel des Kegels hängt von d ab

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation – WS 10/11 Haptik 24

