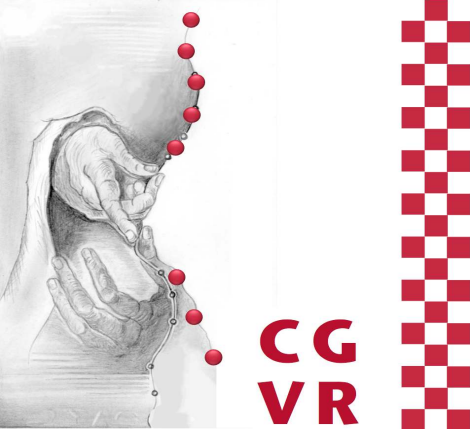




Computer-Graphik I

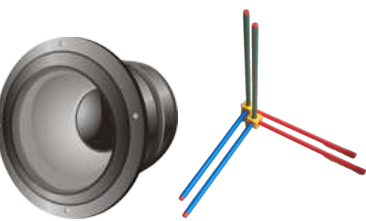
Transformationen

$$\begin{bmatrix} \cos 90^\circ & \sin 90^\circ \\ -\sin 90^\circ & \cos 90^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ a_1 \end{bmatrix}$$

G. Zachmann

University of Bremen, Germany

cgvr.informatik.uni-bremen.de

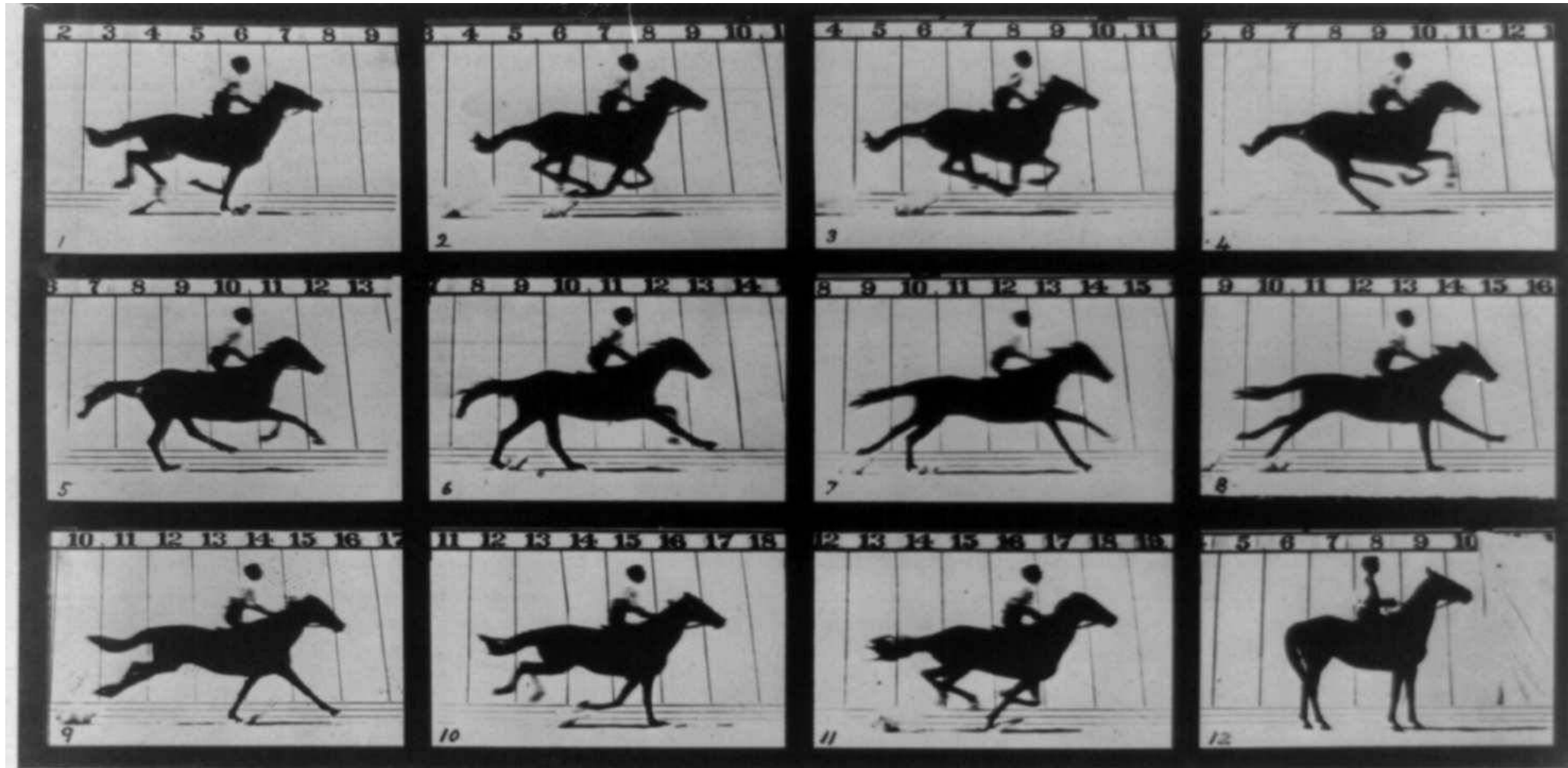


Motivation

- Transformationen werden benötigt, um ...
- Objekte, Lichtquellen und Kamera zu positionieren
- Alle Berechnungen zur Beleuchtung im selben Koordinatensystem durchzuführen
- Objekte auf den 2D-Bildschirm zu projizieren
- Die Szene zu animieren

Das Prinzip der Animation

Edward Muybridge, 1878



Marcel Duchamp, 1912

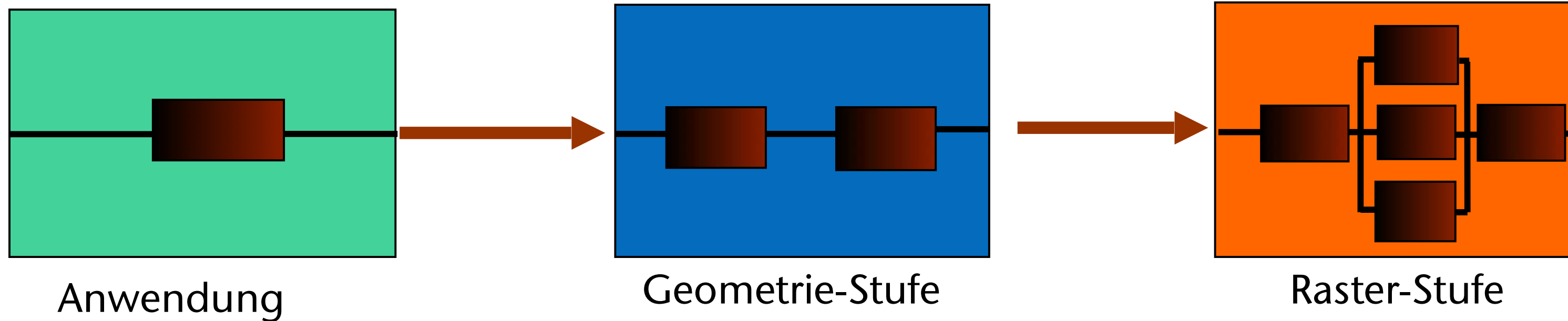


- In einer interaktiven Computergraphik-Applikation: setze für ein animiertes Objekt in jedem neuen Frame eine neue Transformation (z.B. Rotation), die sich nur wenig von der vorherigen unterscheidet

```

loop forever:                                     // main loop
    ask system for current time
    for every animated obj:
        calc new position & orientation based on current time
        store this as translation & rotation with object
    set new position & orientation for camera
    render scene
    
```

Die Graphik-Pipeline (stark vereinfacht)



Im folgenden
diese Tasks

Alle Berechnungen, die 1x pro Polygon oder pro Vertex durchgeführt werden.
Arbeitet im 3D.
Z.B.:

- Modell- und Viewing-Transformation
- Projektion
- Beleuchtung
- Clipping

Alle Berechnungen, die pro Fragment durchgeführt werden.
Arbeitet im 2D.
Kennen wir (teilweise) schon
Z.B.:

- Scan Conversion
- Z-Test

Koordinatensysteme in der Pipeline

Model-to-World Transformations

Illumination

Viewing Transformation
(Perspective / Orthographic)

Clipping

Projection
(to Screen Space)

Scan Conversion
(Rasterization)

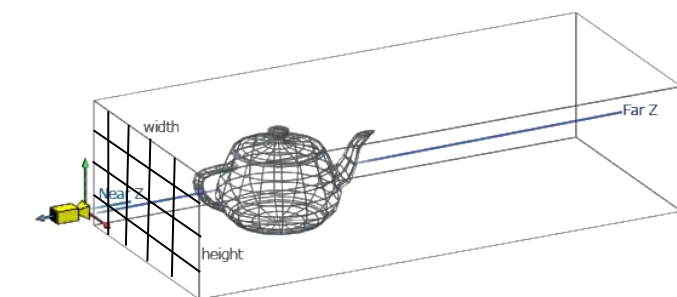
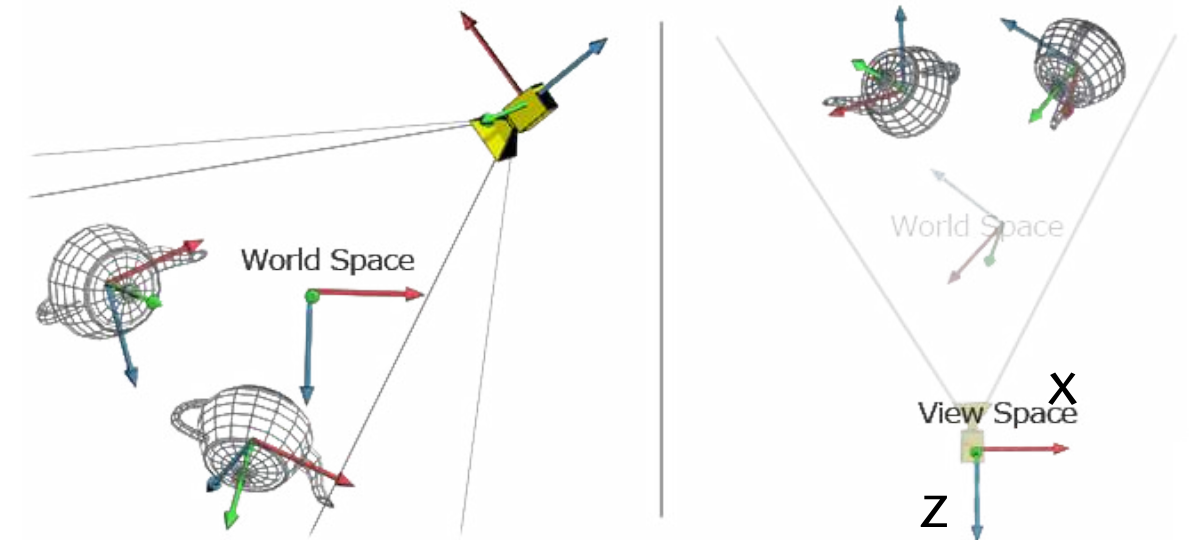
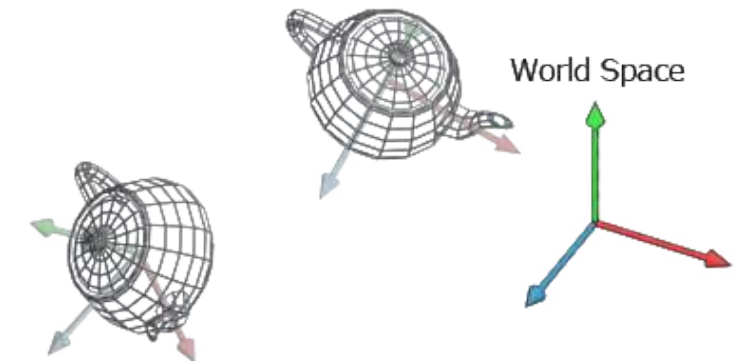
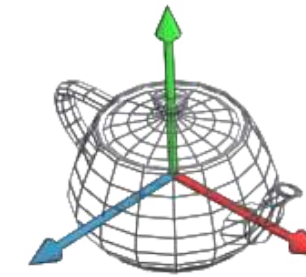
Fragment Processing
Fragment Tests

Object Space
(a.k.a. local space)

World Space
Für alle Objekte gleich

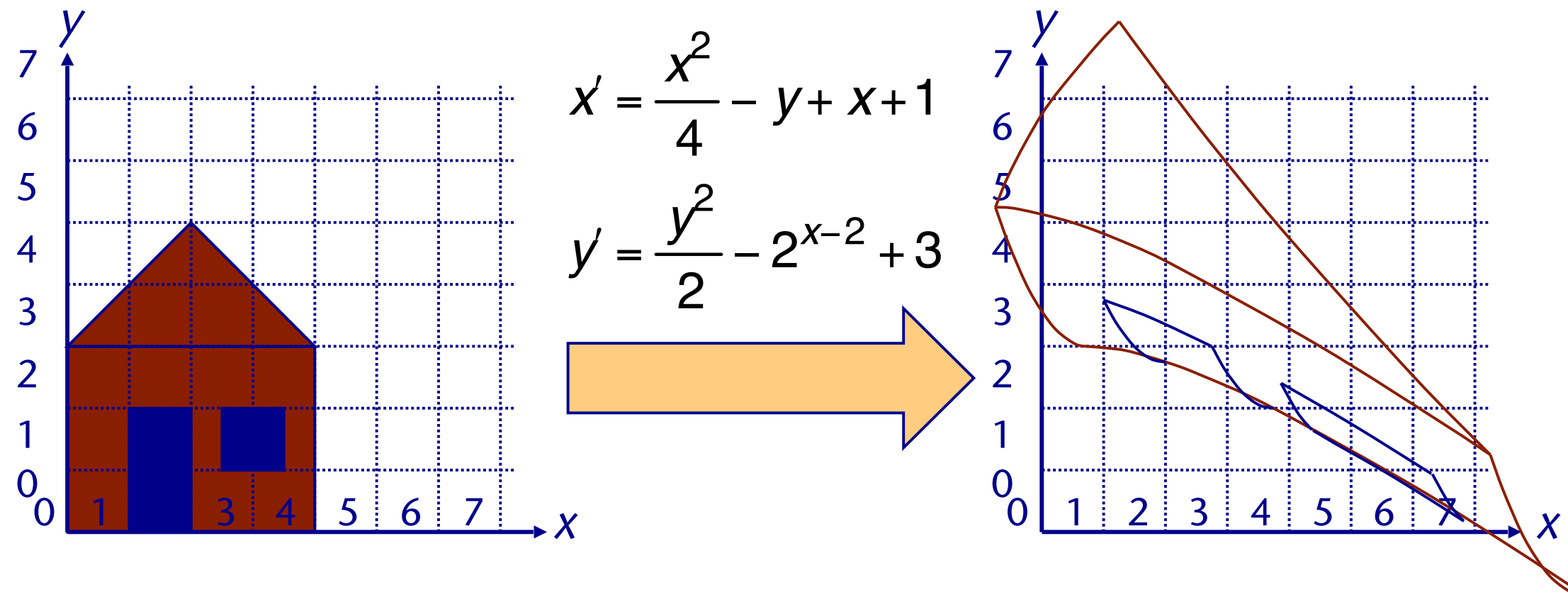
Eye Space /
Camera Space

Screen Space
adressiert die Hardware



Allgemeine Transformationen

- Allgemeine Transformation ist evtl. nicht linear → Geraden werden i.A. nicht wieder auf Geraden abgebildet
- Beispiel:



- Folge: jeder Punkt (auf einer Linie, in einem Polygon, ...) muss transformiert werden → nicht effizient, nicht interessant für Echtzeit-Graphik

Vorteile der linearen Abbildungen

- Lineare Transformationen (z.B. Rotation, Skalierung und Scherung) heißen "linear", weil die Eigenschaft der Linearität der Abbildung gilt:

$$X' = A \cdot (\alpha X + \beta Y) = \alpha A \cdot X + \beta A \cdot Y$$

- Folge aus Linearität $\rightarrow$ Geraden werden auf Geraden abgebildet
- Lineare Abbildungen kann man durch Matrizen darstellen
- Merke die Konvention:

"Matrix mal Vektor"

Die elementaren Transformationen im 3D

1. Rotation
 2. Translation
 3. Skalierung
 4. Spiegelung (kommt sehr selten vor)
 5. Scherung (kommt in der Praxis fast nie vor)
-
- Verkettung (*concatenation*)
 - Starrkörpertransformation (*rigid body transformation*)

Elementare Rotation

- Rotation um x-, y-, z-Achse um Winkel ϕ

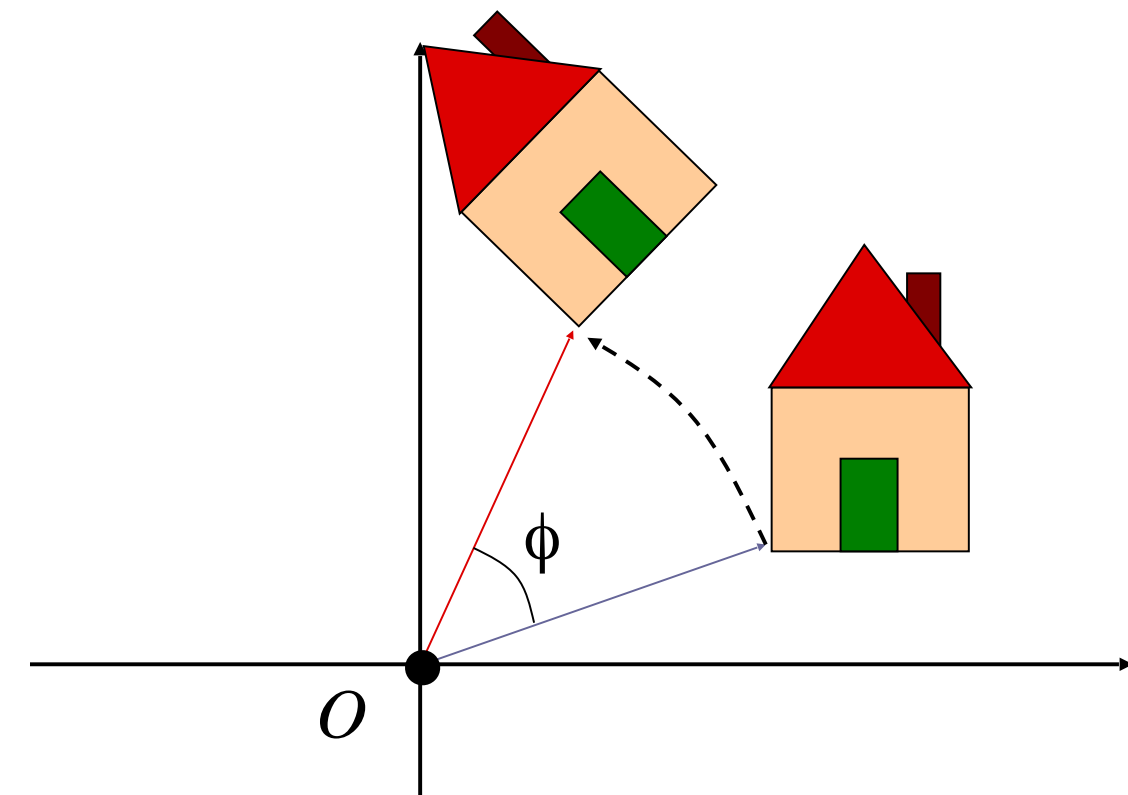
$$R_x(\phi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix}$$

X-Koord. bleibt unverändert

Vorzeichentest: $\phi=90 \rightarrow$
y geht nach z, z geht nach -y.

$$R_y(\phi) = \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{pmatrix}$$

$$R_z(\phi) = \begin{pmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$



Eselsbrücken zum Merken der elementaren Rotationsmatrizen

- Man merkt sich, dass es im Wesentlichen immer ein "cos/sin-Kästchen" ist, und muss sich dann nur noch überlegen, welche Stelle eine 1 haben muss, damit die Koordinaten der gewünschten Achse unverändert bleiben
- Man merkt sich folgendes Schema [Laura Spillner, 2015]:

$\cos$	$-\sin$	0	$\cos$	$-\sin$
$\sin$	$\cos$	0	$\sin$	$\cos$
0	0	1	0	0
$Y\text{-Achse}$	$-\sin$	0	$\cos$	$-\sin$
	0	$\sin$	$\cos$	
$Z\text{-Achse}$				

Orthogonale Matrizen

- Definition (Wdhg aus Mathe):

eine Matrix R heißt **orthogonal** $\Leftrightarrow RR^T = R^T R = I$

- Folgen:

Die Spalten von R sind zueinander **orthonormal** (nicht nur orthogonal)

$$\det(R) = \pm 1$$

$$R^{-1} = R^T$$

R^T ist orthogonal

$$\|Rv\| = \|v\| \quad (\text{Längenerhaltung})$$

$$(Ru) \cdot (Rv) = u \cdot v \quad (\text{Winkelerhaltung})$$

$$R_1, R_2 \text{ sind orthogonal} \Rightarrow R_1 R_2 \text{ ist orthogonal}$$

Charakterisierung von (reinen) Rotationsmatrizen

- R ist orthogonal $\Leftrightarrow R$ ist Rotationsmatrix und/oder Spiegelung
- R ist eine **ordentliche Rotation** $\Leftrightarrow RR^T = I \wedge \det(R) = +1$
- Die Menge der orthogonalen Matrizen mit Determinante =1 bezeichnet man oft mit **SO(3)** (aka. die *Gruppe der 3D Rotationen*, mit der Multiplikation als Operator)

GOOD CODERS...



Skalierung

- Kann zum Vergrößern oder Verkleinern verwendet werden:

$$S(s_x, s_y, s_z) = \begin{pmatrix} s_x & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 \\ 0 & 0 & s_z \end{pmatrix}$$

- s_x, s_y, s_z beschreiben Längenänderung in x-, y-, z-Richtung
→ nicht-uniforme (anisotrope) Skalierung
- Uniforme (isotrope) Skalierung: $s_x = s_y = s_z$
- Inverse:

$$S^{-1}(s_x, s_y, s_z) = S\left(\frac{1}{s_x}, \frac{1}{s_y}, \frac{1}{s_z}\right)$$

- Ein alternative Skalierungs-Matrix:

$$S(s, s, s) = \begin{pmatrix} s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{s} \end{pmatrix}$$

- Aber besser die "normale" Skalierungsmatrix verwenden

Scherung (Shearing)

- Verschiebt z.B. die x -Koordinate abhängig von der Entfernung zur Ebene $z=0$ (d.h., der xy -Ebene), also abhängig von der z -Koord.
- Zum Beispiel: $H_{xz}(s)$ schert den x -Wert gemäß dem z -Wert

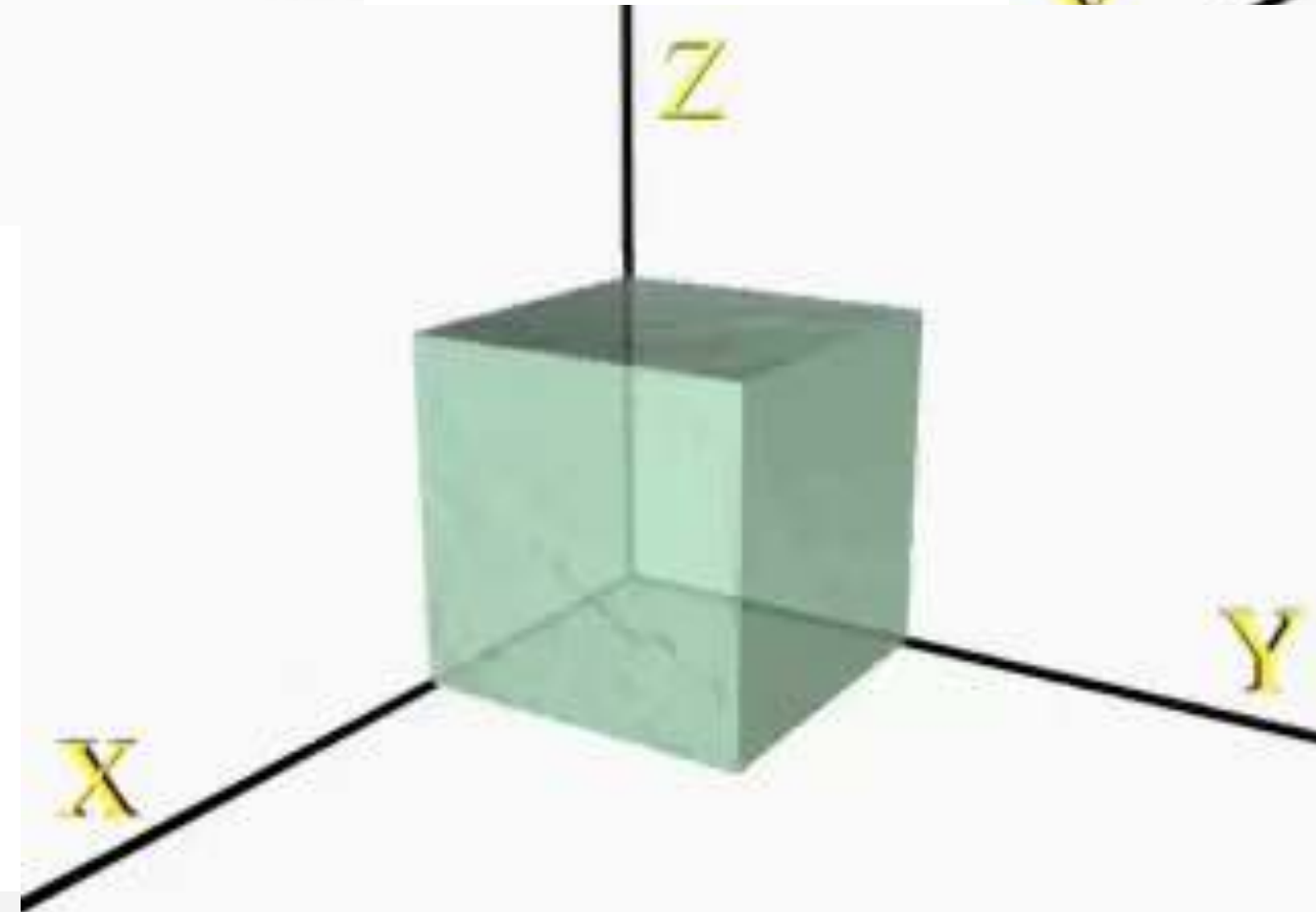
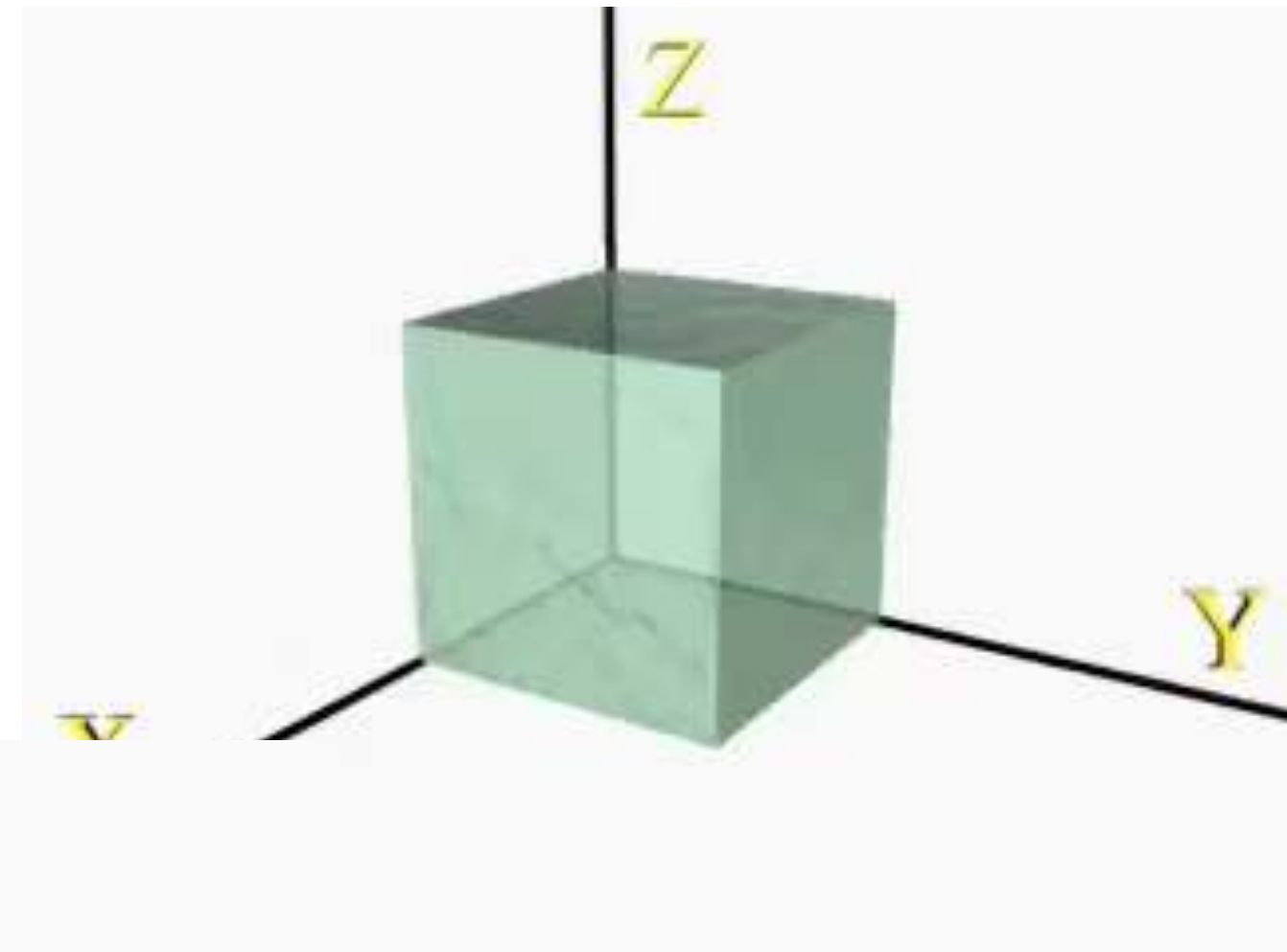
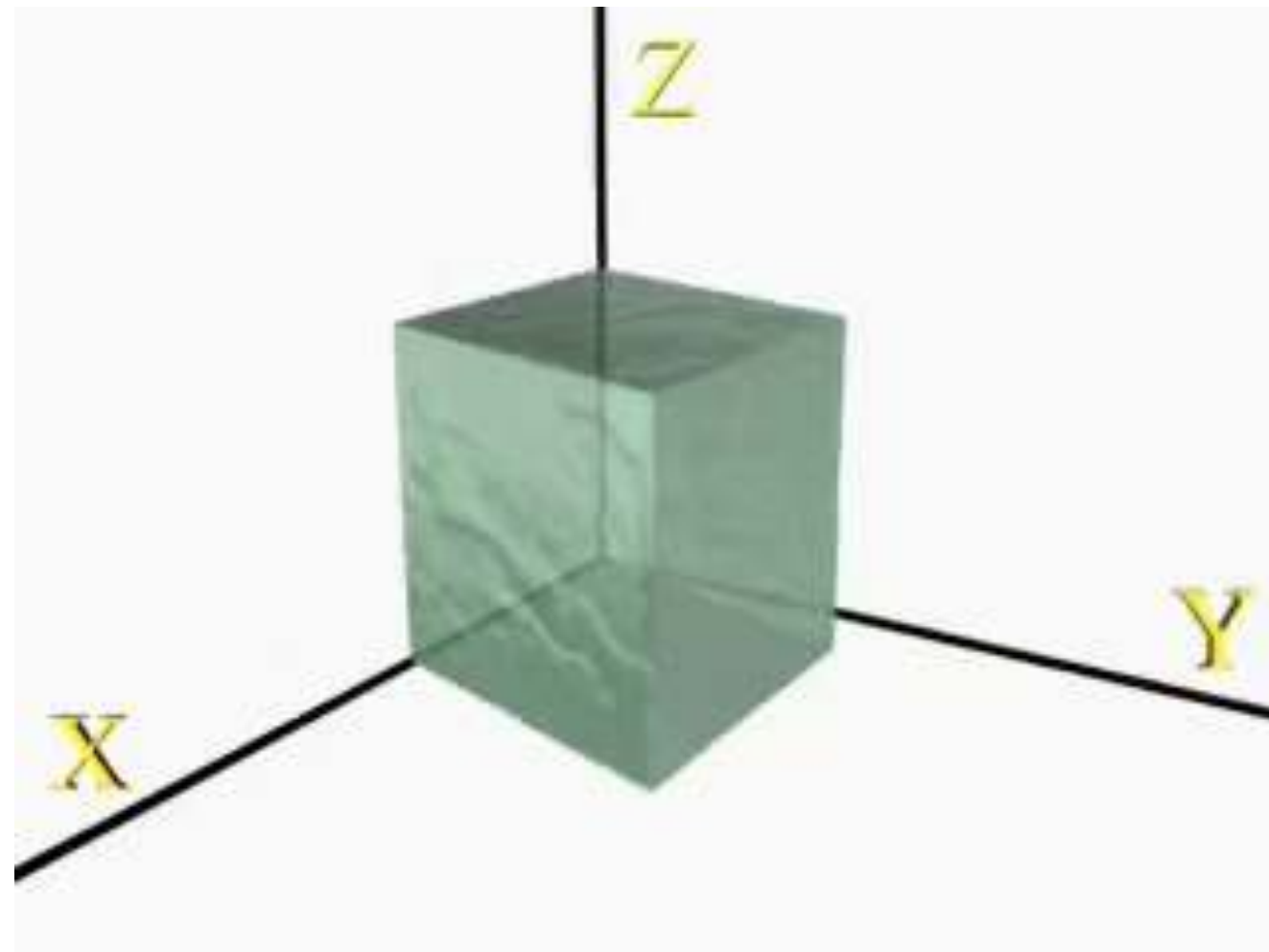
$$H_{xz}(s) \cdot \mathbf{p} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & s \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_x + sp_z \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix}$$

- Inverse:

$$H_{xz}^{-1}(s) = H_{xz}(-s)$$

- Bemerkung: Determinante = 1 $\rightarrow$ Volumen bleibt erhalten
 - Aber Winkel werden hier nicht erhalten!

Visualisierung mit Animation des Parameters s



Shearing for Sculpture



Museum of Fine Arts, Boston

Spiegelung

- Spiegelung entlang der x-Achse, m.a.W., Spiegelung bzgl. der yz-Ebene:

$$M_x = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- Analog die anderen beiden Spiegelungen
- Achtung: $\det(M_x) < 0$!
 - Bei allen anderen Transformationen T bisher war $\det(T) > 0$
- Spiegelungen sind in der CG eigtl. immer ausgeschlossen
 - U.a., weil der Umlaufsinn der Polygone umgedreht wird

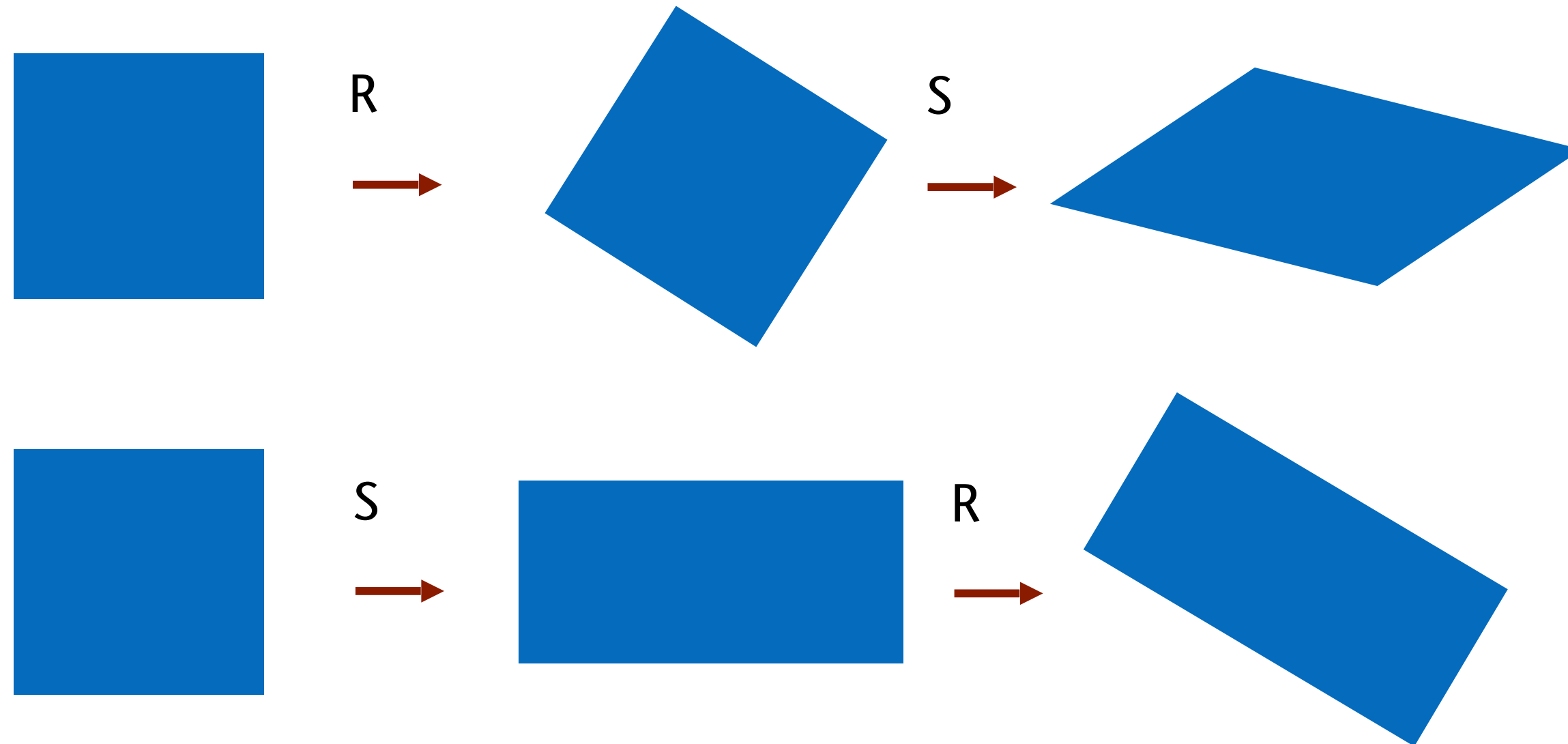
Denksport-Aufgabe

- Wie kommt es, dass ein Spiegel links/rechts vertauscht, aber nicht oben/unten?
- Antwort:
 - In Wahrheit vertauscht er auch links/rechts nicht, sondern vorne/hinten!
 - Die Nase im Spiegel zeigt nach Süden, wenn unsere reale Nase nach Norden zeigt, aber wenn wir mit einer Hand nach Westen zeigen, zeigt auch die Hand im Spiegel nach Westen!
- Der Fehler ist, dass wir uns *vorstellen*, dass eine Person hinter dem Spiegel steht
- Alternative Betrachtung: spannen wir mit der rechten Hand ein *rechtshändiges* Koordinatensystem auf, so spannt die gegenüberliegende Hand im Spiegel ein *linkshändiges* Koordinatensystem auf!



Verknüpfung / Concatenation

- Beispiel:



- Stimmt mit der Mathematik überein: Multiplikation von Matrizen ist **nicht kommutativ** $\rightarrow$ Reihenfolge der Transformation spielt eine Rolle!

- Reihenfolge in einer Matrixkette:

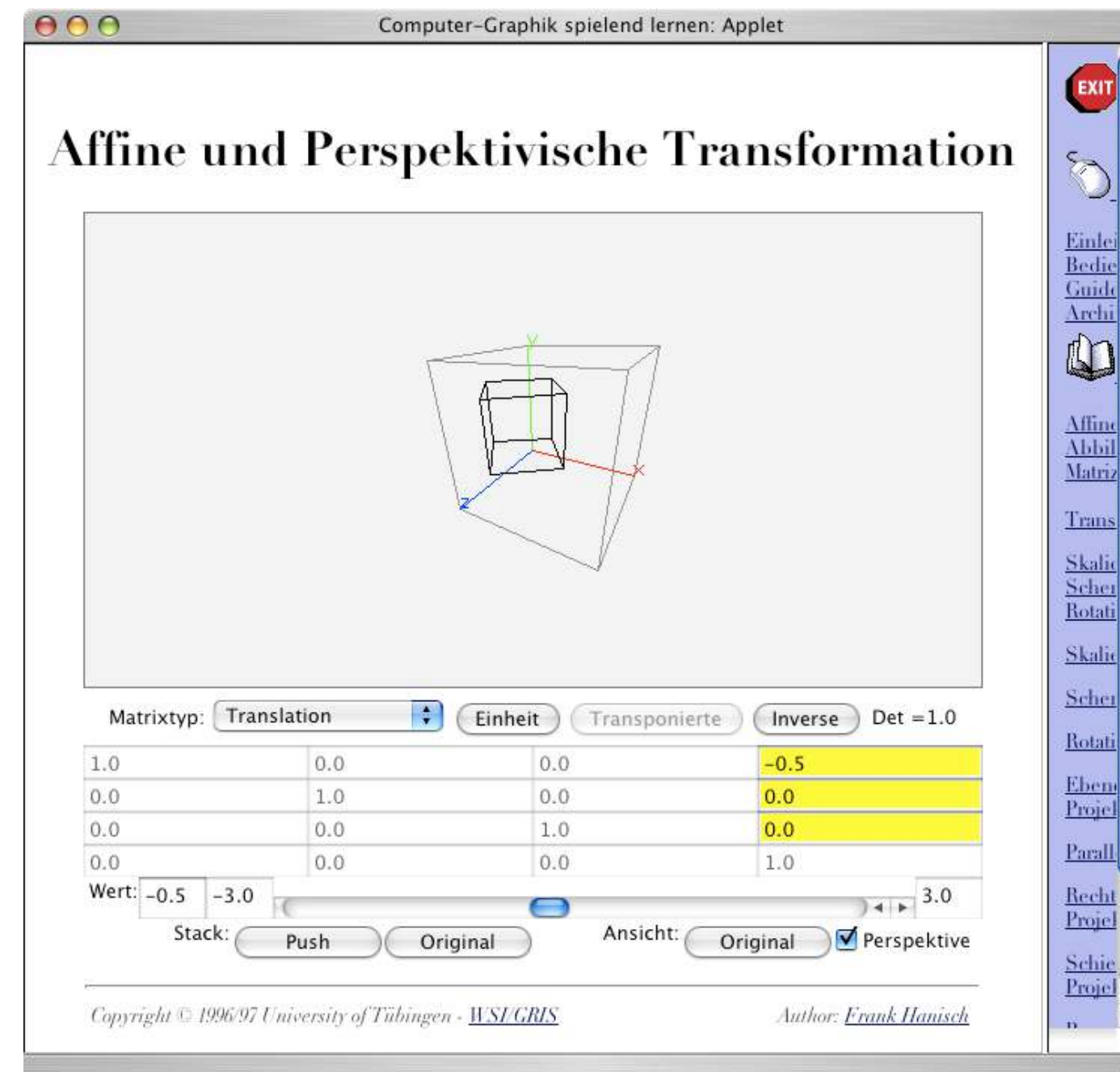
$$p' = M_n \cdot \dots \cdot M_2 \cdot M_1 \cdot p$$



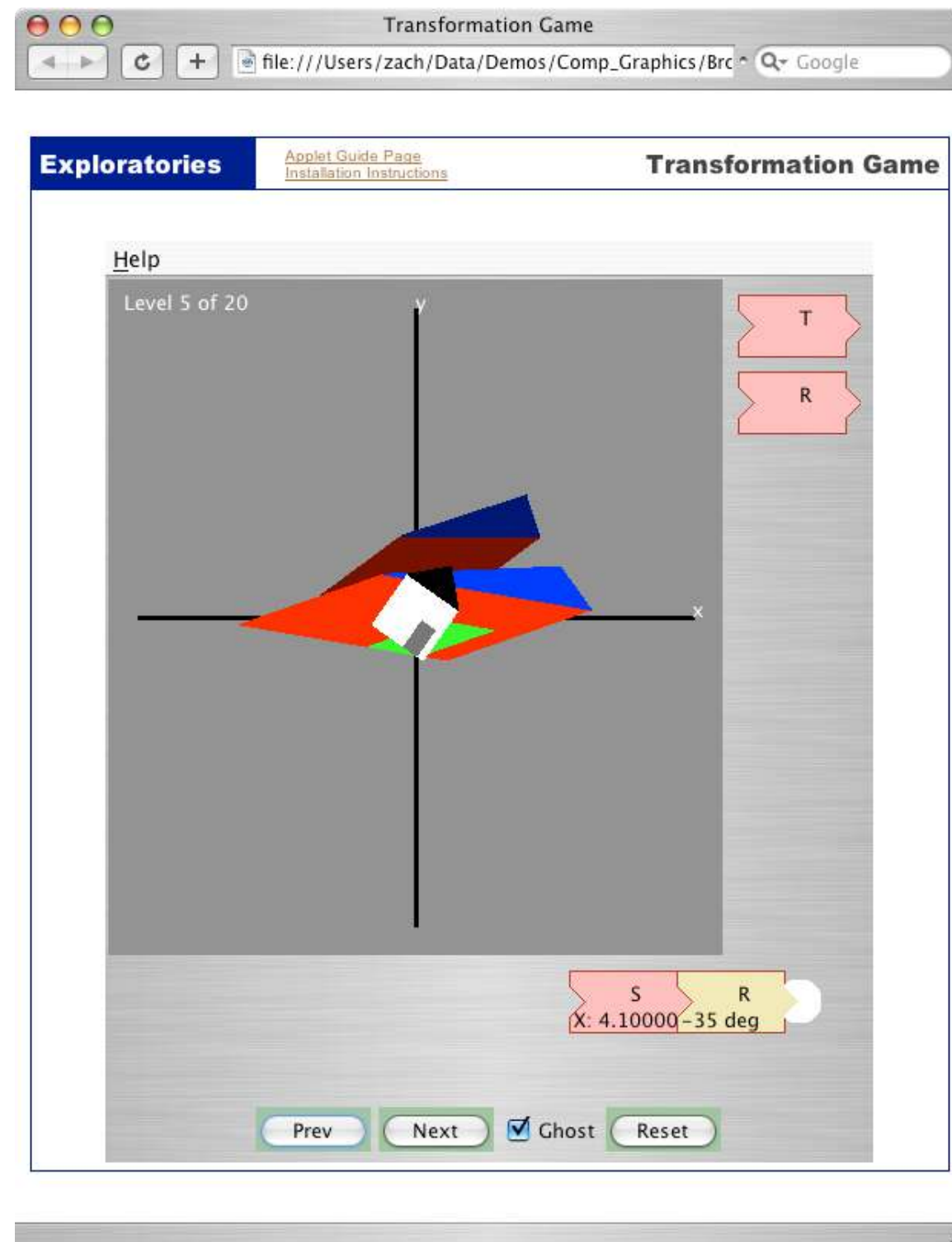
Reihenfolge der Ausführung

- Nützlich zur Steigerung der Effizienz

Demo zur Konkatination von Transformationen



(Urspr. Quelle: <http://www.gris.uni-tuebingen.de/gris/GDV/java/doc/html/etc/AppletIndex.html>)



<http://graphics.cs.brown.edu/research/exploratory/freeSoftware>

→ Complete Catalog → Transformation Game

<http://cgvr.cs.uni-bremen.de>

Teaching → CG1

→ "Transformation Game" suchen, ZIP-File entpacken, dann
`cd freeSoftware/repository/edu/brown/cs/exploratories/-`

`applets/transformationGame`

`java -jar transformation_game.jar`

Vier Darstellungen von Rotation

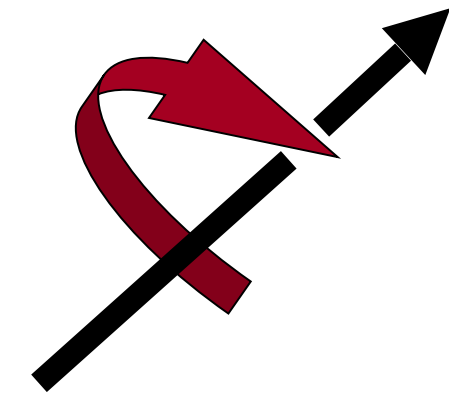
Axis+Angle

Euler-Winkel

Quaternionen

Rotationsmatrix

Darstellung: Achse + Winkel



- Intuitive Darstellung: $(\varphi, \mathbf{r})$
 - Meist mit der Nebenbedingung $\|\mathbf{r}\| = 1$
- Anzahl Freiheitsgrade allgemeiner Rotationen: 3 DOFs (*degrees of freedom*)
 - 2 DOFs für die Achse + 1 DOF für den Winkel
- Anmerkung: in der Robotik wird gerne die Variante verwendet, wo

$$\varphi = \|\mathbf{r}\|$$

(damit benötigt man also wieder nur einen 3D-Vektor)

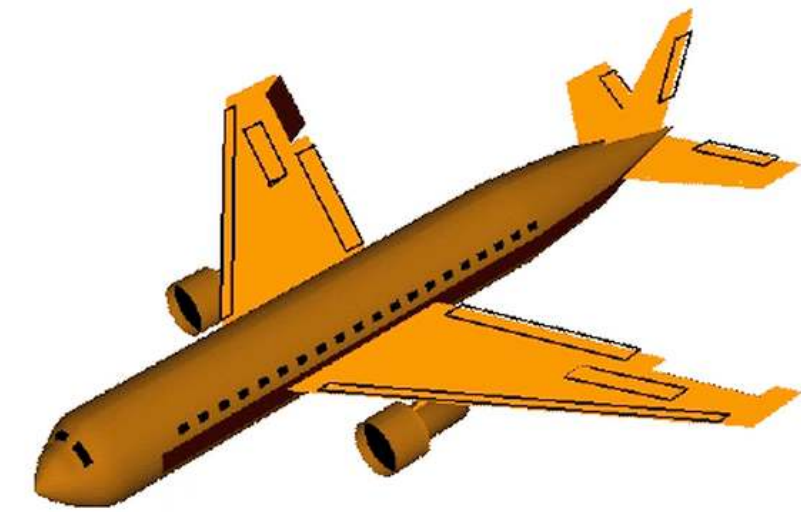
- Bezeichnungen: Euler-Vektor, oder Rotationsvektor

Die Euler-Winkel

- Intuitive (?) Konstruktion einer beliebigen Rotation: Konkatenation aus 3 elementaren Rotationen — erst Rotation um X-, dann um Y-, dann um Z-Achse
- Diese Winkel heißen **Euler-Winkel** und bezeichnen meistens Rotationen um eine der drei Welt-Koordinaten-Achsen
- Häufige Variante im Maschinenbau:

$$R(r, p, y) = R_z(y)R_x(p)R_y(r)$$

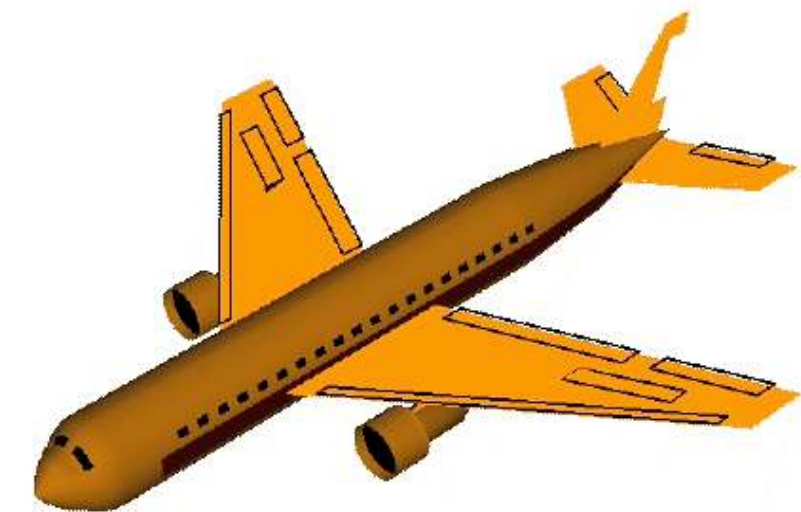
- Bezeichnung:
roll, pitch, yaw (Schiff)
roll, pitch, heading (Flugzeug)



Roll



Pitch



Yaw
(Heading)

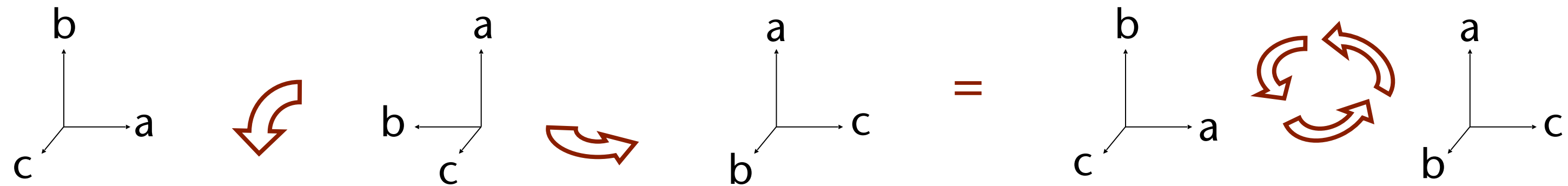
Spezifikation einer Rotation mittels Euler-Winkeln macht viele Probleme!!

- Reihenfolge der Rotationen ist nicht festgelegt!
 - Oft "*roll, pitch, yaw*" — aber Zuordnung zu den Achsen nicht definiert!
 - Manchmal auch: *z, x, z* ! Oder ...
- Führt zu **Gimbal Lock**
- Werte-Bereiche: für einen der Winkel ist der Bereich nur $[-90, +90]$
 - Sonst: Mehrfachüberdeckung von $SO(3)$
- Rechnen (z.B. interpolieren oder mitteln) ist i.A. **sinnlos und/oder unmöglich!**

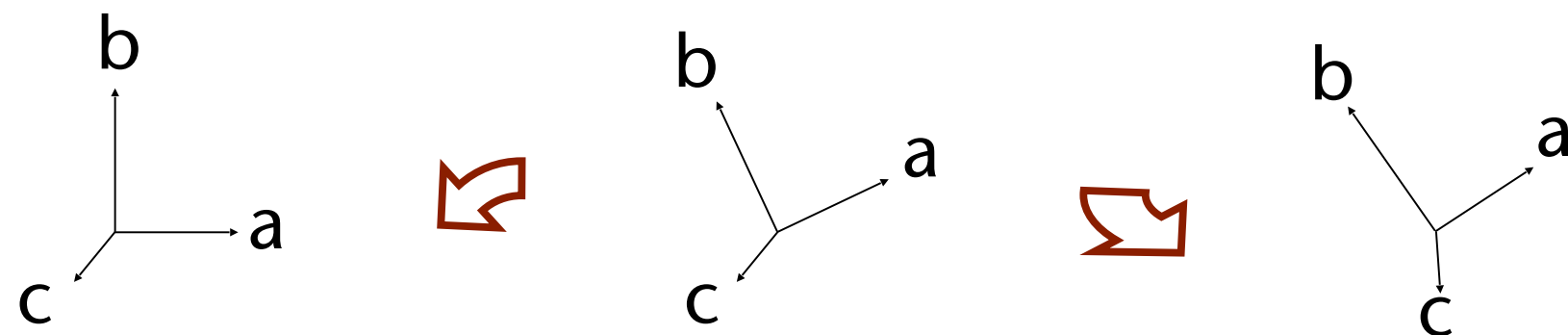
- Interpolation zwischen zwei Rotationen (Orientierungen) mittels Euler-Winkel liefert unerwünschte Resultate

- Beispiel:

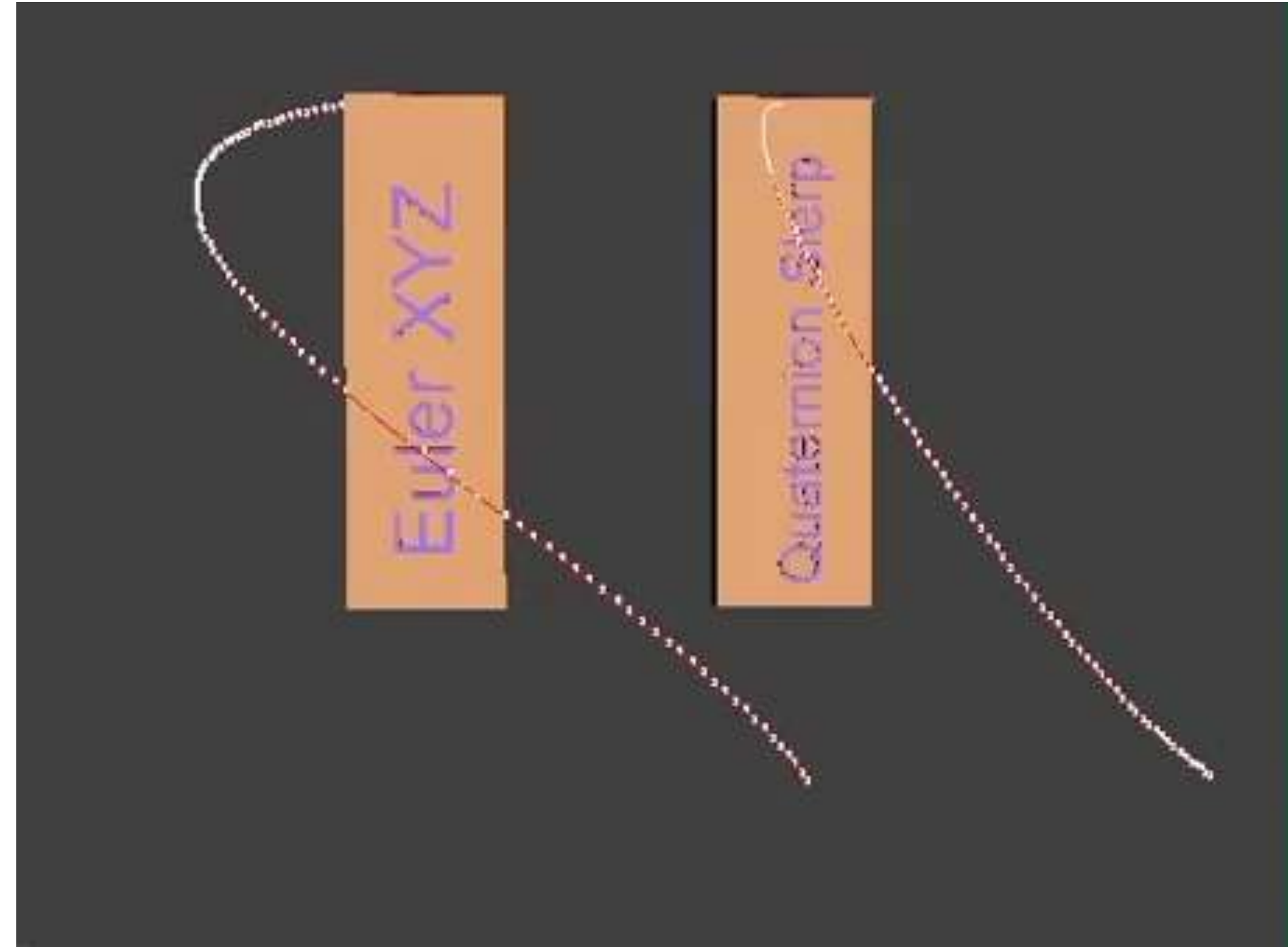
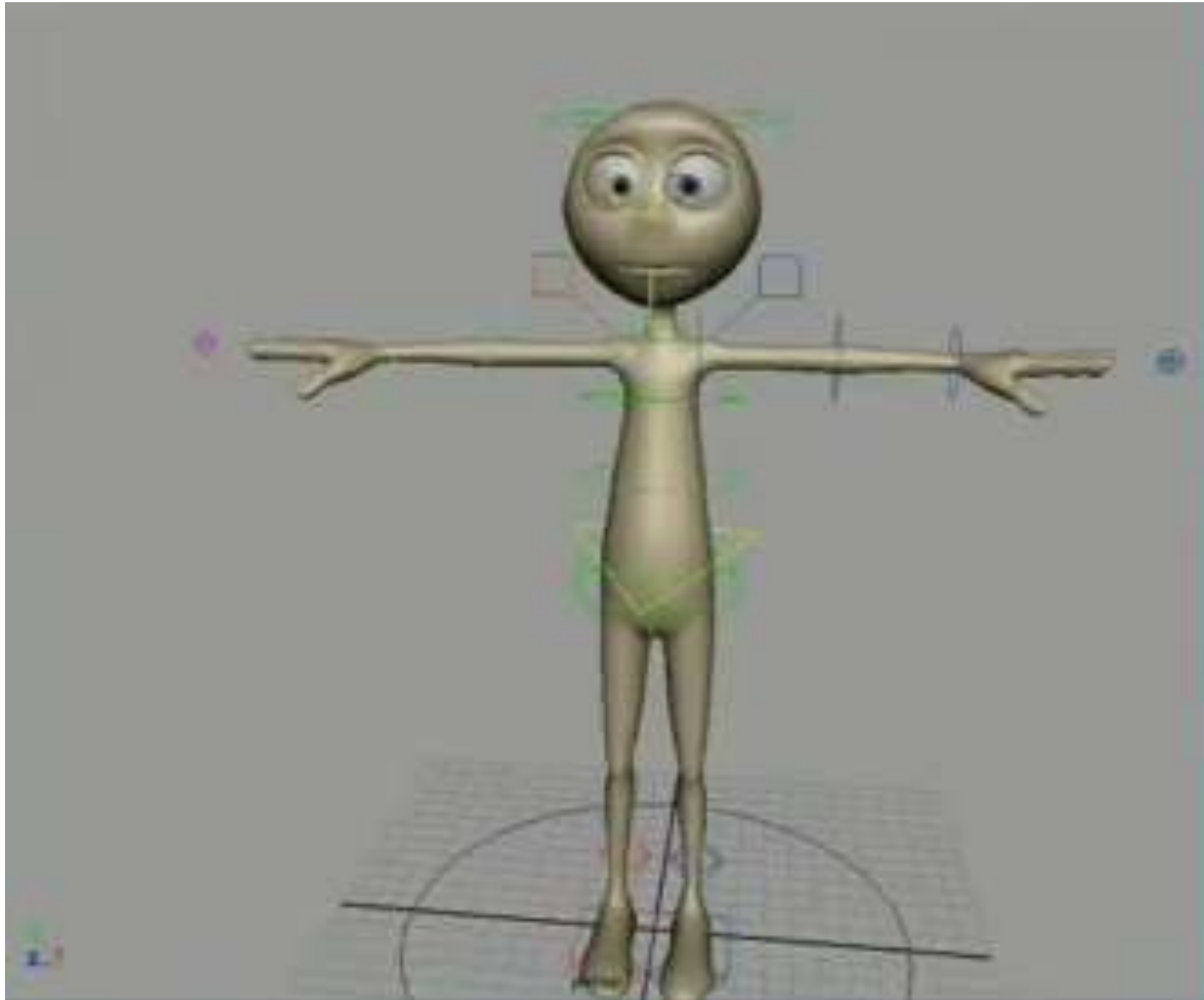
- Rotation von 90° um Z, dann 90° um Y $=$ 120° um $(1, 1, 1)$



- Rotation von 30° um Z, dann 30° um Y $\neq$ 40° um $(1, 1, 1)$!

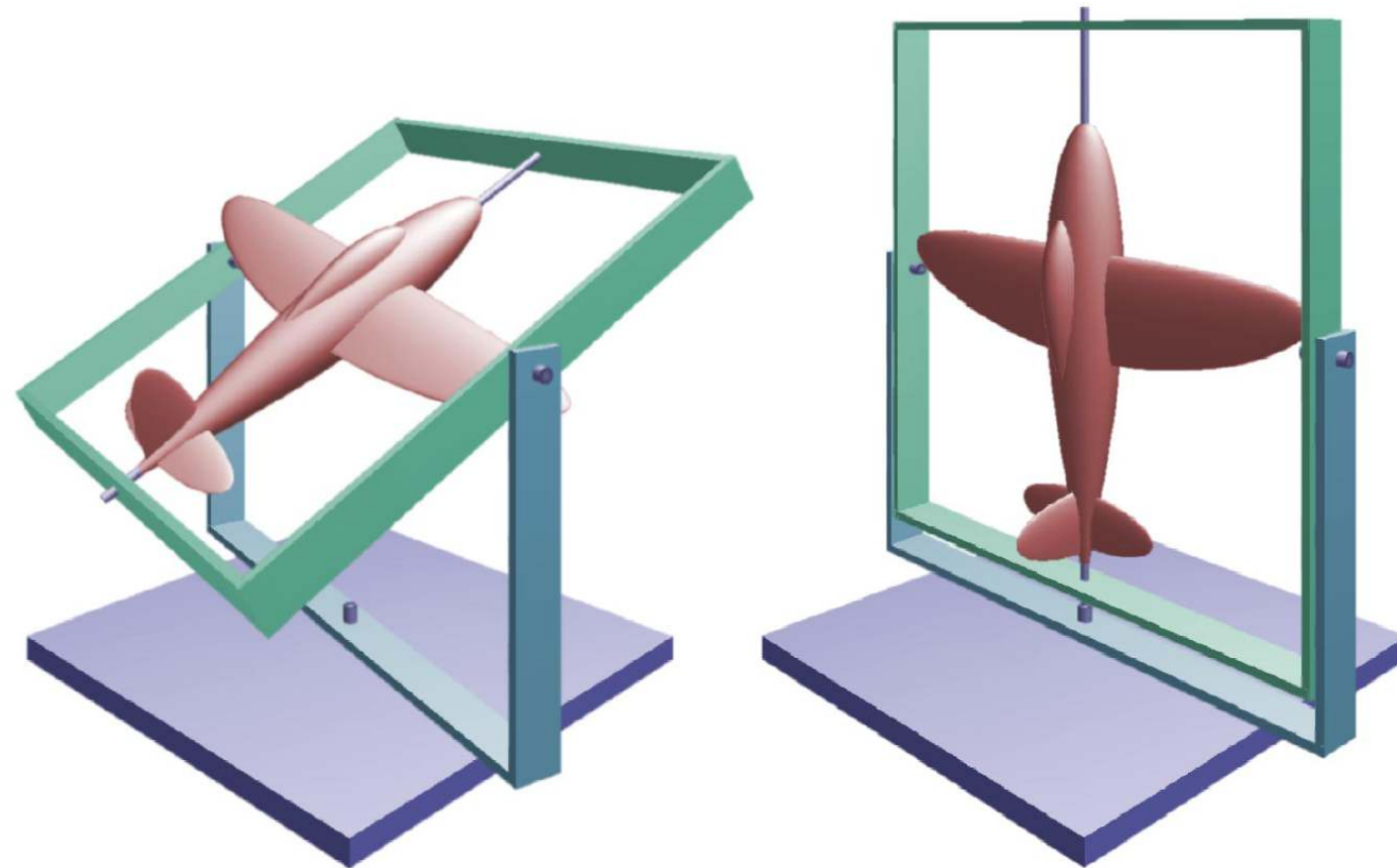


Beispiel für die unerwünschten Effekte bei Interpolation von Euler-Winkeln



Der *Gimbal Lock*

- Immer dann, wenn 2 Achsen (fast) gleich sind
- Folgen: nur noch **2 Freiheitsgrade!** (obwohl es immer noch 3 Parameter sind)
 - Rotation um eine der (lokalen) Flugzeugachsen geht nicht mehr!



4 Gimbals

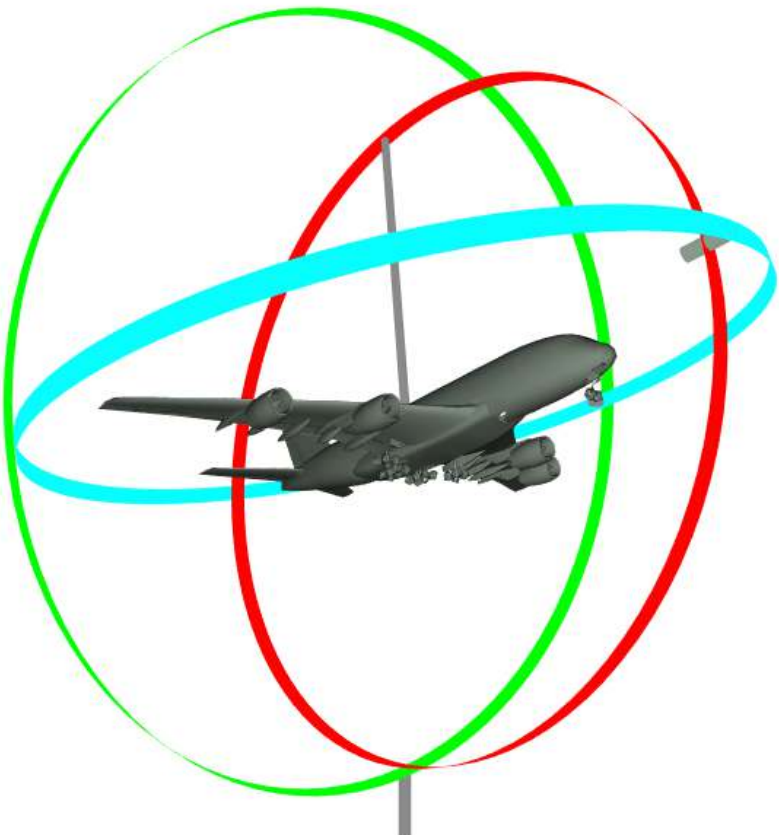


Demo zu Interpolation und Gimbal Lock

EulerAnglesViz.html

file:///Users/zach/Documents/Lehre/CG1/demos/Euler-Winkel/EulerAnglesViz.html

Euler Angles Interpolation Animation and Gimbal Visualization



Euler Angles

Yaw Set
 Pitch Set
 Roll Set

Animation

	Yaw	Pitch	Roll	
Orientation 1	168.	2.7	2.8	Set from current
Orientation 2	71.6	55.1	32.8	Set from current
Speed/sec	5	Start animation		

Gimbals

Display Gimbals ☒

Directions

- Manipulate the sliders to change roll/pitch/yaw. It is also possible to input your own angles and hit the "set" button to update them
- For an animation which does linear interpolation between two sets of Euler angles, choose an initial yaw/pitch/roll next to "orientation1" in the animation menu to the right, as well as a final orientation next to "orientation 2." You can also automatically fill in the angles corresponding to the current slider positions by clicking "set from current."
- Click the "animate" button to perform linear interpolation between orientation 1 and orientation 2
- Click the "display gimbals" checkbox to toggle displaying of the gimbals. This may make it easier to view the animation
- To view the gimbals from a different point of view, left click and drag your mouse. To zoom, right click and drag. To translate, center click and drag

Source

Modified from [Source](#)

Anekdote: Euler Angles in Spaceflight

- In den Apollo-Raketen wurde ein Kreiselkompass verwendet
 - (Basiert auf der Trägheit einer sich sehr schnell drehenden Masse)
- Kleine Anekdote dazu:

About two hours after the Apollo 11 landing, Command Module Pilot Mike Collins had the following conversation with CapCom Owen Garriott:

104:59:35 Garriott: Columbia, Houston. We noticed you are maneuvering very close to **gimbal lock**. I suggest you move back away. Over.

104:59:43 Collins: Yeah. I am going around it, doing a CMC Auto maneuver to the Pad values of roll 270, pitch 101, yaw 45.

104:59:52 Garriott: Roger, Columbia. (Long Pause)

105:00:30 Collins: (Faint, joking) How about sending me a fourth gimbal for Christmas.

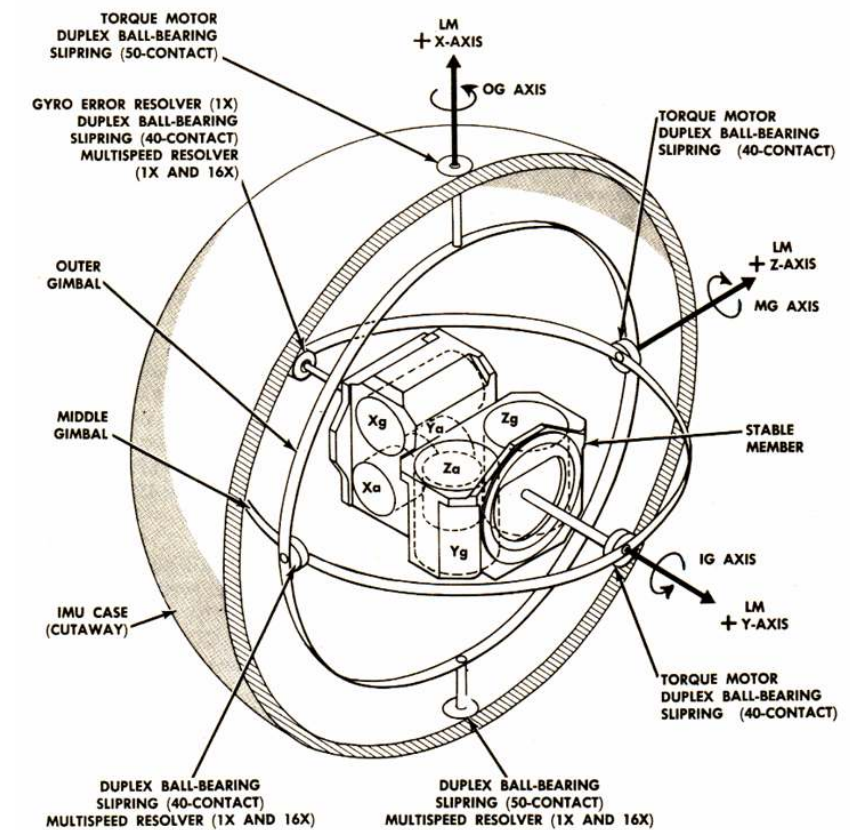


Figure 2.1-24. IMU Gimbal Assembly

- Um Gimbal-Lock zu vermeiden, wurde tatsächlich ein 4-ter Gimbal eingeführt!

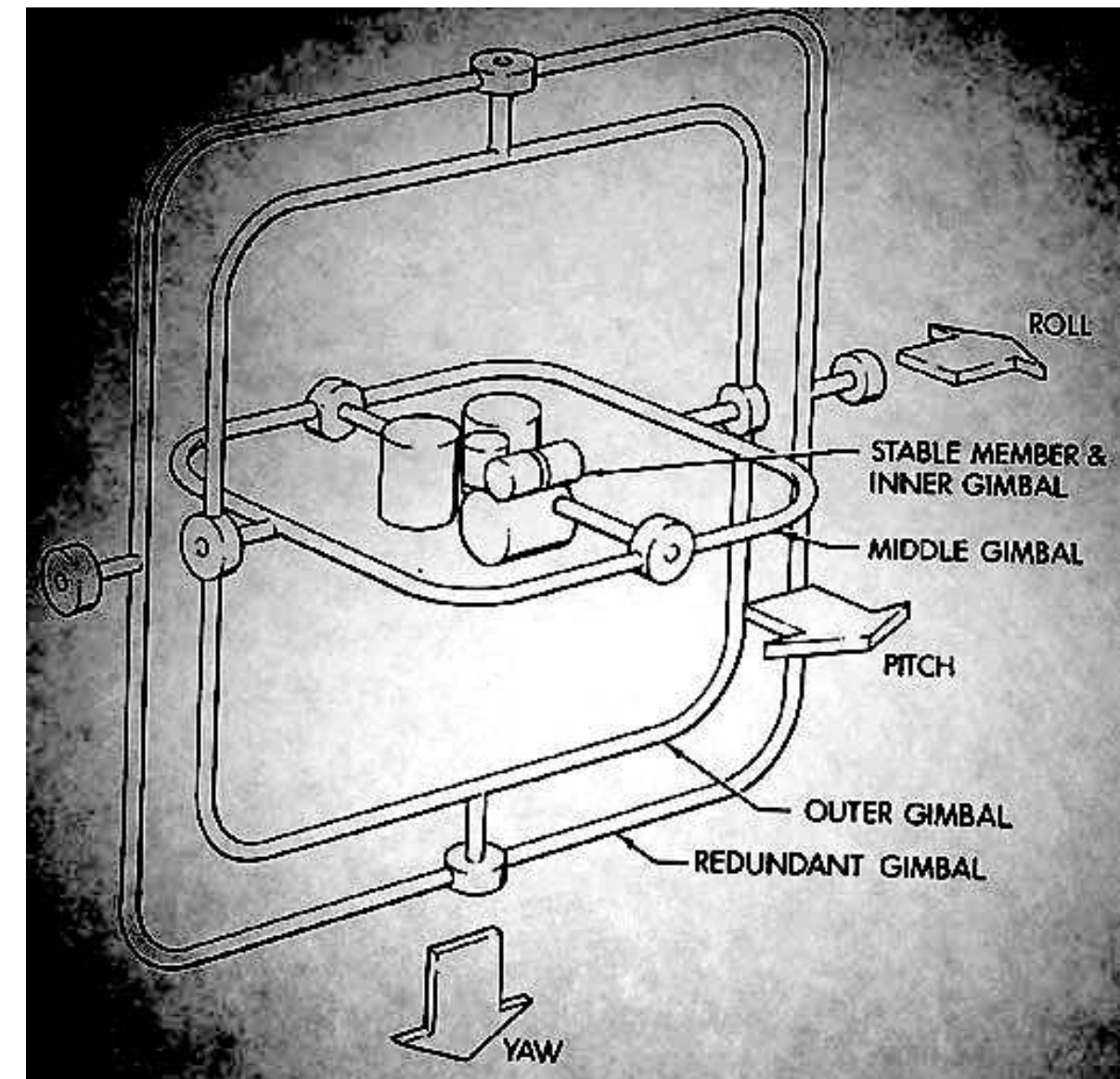
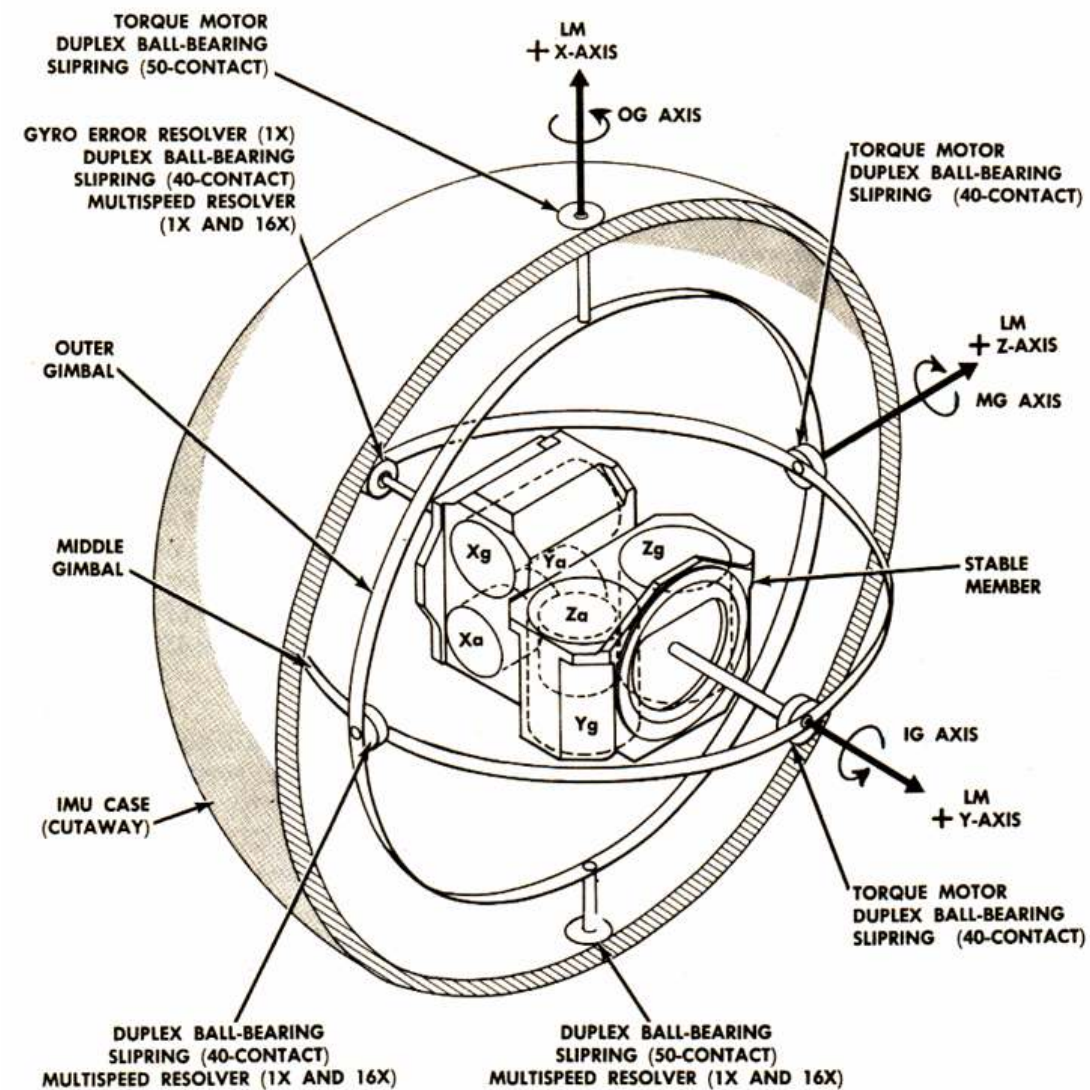


Figure 2.1-24. IMU Gimbal Assembly

Quelle: <http://www.hq.nasa.gov/office/pao/History/alsj/gimbals.html>

Matrix-Darstellung von Rotationen

- Gesucht: Rotationsmatrix zu gegebener Rotationsachse $\mathbf{r}$ (oBdA geht $\mathbf{r}$ durch den Ursprung)
- 1. Erzeuge neue Basis $(\mathbf{r}, \mathbf{s}, \mathbf{t})$ (bestimme $\mathbf{s}$ und $\mathbf{t}$, orthogonal zu $\mathbf{r}$; siehe Kapitel "Kurze Wiederholung in Geometrie")
- 2. Transformiere alles, so daß die Basis $(\mathbf{r}, \mathbf{s}, \mathbf{t})$ in die Standardbasis $(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$ übergeht
- 3. Rotiere mit Winkel θ um $\mathbf{x}$ -Achse
- 4. Transformiere zurück in die ursprüngliche Basis

- Zusammen:

$$M = BR_x(\theta)B^T \quad \text{mit} \quad B = \begin{pmatrix} | & | & | \\ \mathbf{r} & \mathbf{s} & \mathbf{t} \\ | & | & | \end{pmatrix}$$

Zusammenhang zwischen Rotation und Basiswechsel

- Man kann eine Rotationsmatrix direkt aus den 3 Koordinatenachsen eines (neuen) Koordinatensystems konstruieren

- Gegeben: Einheitsvektoren $\mathbf{u}$, $\mathbf{v}$, $\mathbf{w}$

- Setze:

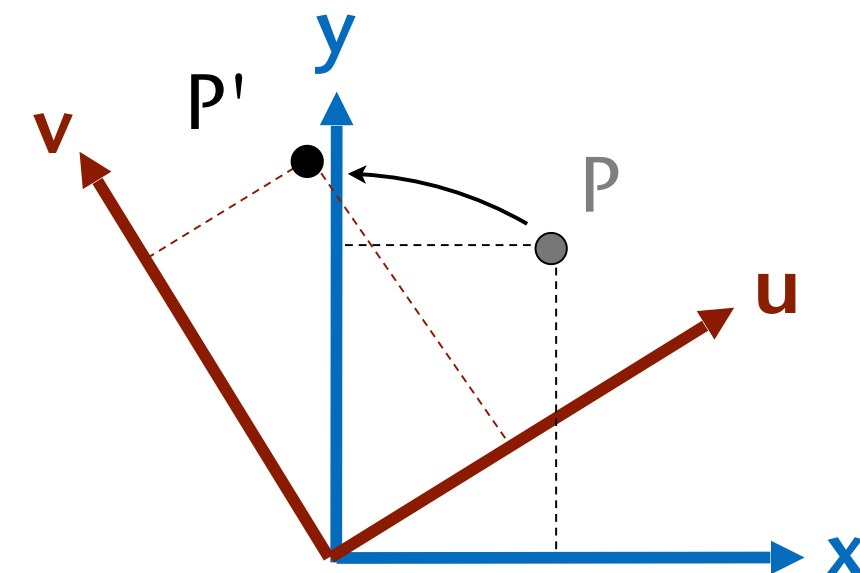
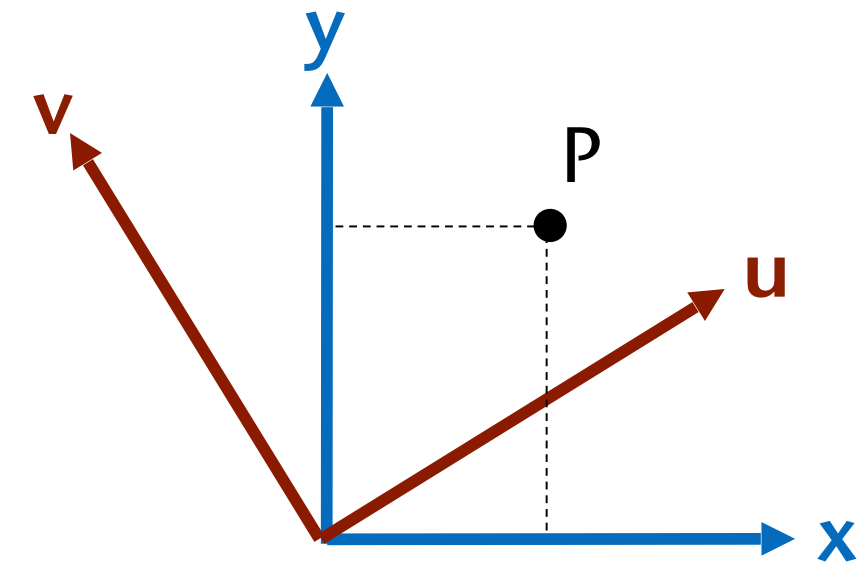
$$R = \begin{pmatrix} | & | & | \\ \mathbf{u} & \mathbf{v} & \mathbf{w} \\ | & | & | \end{pmatrix}$$

- Damit ist $R \cdot R^T = I$ und $\det(R) = 1$

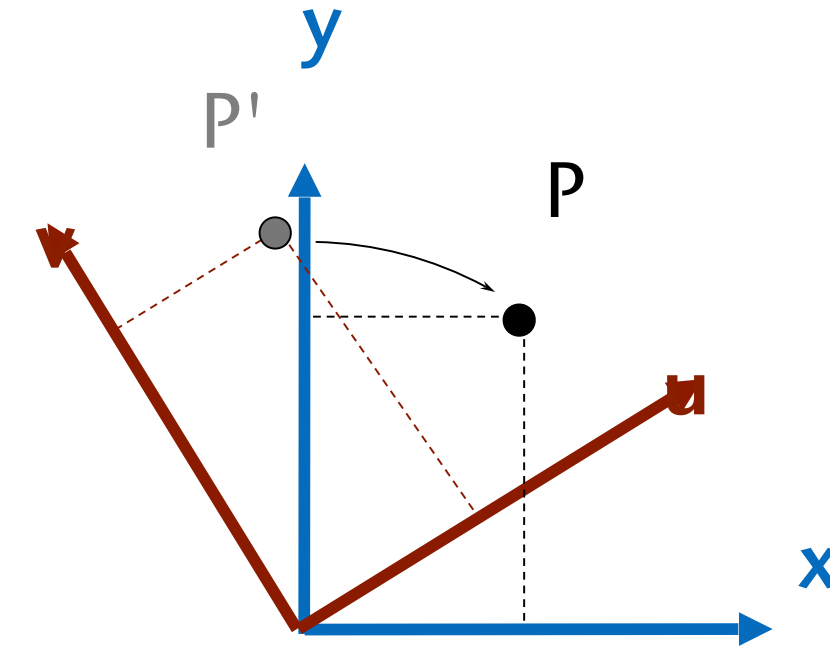
- Also: R ist Rotation

- Und zwar von xyz-Koordinaten $\rightarrow$ uvw, denn:

$$R \cdot \mathbf{e}_x = \mathbf{u}, \quad R \cdot \mathbf{e}_y = \mathbf{v}, \quad R \cdot \mathbf{e}_z = \mathbf{w}$$



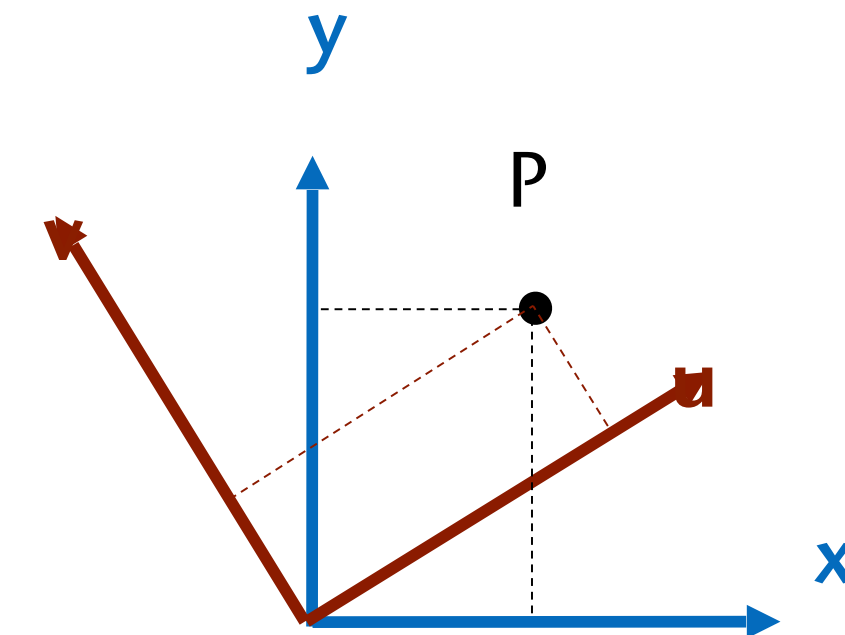
- Was bedeutet die Matrix R^{-1} ?
- Rotation von uvw-Koord. → xyz-Koord.



- Alternative Betrachtungsweise:

$$\mathbf{p}_{uvw} = R^{-1} \cdot P = R^T \cdot \mathbf{p}_{xyz} = \begin{pmatrix} - & \mathbf{u} & - \\ - & \mathbf{v} & - \\ - & \mathbf{w} & - \end{pmatrix} \cdot \mathbf{p}_{xyz} = \begin{pmatrix} \mathbf{u} \cdot \mathbf{p}_{xyz} \\ \mathbf{v} \cdot \mathbf{p}_{xyz} \\ \mathbf{w} \cdot \mathbf{p}_{xyz} \end{pmatrix}$$

- $\mathbf{p}_{uvw}$ stellt den selben Punkt P im Raum dar wie $\mathbf{p}_{xyz}$!
- $\mathbf{p}_{uvw}$ stellt ihn in uvw-Koordinaten dar,
- $\mathbf{p}_{xyz}$ stellt ihn in xyz-Koordinaten dar!



Zerlegung einer Rotationsmatrix (Konvertierung von Matrix in Achse+Winkel)

- Gegeben: Rotationsmatrix R

1. Aufgabe: den Rotationswinkel θ bestimmen

- Lösung: $1 + 2 \cos \theta = \text{spur}(R)$
- Beweis:
 - Zu R gibt es eine Basiswechselmatrix U , so daß

$$URU^{-1} = R_x(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

- Es gilt: $\text{spur}(R) = \text{spur}(URU^{-1}) = \text{spur}(R_x(\theta)) = 1 + 2 \cos \theta$
(Spezielle Eigenschaft der Spur)

2. Aufgabe: Rotationsachse $\mathbf{r}$ bestimmen

- Lösung: $\mathbf{r}$ ist der Eigenvektor zum Eigenwert 1 der Matrix R
- Beweis: alle Vektoren auf der Rotationsachse bleiben fest, d.h. $R\mathbf{r} = 1 \cdot \mathbf{r}$
- Berechnung der Eigenvektoren einer 3x3-Matrix:
 - Zur Erinnerung: zu jeder Matrix A gibt es eine adjungierte Matrix $A^\#$
 - Die Elemente $a_{ij}^\#$ der **adjungierten Matrix** sind definiert als

$$a_{ij}^\# = (-1)^{i+j} \det \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1i} & \cdots \\ \vdots & & \vdots & \\ a_{j1} & \cdots & a_{ji} & \cdots \\ \vdots & & \vdots & \end{pmatrix}$$

- Es gilt: $AA^\# = \det(A)I$

- Falls $\det(A) = 0$, dann ist $AA^\# = 0 \cdot I = 0$
- Also gilt für jeden Spaltenvektor $\mathbf{v}$ aus $A^\#$, daß $A \cdot \mathbf{v} = 0$
- Gesucht: Eigenvektor $\mathbf{r}$ zum Eigenwert 1 von R , also ein $\mathbf{r}$, so daß $(R - I) \cdot \mathbf{r} = 0$
- Das sind gerade die Spalten von $(R - I)^\#$
- Bemerkung: alle Spalten sind Vielfache voneinander
- Bemerkung: das funktioniert auch für größere Matrizen, ist aber nicht mehr effizient

Euler's Satz über Rotationen

Jede Rotation kann mit Hilfe 3-er Winkel um (fast) beliebige Achsen zusammengesetzt werden.

Jede beliebige Rotation im Raum lässt sich als Rotation um eine bestimmte Achse mit einem bestimmten Winkel darstellen.

(Teil zwei haben wir gerade bewiesen. Teil eins führt zu Euler-Winkeln.)

Intermezzo: ein Film, in dem viele Interpolationen von Rotationen / Orientierungen vorkommen



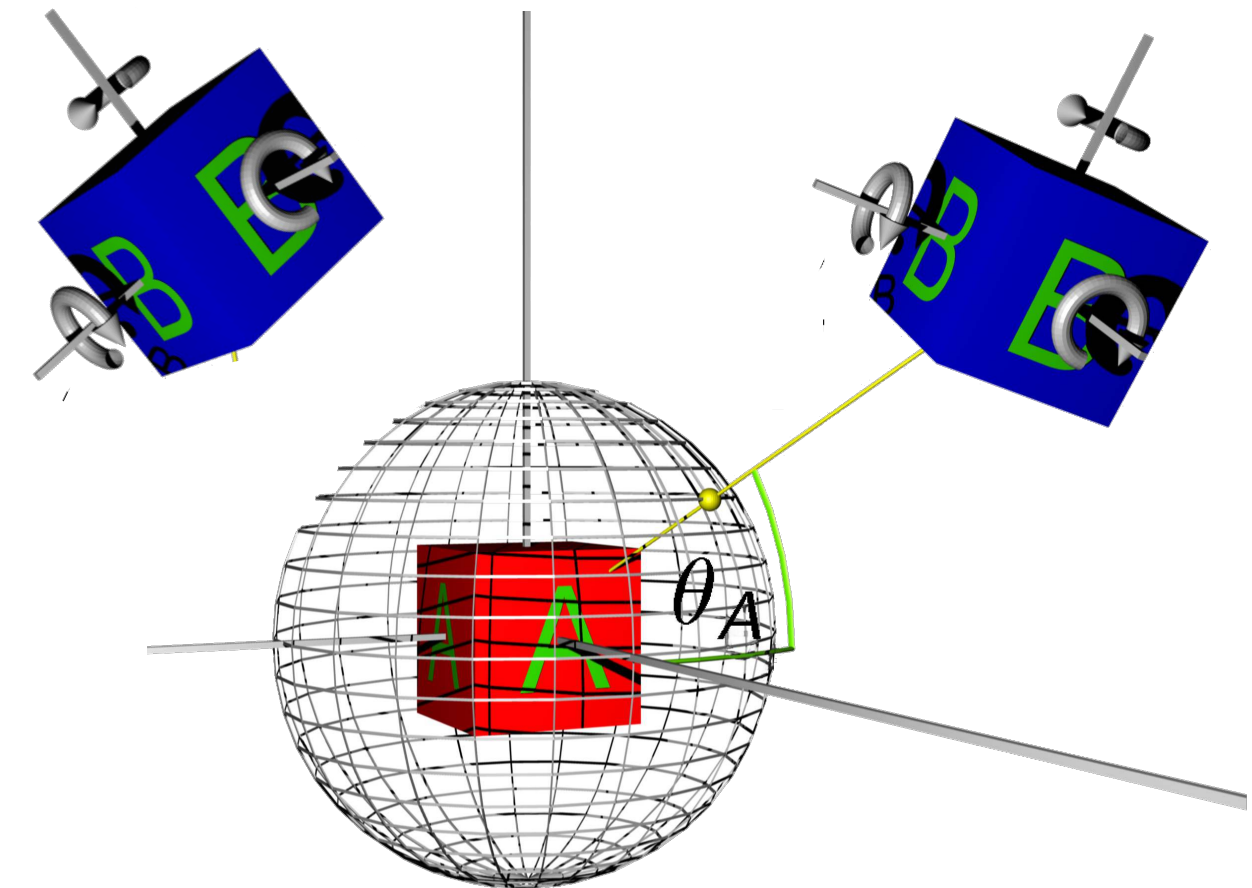
George Francis, Louis Kauffman,
Dan Sandin, Chris Hartman,
John Hart

<http://www.evl.uic.edu/hypercomplex/>

Interpolation von Orientierungen

- Definition:
Orientierung = "Lage" (*attitude / pose*)
 eines Objektes im Raum
 = Rotation aus dessen Null-Lage

Punkt	Orientierung
Vektor	Rotation
Null-Element = (0,0,0)	Null-Element = Einheitsmatrix



- Häufige Aufgabe:
 - Gegeben: zwei Orientierungen O_1 und O_2 für dasselbe Objekt
 - Gesucht: eine Methode $O(t)$ zur Interpolation zwischen O_1 und O_2 , die ästhetisch ansprechend und effizient ist
- Frage: welche Repräsentation ist dafür gut geeignet?

Vorbemerkungen

- Komplexe Zahlen kann man als Punkte in der Ebene betrachten
- Und als Rotation in der Ebene um den Ursprung !

$$e^{j\theta} = \cos\theta + j\sin\theta$$

$$v = re^{j\varphi} = r\cos\varphi + j r\sin\varphi$$

$$e^{j\theta} v = re^{j\theta} e^{j\varphi} = re^{j(\theta+\varphi)} = r\cos(\theta+\varphi) + j r\sin(\theta+\varphi)$$

- Wir können reelle Zahlen einfach invertieren: $x \cdot x^{-1} = 1$
- Auch für komplexe Zahlen können wir ein Inverses finden: $\frac{z \cdot z^*}{|z|^2} = 1$
- Gibt es etwas Analoges auch in "höheren Dimensionen"? → **Nein!**
- Z.B. eine "dreidimensionale" Verallgemeinerung von $\mathbb{C}$?
- Aber: im 4D klappt es wieder ... (fast)

- Erweiterung der komplexen Zahlen:

$$\mathbb{H} = \{ q \mid q = w + a \cdot \mathbf{i} + b \cdot \mathbf{j} + c \cdot \mathbf{k}, w, a, b, c \in \mathbb{R} \}$$

- Alternative Schreibweise:

$$q = (w, \mathbf{v})$$

- Axiome für die 3 **imaginären Einheiten**:

$$\mathbf{i}^2 = \mathbf{j}^2 = \mathbf{k}^2 = \mathbf{ijk} = -1$$

$$(\mathbf{ij})\mathbf{k} = \mathbf{i}(\mathbf{jk})$$

- Daraus folgen sofort diese Rechengesetze:

$$\mathbf{ij} = -\mathbf{ji} = \mathbf{k}$$

$$\mathbf{jk} = -\mathbf{kj} = \mathbf{i}$$

$$\mathbf{ki} = -\mathbf{ik} = \mathbf{j}$$

Eine Algebra über den Quaternionen

- Addition: $q_1 + q_2 = (w_1 + w_2) + (a_1 + a_2)\mathbf{i} + (b_1 + b_2)\mathbf{j} + (c_1 + c_2)\mathbf{k}$
- Skalierung: $s \cdot q = (sw) + (sa)\mathbf{i} + (sb)\mathbf{j} + (sc)\mathbf{k}$
- Multiplikation:
$$\begin{aligned} q_1 \cdot q_2 &= (w_1 + a_1\mathbf{i} + b_1\mathbf{j} + c_1\mathbf{k}) \cdot (w_2 + a_2\mathbf{i} + b_2\mathbf{j} + c_2\mathbf{k}) \\ &= (w_1w_2 - a_1a_2 - b_1b_2 - c_1c_2) + \\ &\quad (w_1a_2 + w_2a_1 + b_1c_2 - c_1b_2)\mathbf{i} + \\ &\quad (\dots \dots)\mathbf{j} + \\ &\quad (\dots \dots)\mathbf{k} \end{aligned}$$
- Konjugation: $q^* = w - a\mathbf{i} - b\mathbf{j} - c\mathbf{k}$
- Betrag (Norm): $|q|^2 = w^2 + a^2 + b^2 + c^2 = q \cdot q^*$
- Inverse eines Einheitsquaternions: $|q| = 1 \Rightarrow q^{-1} = q^*$

- Behauptung (o. Bew.):
 $\mathbb{H}$ mit der Multiplikation ist eine **nicht**-kommutative Gruppe.
- Bemerkung: manchmal ist es zweckmäßig, die Multiplikation zweier Quaternionen auch mit Hilfe einer Matrix-Multiplikation darzustellen

$$q_1 \cdot q_2 = \begin{pmatrix} w_1 & -a_1 & -b_1 & -c_1 \\ a_1 & w_1 & -c_1 & b_1 \\ b_1 & c_1 & w_1 & -a_1 \\ c_1 & -b_1 & a_1 & w_1 \end{pmatrix} \begin{matrix} \uparrow \\ q_2 \end{matrix} = \begin{pmatrix} w_2 & -a_2 & -b_2 & -c_2 \\ a_2 & w_2 & c_2 & -b_2 \\ b_2 & -c_2 & w_2 & a_2 \\ c_2 & b_2 & -a_2 & w_2 \end{pmatrix} \begin{matrix} \uparrow \\ q_1 \end{matrix}$$

Als Spaltenvektor geschrieben! Als Spaltenvektor!

Einbettung des 3D-Vektorraumes in $\mathbb{H}$

- Den Vektorraum $\mathbb{R}^3$ kann man in $\mathbb{H}$ so einbetten:

$$\mathbf{v} \in \mathbb{R}^3 \mapsto q_v = (0, \mathbf{v}) \in \mathbb{H}$$

- Definition:
Quaternionen der Form $(0, \mathbf{v})$ heißen **reine Quaternionen** (*pure quaternions*)

Darstellung von Rotationen mittels Quaternionen

- Gegeben sei Axis & Angle $(\varphi, \mathbf{r})$ mit $\|\mathbf{r}\| = 1$
- Definiere das dazu gehörige Quaternion als

$$q = \left(\cos \frac{\varphi}{2}, \sin \frac{\varphi}{2} \mathbf{r} \right) = \left(\cos \frac{\varphi}{2}, \sin \frac{\varphi}{2} r_x, \sin \frac{\varphi}{2} r_y, \sin \frac{\varphi}{2} r_z \right)$$

- Beobachtung: $|q| = 1$
- Zurückrechnen: $q = (w, a, b, c)$ sei gegeben, mit $|q| = 1$
Dann ist

$$\varphi = 2 \arccos(w) \quad \mathbf{r} = \frac{1}{\sin \frac{\varphi}{2}} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{1 - w^2}} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}$$

- Satz:
Jedes Einheitsquaternion kann man in der Form $(\cos \frac{\varphi}{2}, \sin \frac{\varphi}{2} \mathbf{r})$ darstellen.
- Beweis: siehe vorige Folie
- Theorem: **Rotation mittels eines Quaternions**
Sei $\mathbf{v} \in \mathbb{H}$ ein pures Quaternion und $q \in \mathbb{H}$ ein Einheitsquaternion. Dann beschreibt die Abbildung

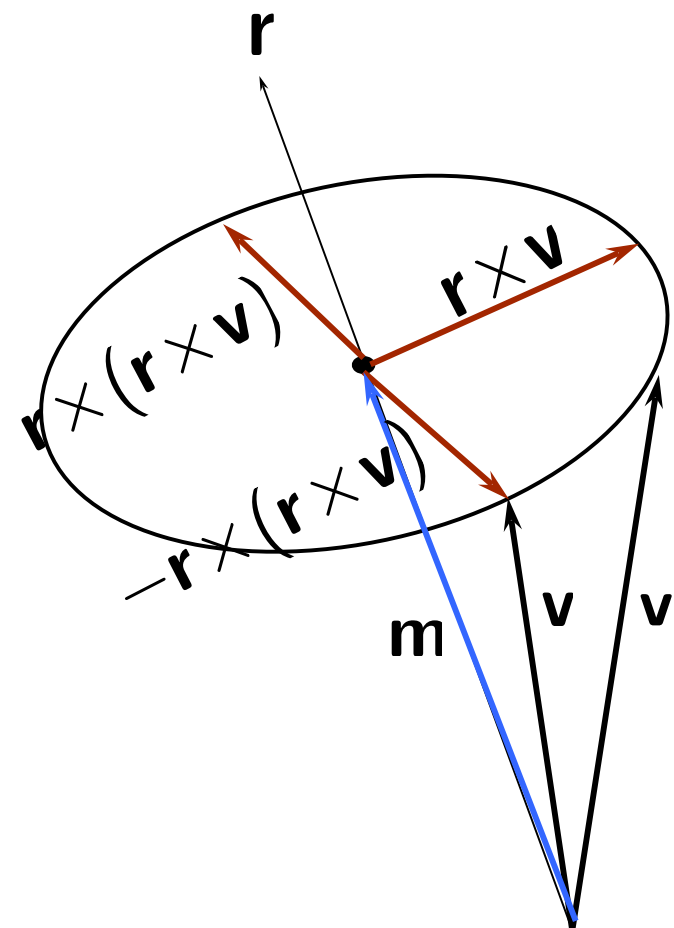
$$\mathbf{v} \mapsto q \cdot \mathbf{v} \cdot q^* = \mathbf{v}'$$
 eine (rechtshändige) Rotation von $\mathbf{v}$, wobei Winkel und Achse durch q bestimmt sind.

- Beweisskizze:

$$q \mathbf{v} q^* = (c, s\mathbf{r}) \cdot (0, \mathbf{v}) \cdot (c, -s\mathbf{r}) \quad \text{mit} \quad c = \cos \frac{\varphi}{2}, s = \sin \frac{\varphi}{2}$$

$$\stackrel{(*)}{=} \dots$$

$$= (0, \underbrace{\mathbf{v} + \sin \varphi \cdot \mathbf{r} \times \mathbf{v} + (1 - \cos \varphi) \cdot \mathbf{r} \times (\mathbf{r} \times \mathbf{v})})$$



$$\underbrace{\mathbf{v} + \mathbf{r} \times (\mathbf{r} \times \mathbf{v})}_{\mathbf{m}} + \sin \varphi \cdot \mathbf{r} \times \mathbf{v} + \cos \varphi \cdot (-\mathbf{r} \times (\mathbf{r} \times \mathbf{v})) = \mathbf{v}'$$

*) Zwischendurch benötigt man diese trigonometrischen Identitäten:

$$\sin \varphi = 2 \sin \frac{\varphi}{2} \cos \frac{\varphi}{2} \quad 1 - \cos \varphi = 2 \sin^2 \frac{\varphi}{2}$$

- Bemerkung: die so definierte Rotationsabbildung ist mit der Quaternionen-Multiplikation **verträglich**, d.h., dass

$$R_{q_1}(R_{q_2}(\mathbf{v})) = R_{q_1 \cdot q_2}(\mathbf{v})$$

- Caveat: die beiden Einheits-Quaternionen $q = (w, x, y, z)$ und $-q = (-w, -x, -y, -z)$ stellen die **selbe** Rotation dar!
 - M.a.W.: die 4-dim. Einheitskugel in $\mathbb{H}$ deckt die Gruppe aller Rotationen, $SO(3)$, **doppelt** ab!

Lineare Interpolation von Quaternionen

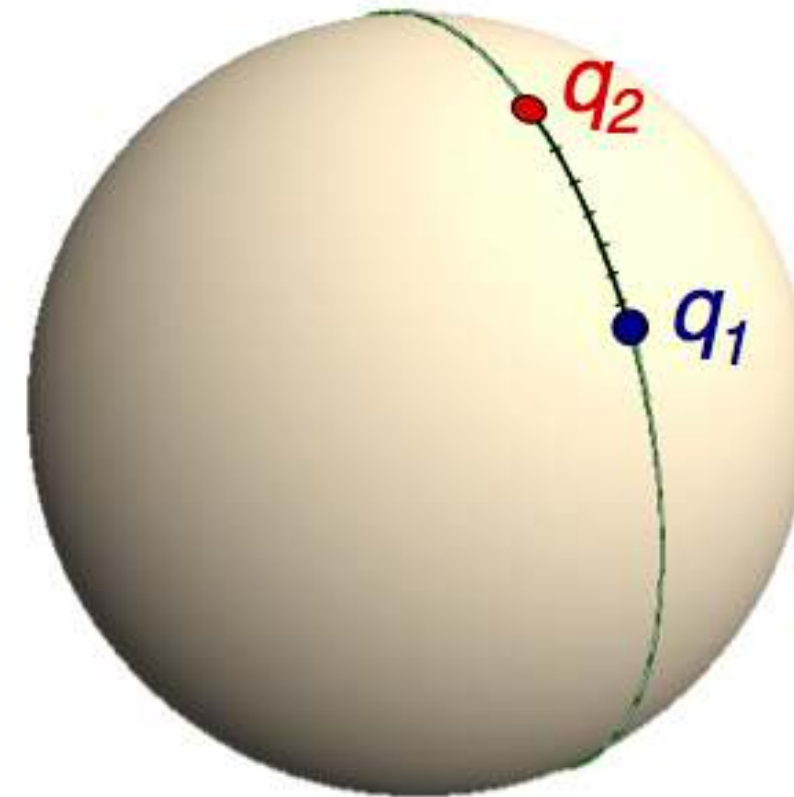
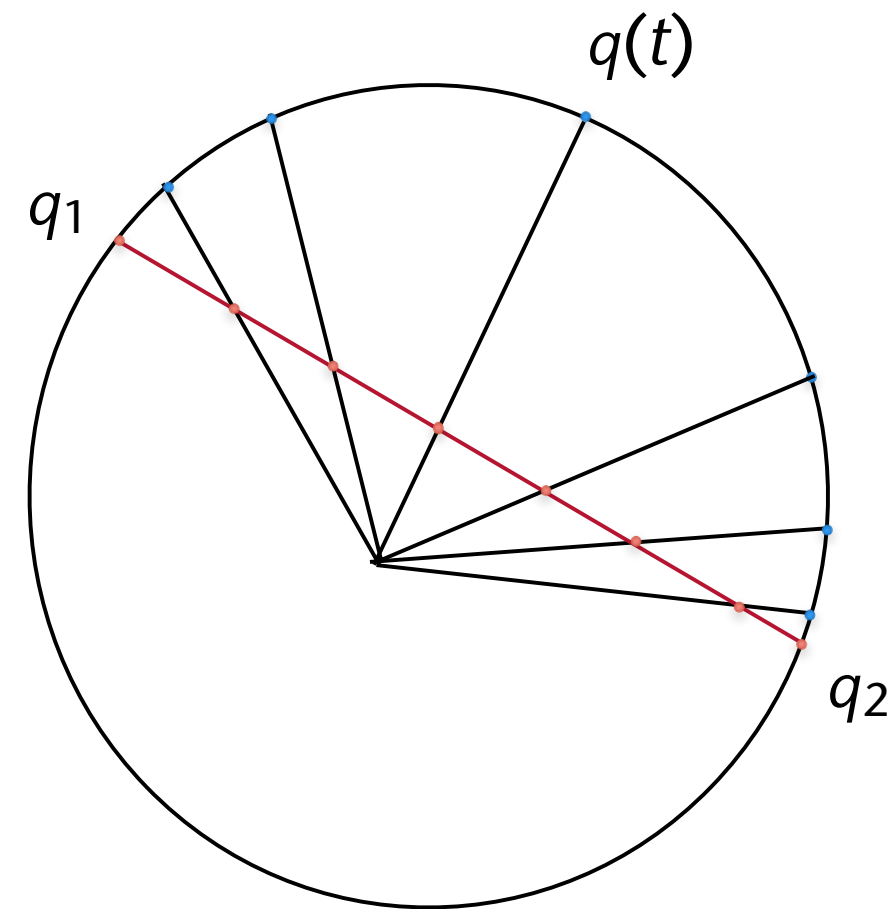
- Gegeben: zwei Orientierungen q_1 , q_2
- Aufgabe: Orientierungen dazwischen interpolieren
- Einfachste Lösung: linear interpolieren

$$q(t) = (1 - t)q_1 + tq_2 =: \text{lerp}(t; q_1, q_2)$$

- Wichtig: $q(t)$ hinterher immer **normieren**!
- Vorteil: **Kein Gimbal Lock!**

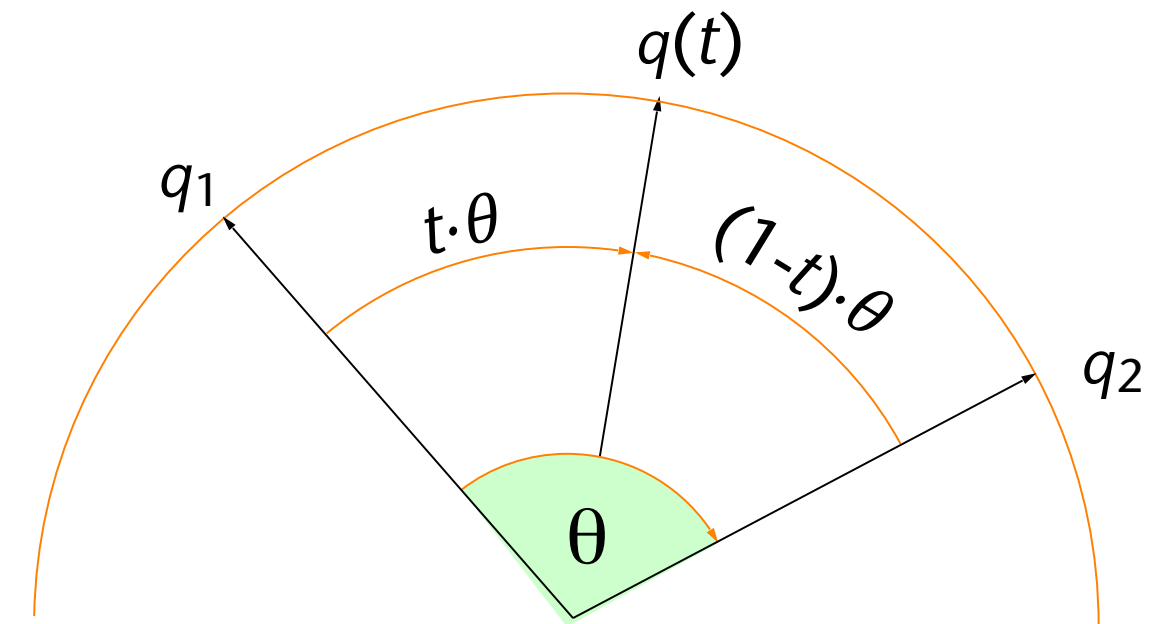
Sphärische lineare Interpolation

- Nachteil (noch): keine konstante Winkelgeschwindigkeit
- Problem: Geschwindigkeit an den "Enden" der Interpolation ist langsamer als in der "Mitte"



- Besser ist die **sphärische lineare Interpolation**
“*slerp*”

- Ansatz: interpoliere nicht die Distanz zwischen q_1 und q_2 , sondern den Winkel dazwischen



- $q(t) = \text{slerp}(t; q_1, q_2) = \frac{\sin((1-t)\theta)}{\sin \theta} q_1 + \frac{\sin(t\theta)}{\sin \theta} q_2$

mit $\cos \theta = q_1 \odot q_2$ Skalarprodukt der Vektoren q_1 und q_2

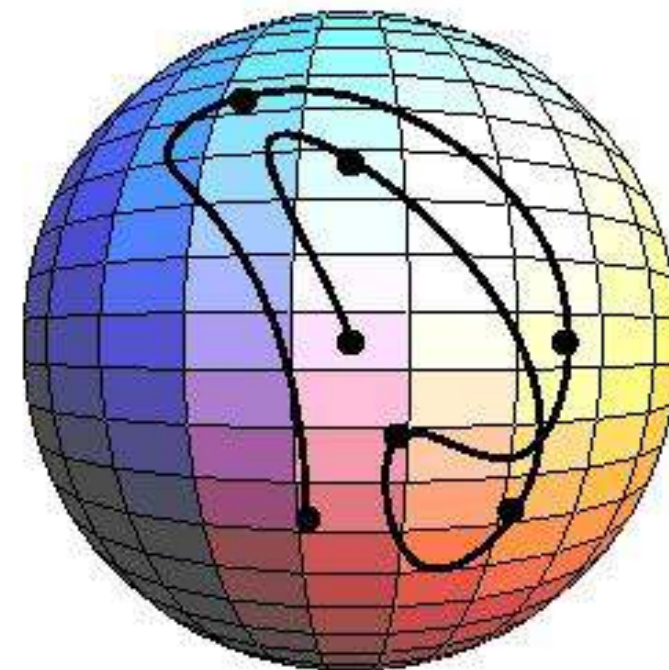
- In der Praxis interpoliert man die Quaternionen mit höherem Grad, mit irgend einem Standard-Interpolationsverfahren, das parametrische Kurven liefert
 - Z.B. Bezier-Kurven (oder B-Splines)
 - Mit De Casteljau geht das sehr einfach:

- Statt

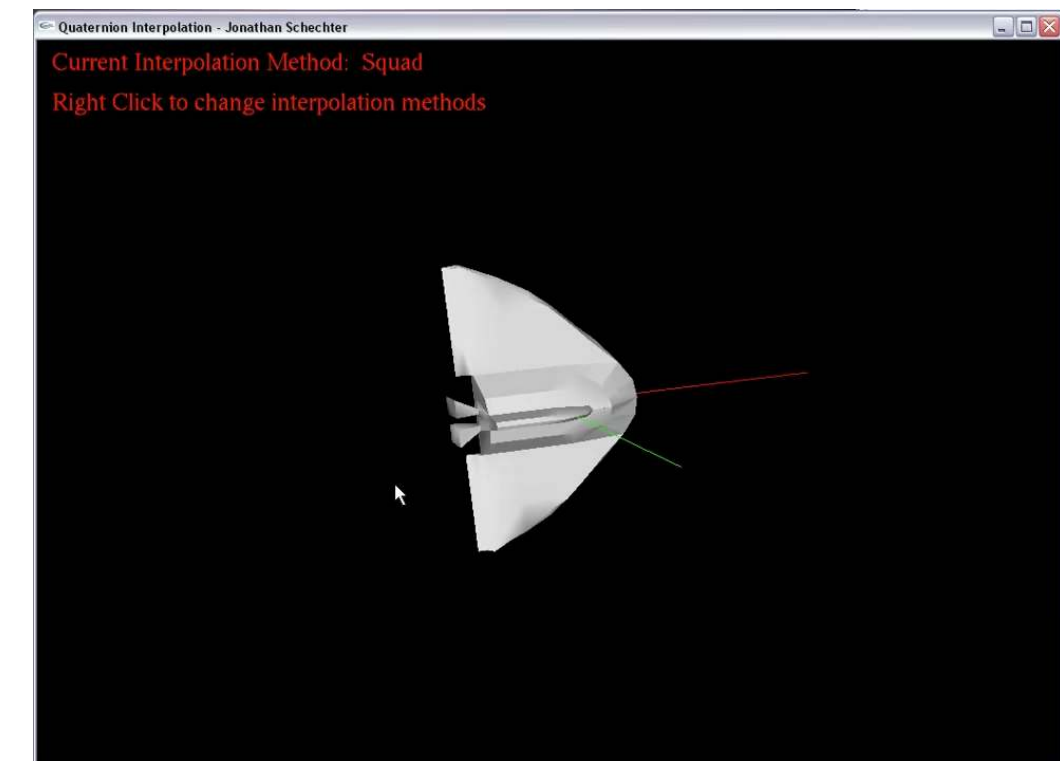
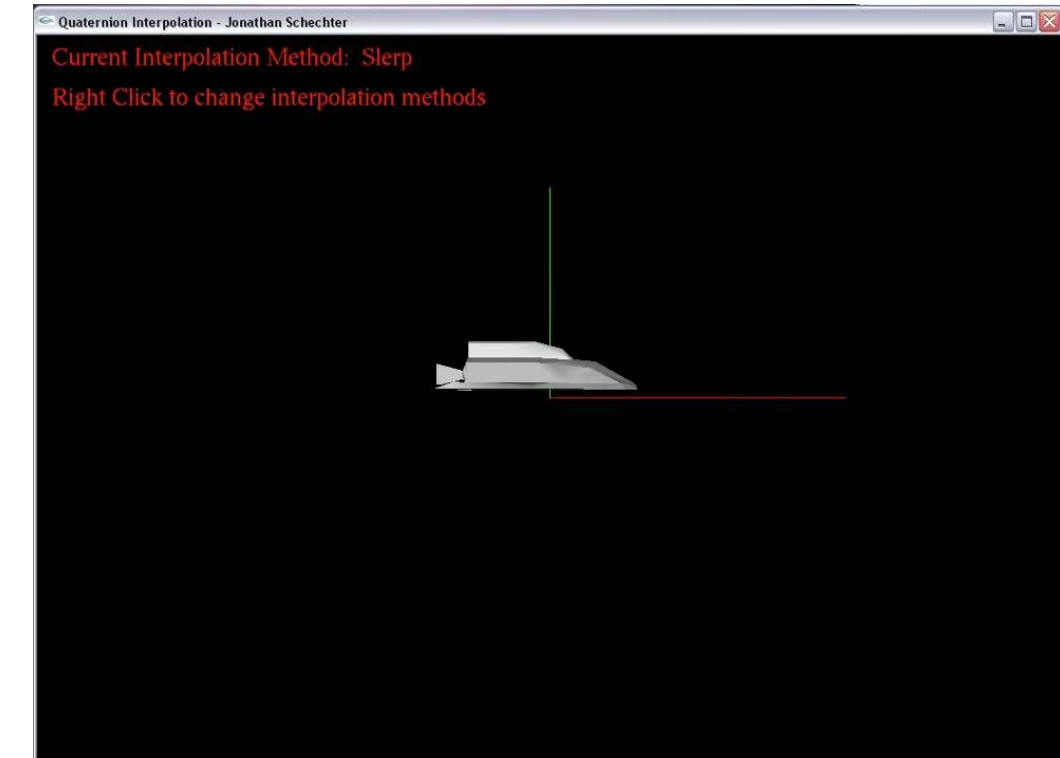
$$Q_i = (1 - t)P_i + tP_{i+1}$$

berechne fortgesetzt

$$Q_i = \text{slerp}(t; P_i, P_{i+1})$$



Lineare Interpolation mit slerp



Kubische Interpolation mit slerp

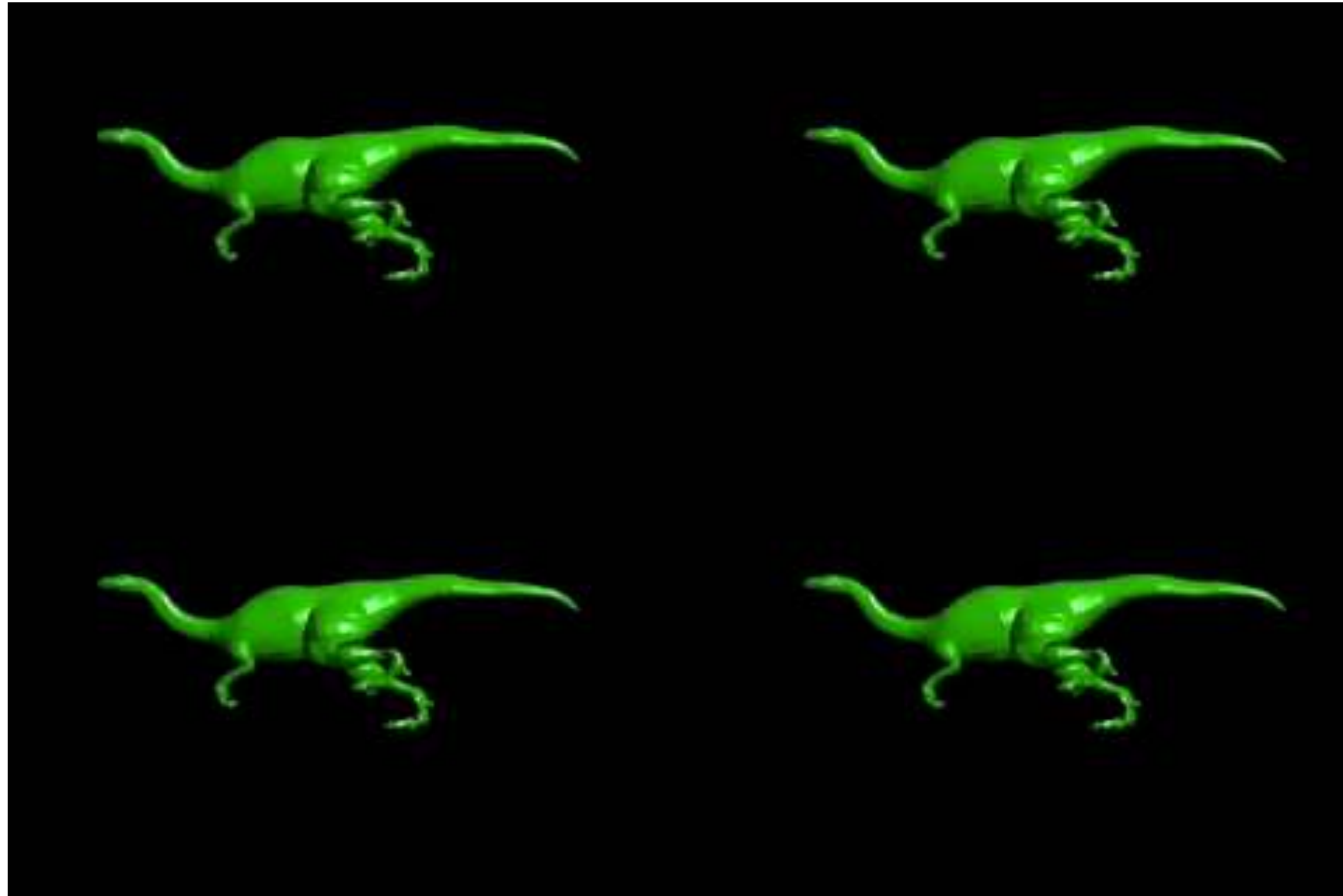
Vergleich der verschiedenen linearen Interpolationsarten

Interpolation
of Euler angles

Naïve interpolation
of matrices

Slerp of quaternions

Lerp of quaternions
(with normalization)



Gianluca Vatinno, Trinity College Dublin

Umwandlung Quaternion → Rotationsmatrix

- Zunächst das Analogon im 2D:
wenn a, b , mit $a^2 + b^2 = 1$, gegeben sind, dann ist

$$M = \begin{pmatrix} a^2 - b^2 & -2ab \\ 2ab & a^2 - b^2 \end{pmatrix}$$

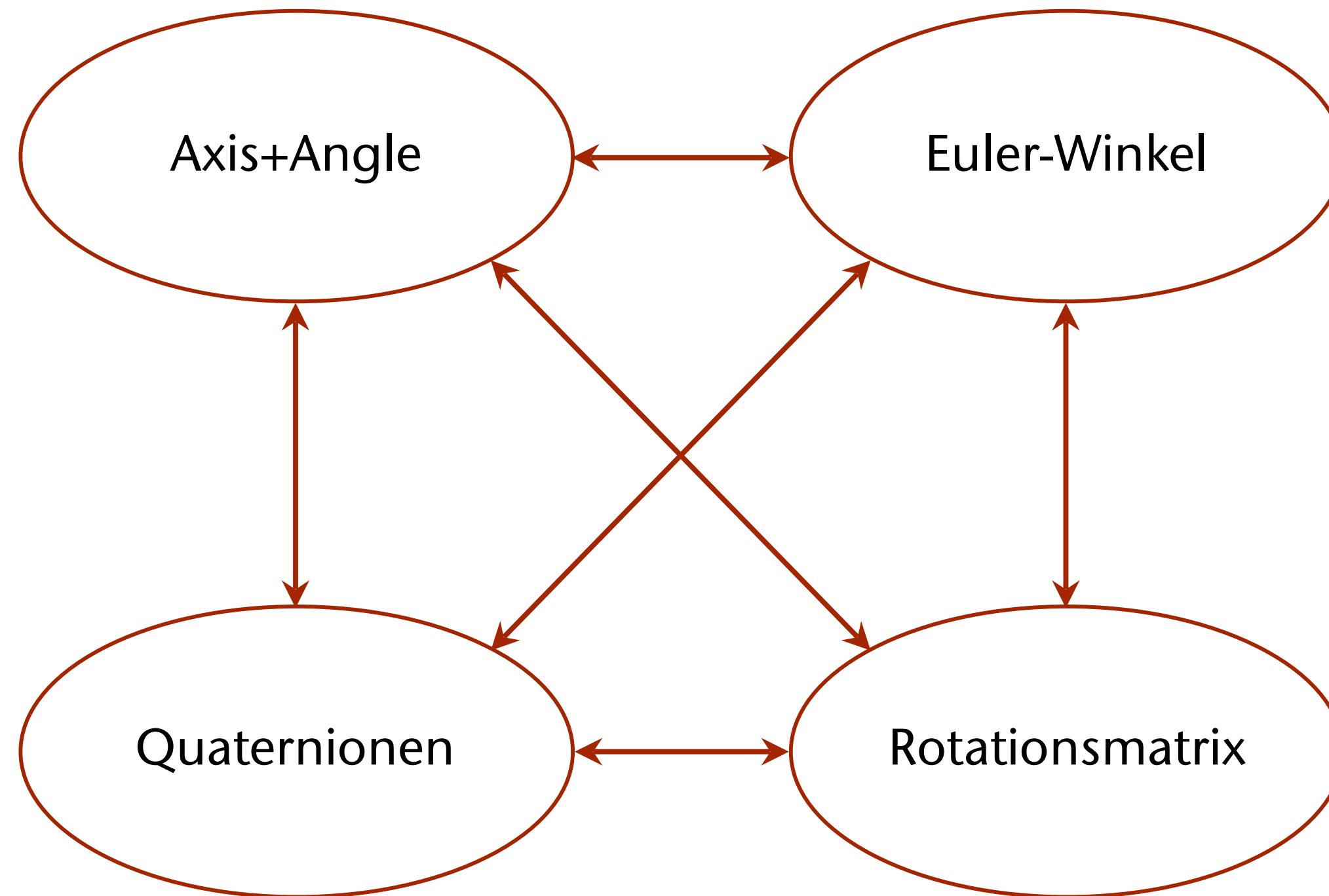
eine Rotationsmatrix.

- So ähnlich kann man eine Rotationsmatrix im 3D aus einem Quaternion $q = w + ai + bj + ck$, mit $|q| = 1$, bilden:

$$R(q) = \begin{pmatrix} w^2 + a^2 - b^2 - c^2 & 2ab - 2wc & 2ac - 2wb \\ -2ab + 2wc & w^2 - a^2 + b^2 - c^2 & 2bc - 2wa \\ -2ac + 2wb & -2bc + 2wa & w^2 - a^2 - b^2 + c^2 \end{pmatrix}$$

- Überprüfung:
 - Spalte $i \times$ Spalte $j = 0 \Leftrightarrow i \neq j$
 - Spalte $i \times$ Spalte $i = (w^2 + a^2 + b^2 + c^2)^2 = 1$

Alle Darstellungen von Rotation lassen sich ineinander umrechnen



Mehr Infos: siehe die Tutorials auf der Homepage der Vorlesung!

Vergleich der verschiedenen Arten zur Darstellung von Rotationen

Matrix	Euler-Winkel
Quaternionen	Achse+Winkel

Vergleich der verschiedenen Arten zur Darstellung von Rotationen

Matrix - o Ubiquitär in OpenGL / Game Engines - 16 Floats (evtl. 12) + Vektor rotieren = 15 FLOPs + Einheitliche Repräsentation für alle affinen Transformationen - Rundungsfehler nach mehrfacher Konkatination lassen sich nicht leicht korrigieren - Konkat. von Rotationen = 45 FLOPs	Euler-Winkel + Intuitiv (zunächst) + 3 Floats - Gimbal lock - keine Algebra (Rechenop.) darauf
Quaternionen + Intuitiv + 4 Floats + Rundungsfehler nach mehrfacher Konkatination lassen sich leicht korrigieren (einfach normieren) + Konkat. von Rotationen = 28 FLOPs - Vektor rotieren = 30 FLOPs	Achse+Winkel + Sehr intuitiv + 3 Floats - keine Algebra (Rechenop.) darauf - Vektor rotieren = 40 FLOPs

Der virtuelle Trackball

- Interaktionsaufgabe: ein Objekt um eine beliebige Achse rotieren
- Mit echtem Trackball ist es trivial
- Wie gibt man Rotationen mit der 2D-Maus ein?



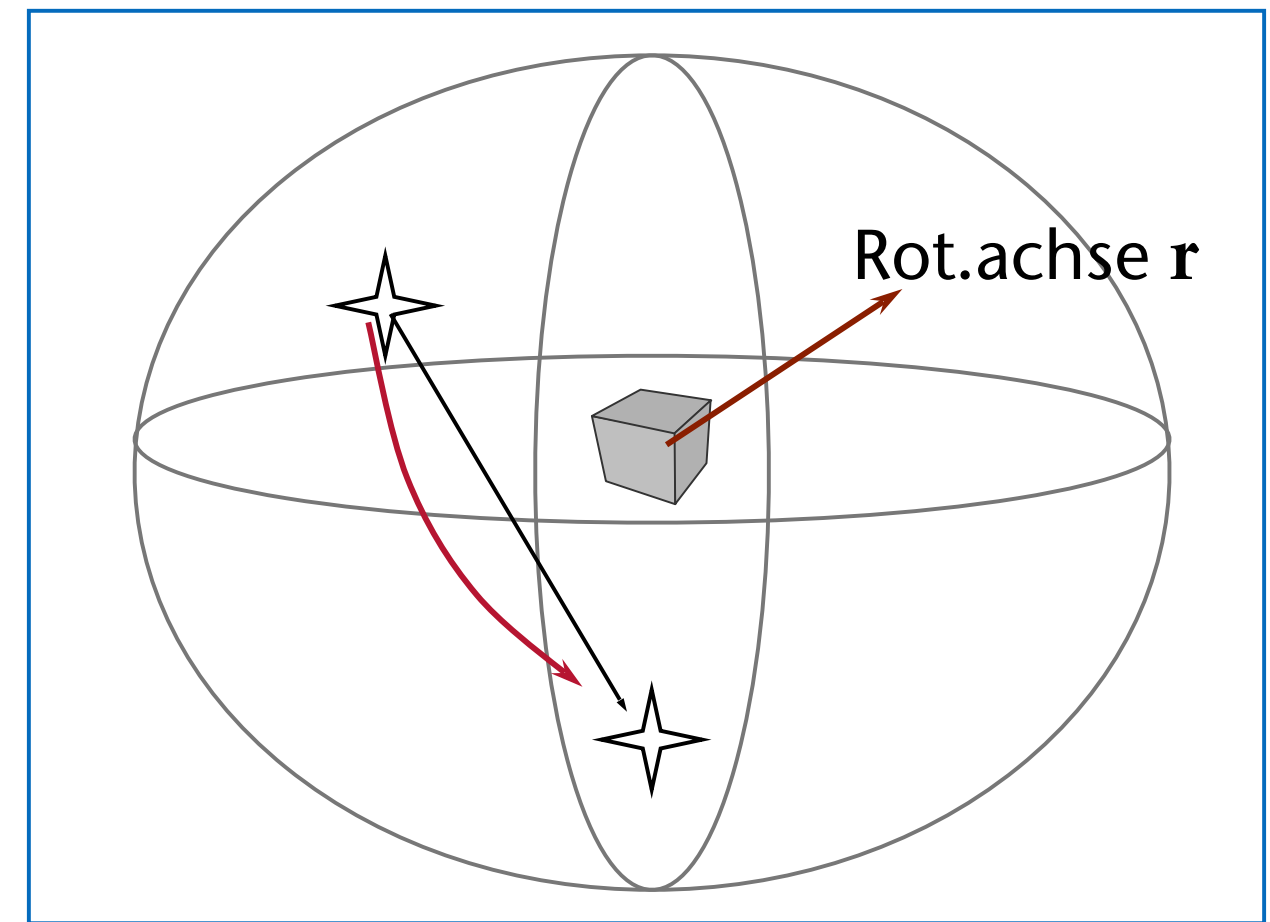
Die Interaktionsmetapher

- Idee:
 - Lege gedachte (virtuelle) Kugel um das Objekt
 - Kugel kann um ihr Zentrum rotieren
 - Maus pickt Punkt auf Oberfläche, den man zieht
- Geg.: Startpunkt = (x_1, y_1) , Endpunkt = (x_2, y_2) (in 2D!)
- Ges.: Rotationsachse $\mathbf{r}$ (in 3D), Rotationswinkel
- Berechnung:

1. Bestimme 3D Punkte

$$\mathbf{p}_i = (x_i, y_i, z_i) \quad z_i = \sqrt{1 - (x_i^2 + y_i^2)}$$

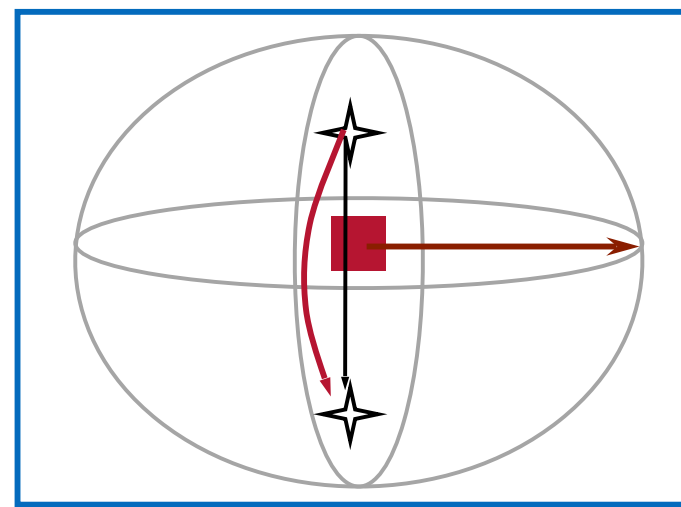
2. Rotationsachse $\mathbf{r} = \mathbf{p}_1 \times \mathbf{p}_2$



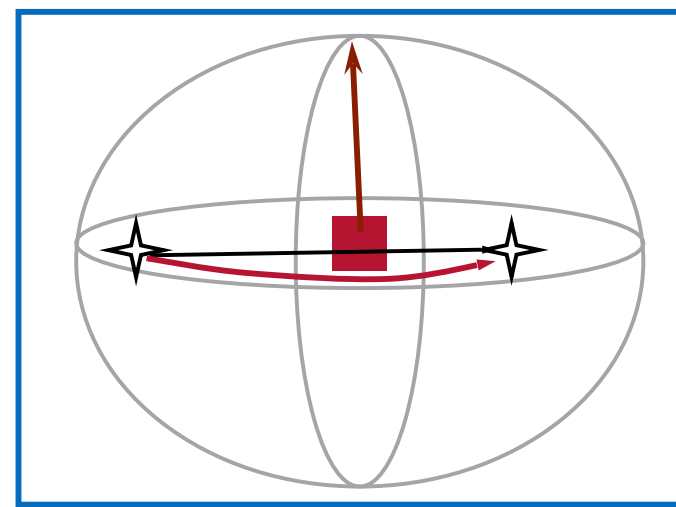
Gedachter Weg
auf der Kugel
= Segment des
Großkreises

Weg der
Maus im
Fenster

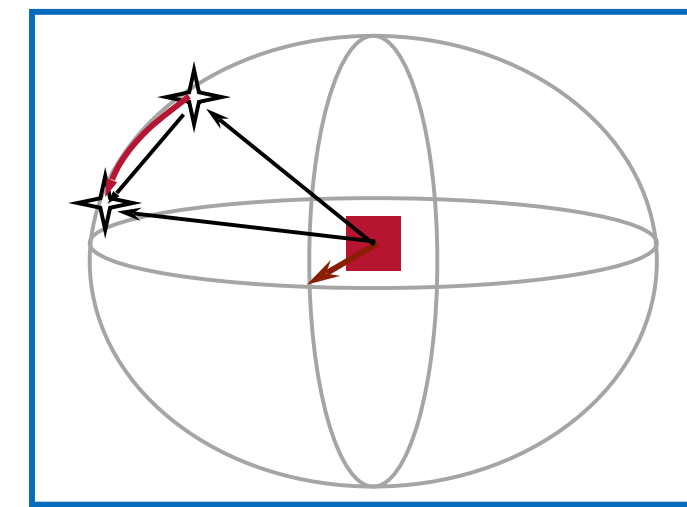
- Variante 1: $\mathbf{p}_1$ = erster Mausklick, $\mathbf{p}_2$ = aktuelle Mausposition: unintuitiv
- Variante 2: $\mathbf{p}_1$ = Mausposition vom vorigen Frame, $\mathbf{p}_2$ = aktuelle Mausposition: intuitiv, aber Rotation exakt um Z-Achse unmöglich



X



Y



Z

- Verbesserungen:
 - "Spinning trackball" vermeidet häufiges Nachfassen
 - "Snapping" für exaktes Rotieren um eine Koord.achse
 - Was macht man, wenn $\mathbf{p}_2$ die Ellipse verlässt? → andere 3D-Fläche verwenden, die an der Silhouette stetig anschließt

Bemerkungen

- Die Rotationsachse $\mathbf{r}$ ist zunächst im Kamera-Koordinatensystem definiert!
 - Sie muss aber nach Weltkoordinaten oder Obj.koordinaten zurückgerechnet werden (je nach dem, ob diese Rotation als letztes oder als erstes auf das Obj angewendet werden soll)
- Achtung: bei Variante 2 (inkrementeller Trackball) werden sehr viele Rotationen mit sehr kleinen Winkeln akkumuliert (pro Frame eine kleine Rotation) → achte auf numerische Robustheit und Drift

Affine Abbildungen

- Welche elementare Transformation fehlt uns noch?
- Translation:

$$X' = X + \mathbf{t}$$

- Pragmatische Definition:

Affine Abbildungen wirken auf Punkte, und bilden Geraden wieder auf Geraden, Ebenen wieder auf Ebenen ab.

Alle affinen Abbildungen sind von der Form

$$\mathbf{p}' = M\mathbf{p} + \mathbf{t}$$

wobei $\mathbf{p}$ der Ortsvektor zum Punkt P ist.

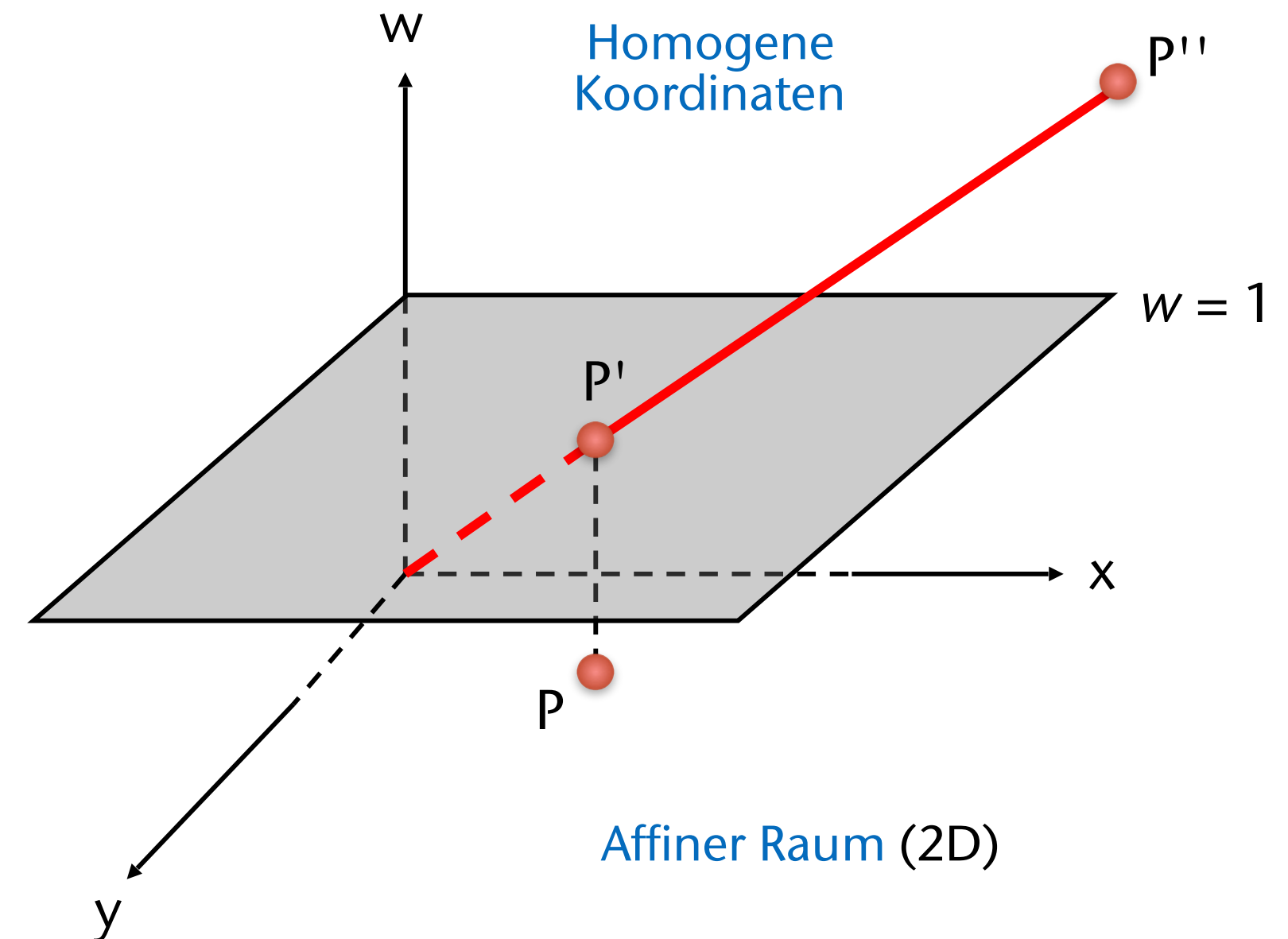
- Problem: affine Transformationen können **nicht** in Form einer 3x3-Matrix dargestellt werden

Lösung: Homogene Koordinaten im 3D

- "Trick" ([Homogenisierung](#)):
 - Bette die Räume der 3D-Punkte und 3D-Vektoren in den 4D-Raum ein
 - Homogener Punkt $\mathbf{p} = (p_x, p_y, p_z, 1)$
 - Homogener Vektor $\mathbf{v} = (v_x, v_y, v_z, 0)$
- Vorteil: wir können mit beiden weiterrechnen, als wären es Vektoren
 - Achtung: dabei ist $w \neq 0$ und $w \neq 1$ *erlaubt* und kann vorkommen!
 - Nicht erlaubt: Wechsel von $w=0$ zu $w \neq 0$ und umgekehrt!
- Rück-[Projektion](#):
 - Der homogene 4D-Vektor $\mathbf{p} = (x, y, z, w)$ $w \neq 0$
beschreibt den 3D-Punkt an der Stelle $P = \left(\frac{x}{w}, \frac{y}{w}, \frac{z}{w}\right)$
 - Der 4D-Vektor $\mathbf{v} = (v_x, v_y, v_z, 0)$
beschreibt den 3D-Vektor $\mathbf{v} = (v_x, v_y, v_z)$

Veranschaulichung durch Analogie im 2D

- Erweitere Punkt $P = (x, y)$ zu $P' = (x, y, 1)$
- Assoziiere Linie $w \cdot (x, y, 1) = (wx, wy, w)$ mit P'
- M.a.W.: ein 3D-Vektor (x, y, w) beschreibt ...
 - ... den 2D-Punkt $(x/w, y/w)$ für $w \neq 0$
 - ... den 2D-Vektor (x, y) für $w = 0$



Addition von Punkten und Vektoren in homogenen Koordinaten

- Punkt + Vektor = Punkt

$$\begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_x + v_x \\ p_y + v_y \\ p_z + v_z \\ 1 \end{pmatrix}$$

- Vektor + Vektor = Vektor

$$\begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_x + v_x \\ u_y + v_y \\ u_z + v_z \\ 0 \end{pmatrix}$$

- Punkt – Punkt = Vektor

$$\begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_x - q_x \\ p_y - q_y \\ p_z - q_z \\ 0 \end{pmatrix}$$

Caveat

- Achtung: im Allgemeinen darf man homogene Punkte nicht einfach im 4D voneinander subtrahieren!
- Subtraktion in 4D vor der Rückprojektion ergäbe:

$$\begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ p_w \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \\ q_w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_x - q_x \\ p_y - q_y \\ p_z - q_z \\ p_w - q_w \end{pmatrix} \hat{=} \frac{\mathbf{p}_{xyz} - \mathbf{q}_{xyz}}{p_w - q_w}$$

- Subtraktion in 3D nach der Rückprojektion ergibt:

$$\frac{\mathbf{p}_{xyz}}{p_w} - \frac{\mathbf{q}_{xyz}}{q_w} = \frac{q_w \cdot \mathbf{p}_{xyz} - p_w \cdot \mathbf{q}_{xyz}}{p_w \cdot q_w}$$

Kurzschreibweise für den Vektor (q_x, q_y, q_z)

Lineare Abbildungen in homogenen Koordinaten

- 3x3-Form:

$$M \cdot \mathbf{v} = \begin{pmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix}$$

- Homogene Form:

$$M_{4 \times 4} \cdot \mathbf{v}' = \begin{pmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & 0 \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & 0 \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ 0 \end{pmatrix}$$

Translation

- Translation eines Punktes:

$$T_t \cdot P = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_x + t_x \\ p_y + t_y \\ p_z + t_z \\ 1 \end{pmatrix}$$

- "Translation" eines Vektors:

$$T_t \cdot \mathbf{v} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ 0 \end{pmatrix}$$

- Inverse:

$$(T_t)^{-1} = T_{-t}$$

Allgemeine affine Abbildungen im 3D

- 3x3-Form:

$$M \cdot \mathbf{p} + t = \begin{pmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix}$$

- Homogene Form:

$$M_{4 \times 4} \cdot \mathbf{p}_4 = \begin{pmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & t_x \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & t_y \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{pmatrix}$$

➤ In homogenen Koordinaten lassen sich sogar alle affinen Abbildungen als einfache Matrix-Vektor-Multiplikation darstellen!

Die elem. linearen Transformationen in homogenen Koordinaten

- Rotation:

$$R_y(\phi) = \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- Skalierung:

$$S(s_x, s_y, s_z) = \begin{pmatrix} s_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- Scherung:

$$H_{xz}(s) \cdot \mathbf{p} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & s & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_x + sp_z \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{pmatrix}$$

Starre Transformationen (*Rigid-Body Transform*)

- Hintereinanderausführung von Translationen und Rotationen
 - Aka. ([Euklidische Transformation](#))
- Erhält Längen und Winkel eines Objektes
 - Objekte werden nicht deformiert / verzerrt

- Allgemeine Form:

$$M = T_t R = \begin{pmatrix} r_{00} & r_{01} & r_{02} & t_x \\ r_{10} & r_{11} & r_{12} & t_y \\ r_{20} & r_{21} & r_{22} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- Inverse Rigid-Body Transformation:

$$M^{-1} = (T_t R)^{-1} = R^{-1} T_t^{-1} = R^T T_{-t}$$

$$M = \begin{pmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{pmatrix} \quad M^{-1} = \begin{pmatrix} R^T & -R^T t \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Zur Anatomie der Matrix

- Betrachte "erst Rotation, dann Translation":

$$P' = (TR)P = MP = R_{3 \times 3} \cdot P + \mathbf{t}$$

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & 0 \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & 0 \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$= \left(\begin{array}{ccc|c} R_{11} & R_{12} & R_{13} & t_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & t_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & t_z \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) = \begin{pmatrix} R & \mathbf{t} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- Betrachte "erst Translation, dann Rotation":

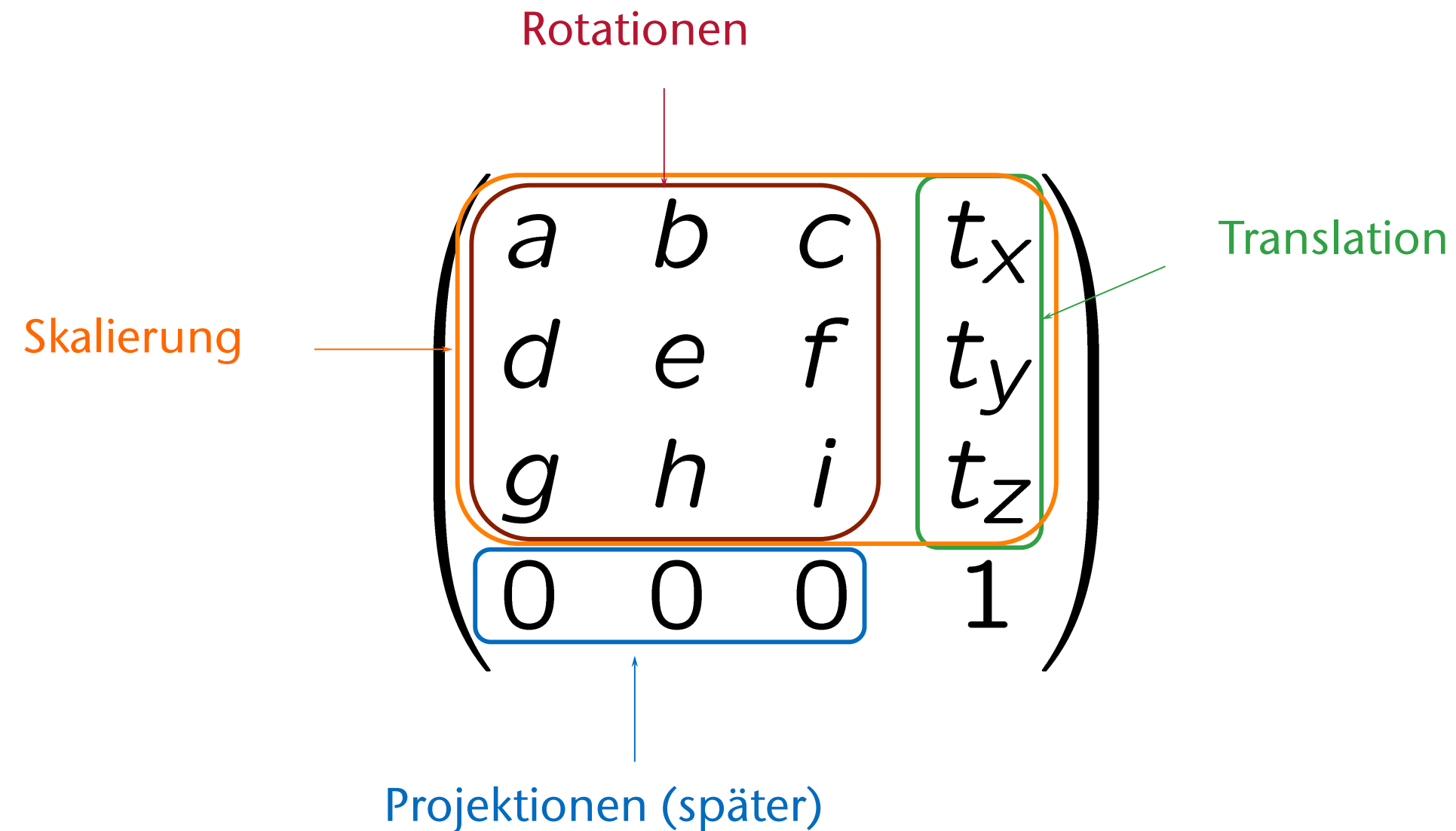
$$P' = (RT)P = MP \cong R(P + \mathbf{t}) = R_{3 \times 3}P + R_{3 \times 3}\mathbf{t}$$

$$M = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & 0 \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & 0 \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & T_x \\ 0 & 1 & 0 & T_y \\ 0 & 0 & 1 & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} R_{3 \times 3} & R_{3 \times 3} T_{3 \times 1} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{pmatrix}$$

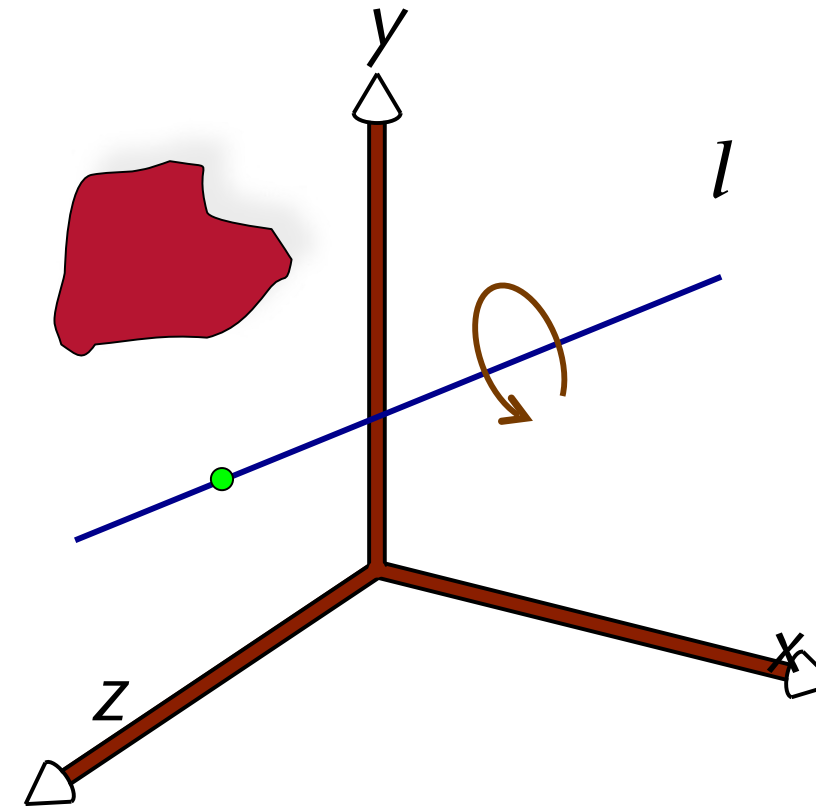
Zur Anatomie einer Matrix

- Allgemeiner Aufbau (vereinfacht!):



Rotation um eine beliebige Achse in 3D

- Man möchte mit θ um die Gerade l rotieren, Gerade geht durch den beliebigen Punkt p



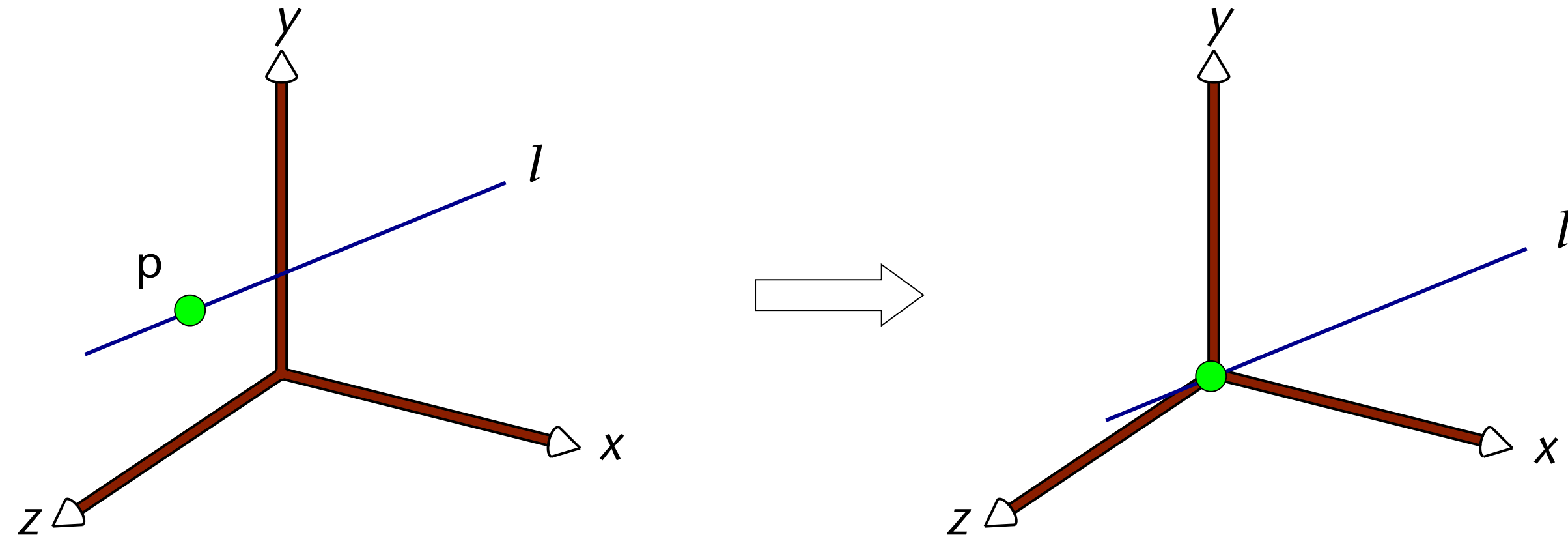
- Gesucht: eine Matrix M , die diese Transformation enthält
- Wir wissen, wie man um eine Koordinatenachse rotiert
- Somit müssen wir die Szene in eine Situation transformieren, mit der wir umgehen können

Grundidee

1. Verschiebe einen Punkt der Geraden in den Ursprung
2. Rotiere um eine Achse, so daß l in einer Koordinatenebene liegt
3. Rotiere um eine weitere Achse, so daß l auf einer Koordinatenachse liegt
4. Rotiere um diese Achse mit Winkel θ
5. Invertierte Rotation um die Koordinatenachse aus Schritt 3
6. Invertierte Rotation um die Koordinatenachse aus Schritt 2
7. Invertiere Verschiebung aus Schritt 1, so daß l wieder in Ausgangsposition

Schritt 1

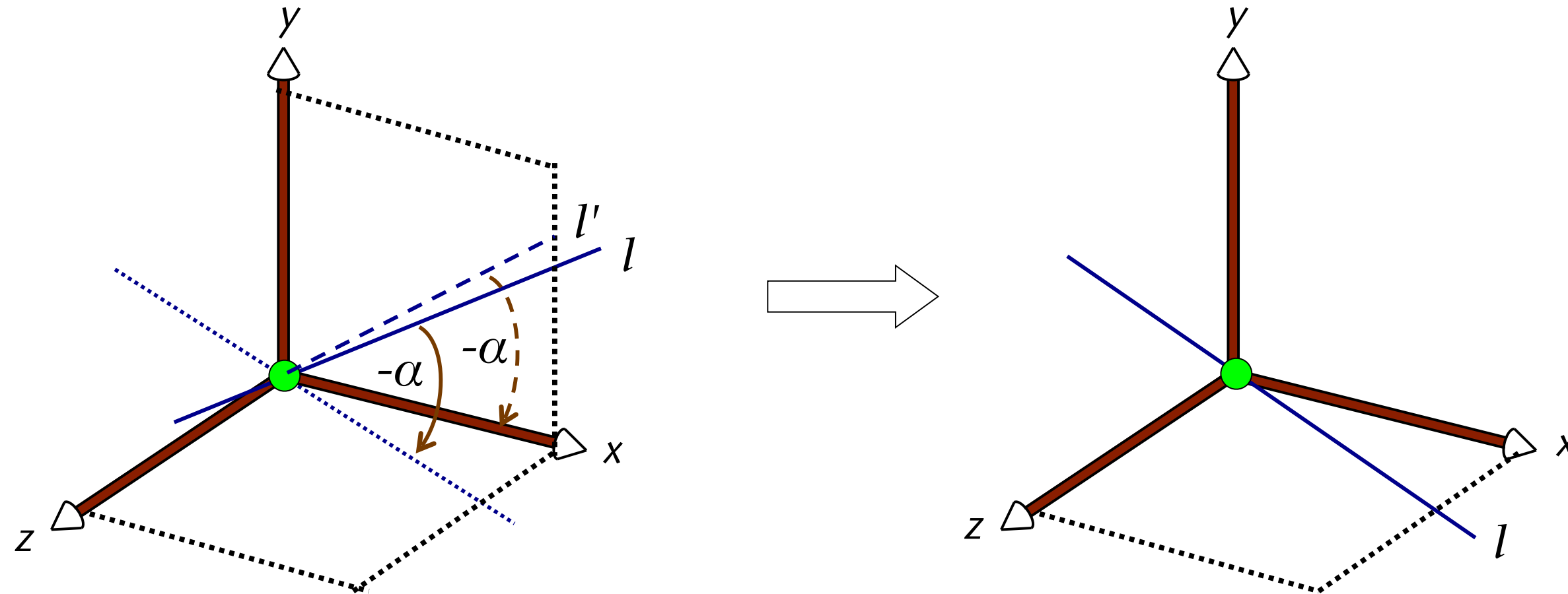
- Verschiebe Gerade, so daß ein Punkt von l im Ursprung liegt:



$$T_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -p_x \\ 0 & 1 & 0 & -p_y \\ 0 & 0 & 1 & -p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Schritt 2

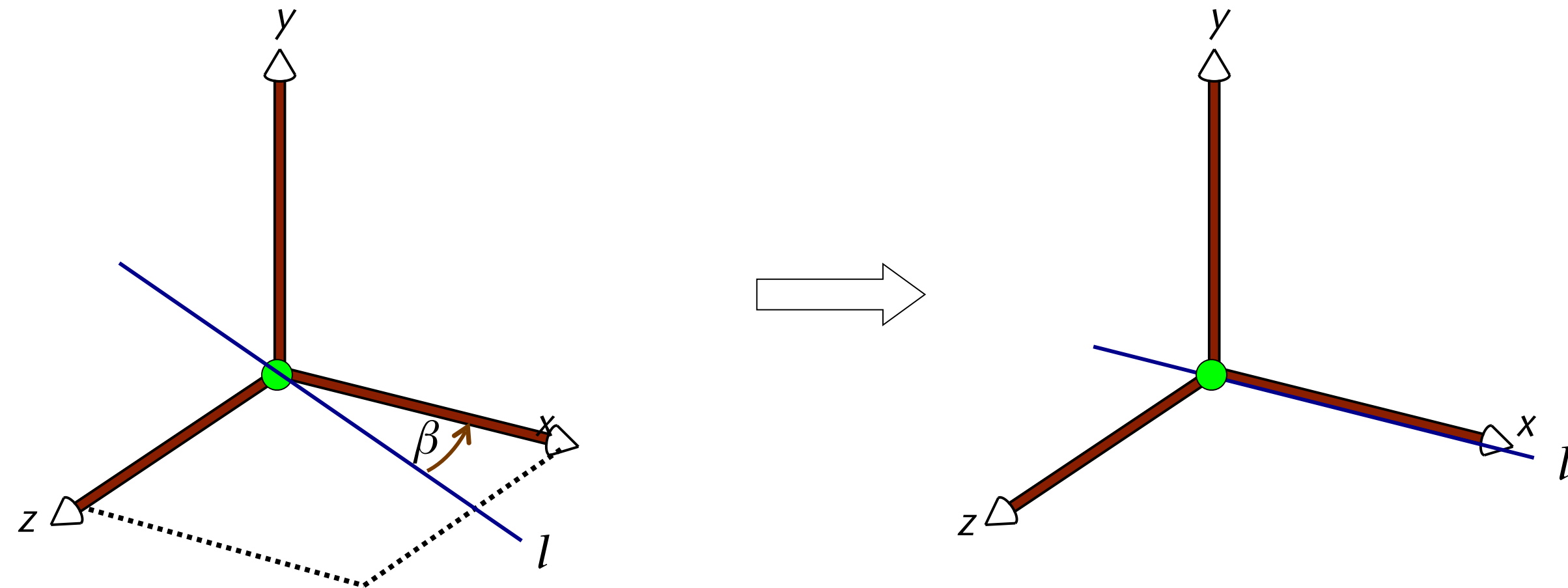
- Rotiere mit $-\alpha$ um die z -Achse, so daß l in der xz -Ebene liegt



$$R_z(-\alpha) = \begin{pmatrix} \cos(-\alpha) & -\sin(-\alpha) & 0 & 0 \\ \sin(-\alpha) & \cos(-\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 & 0 \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Schritt 3

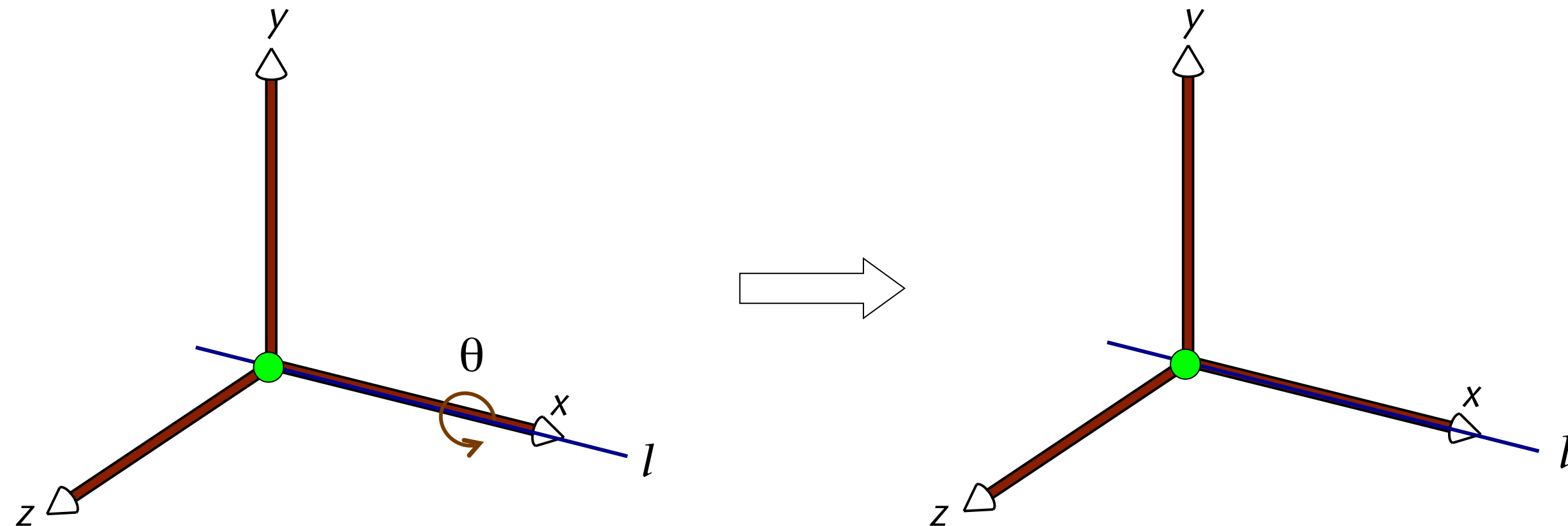
- Rotiere mit β um die y -Achse damit Gerade auf der x -Achse liegt



$$R_y(\beta) = \begin{pmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Schritt 4

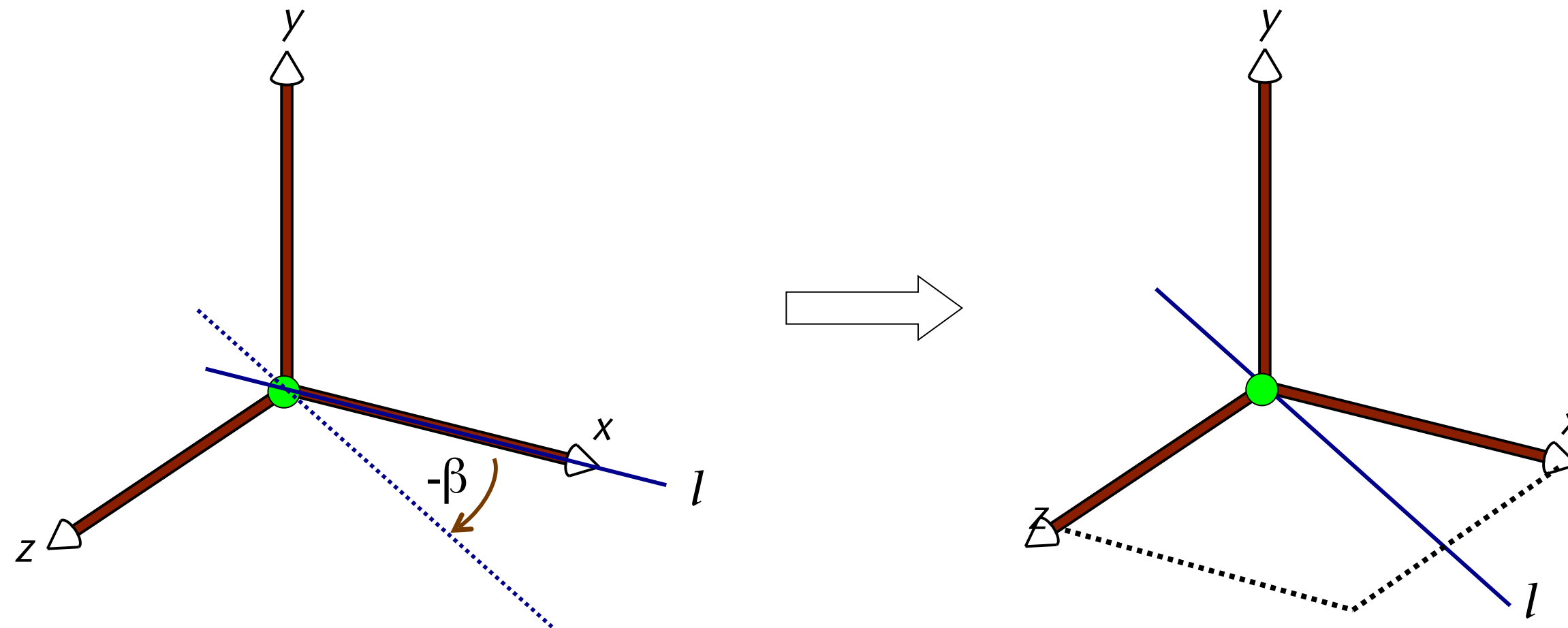
- Durchführen der gewünschten Rotation (rotiere mit θ um x -Achse)



$$R_x(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Schritt 5

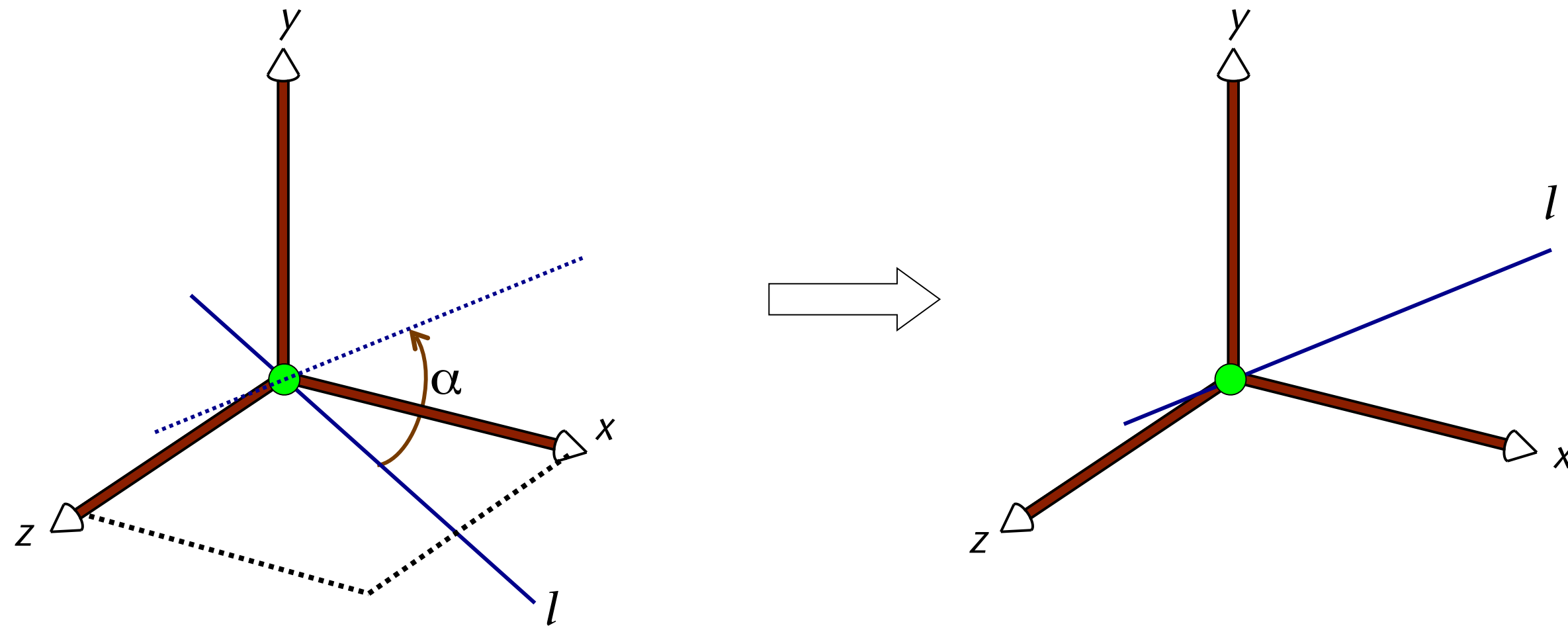
- Invertiere Rotation von l aus Schritt 3: rotiere mit $-\beta$ um die y -Achse



$$R_y(-\beta) = \begin{pmatrix} \cos(-\beta) & 0 & \sin(-\beta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(-\beta) & 0 & \cos(-\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\beta) & 0 & -\sin(\beta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Schritt 6

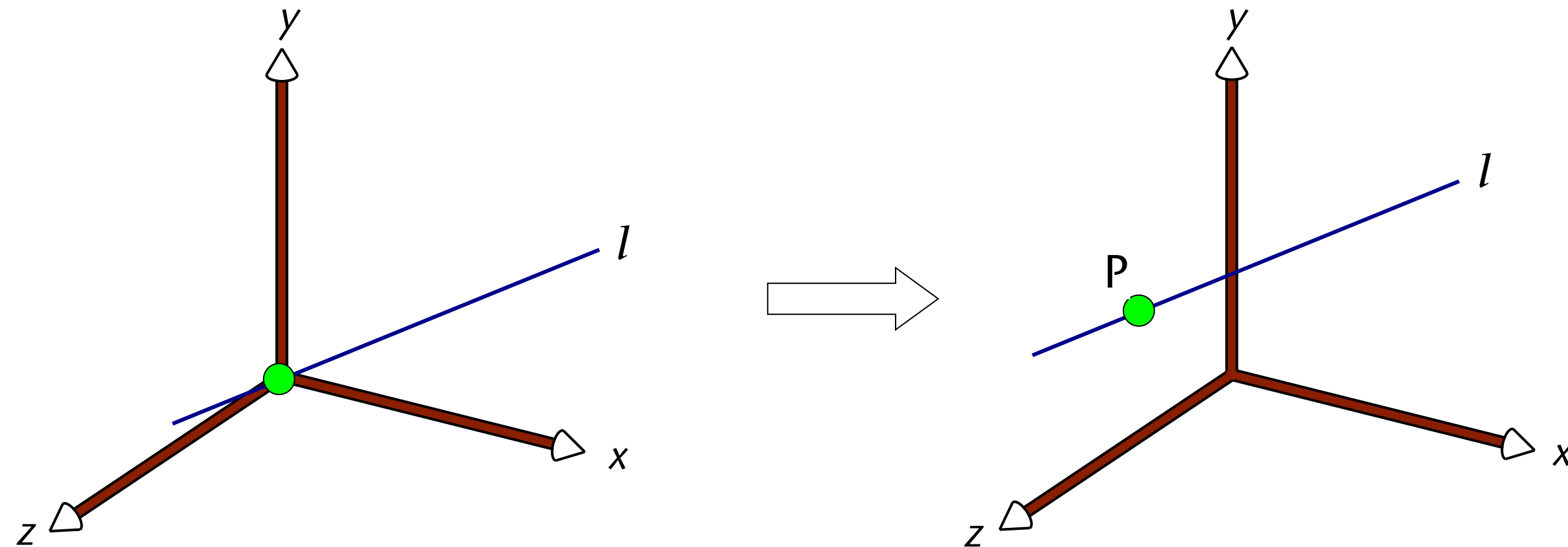
- Invertiere Rotation aus Schritt 2: rotiere mit α um z-Achse



$$R_z(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Schritt 7

- Invertiere die Translation aus Schritt 1



$$T_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & 1 & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

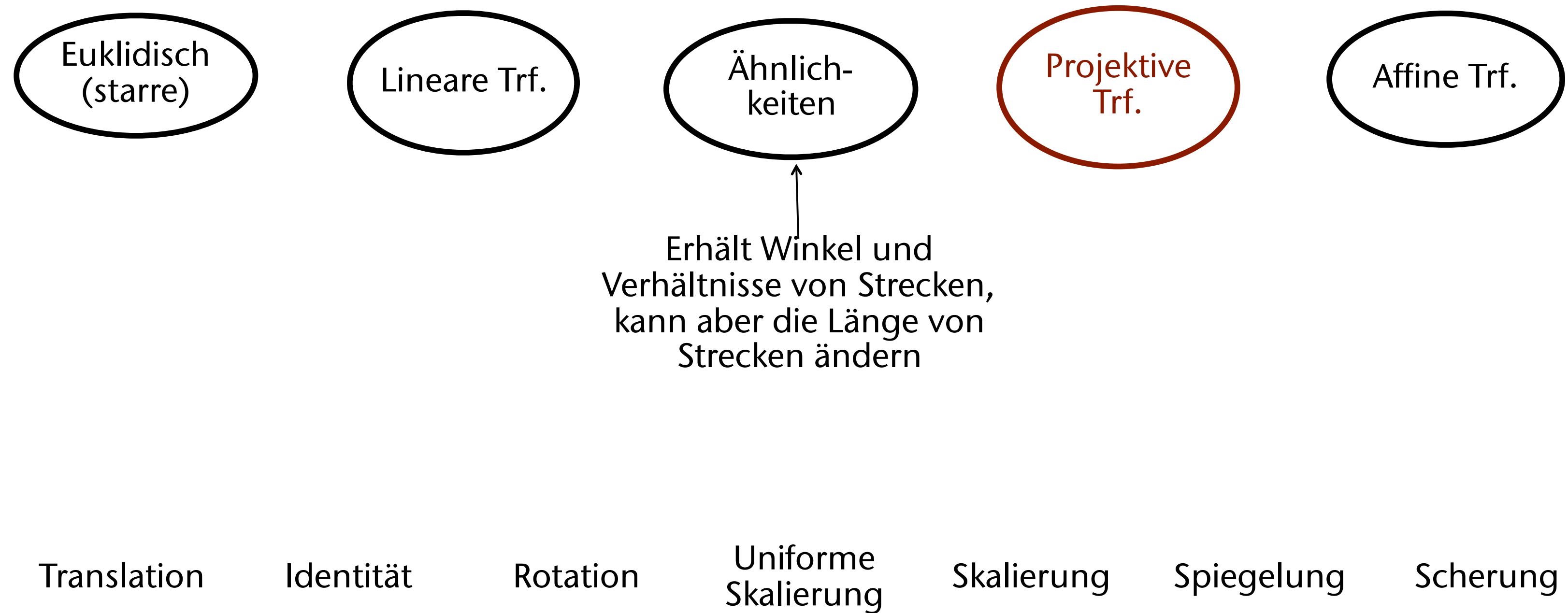
Zusammenfassung

- Die vollständige Transformation zum Rotieren um eine beliebige Achse ist:

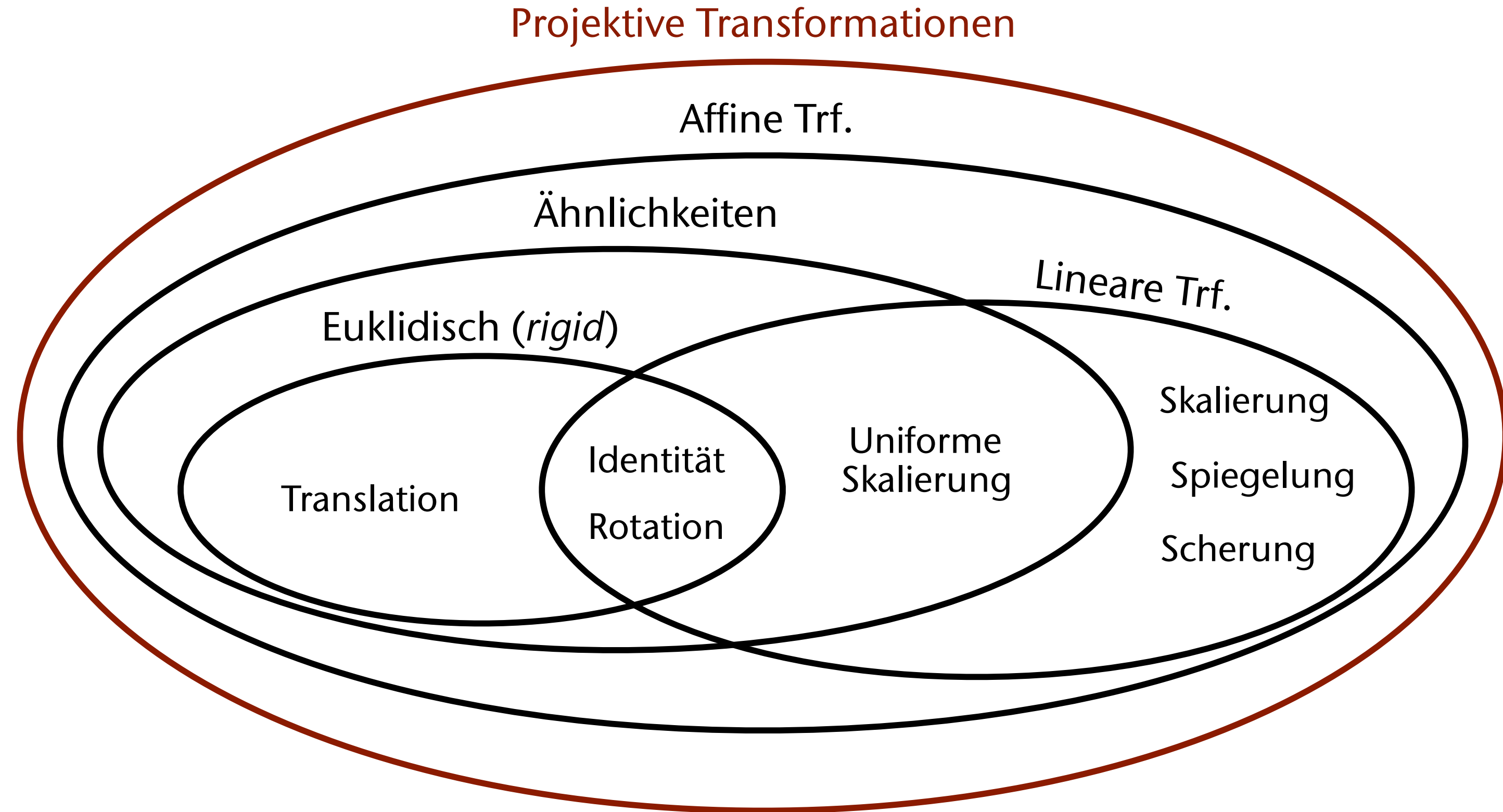
$$R_{arb} = T_2(p_x, p_y, p_z) R_z(\alpha) R_y(-\beta) R_x(\theta) \cdot \\ R_y(\beta) R_z(-\alpha) T_1(-p_x, -p_y, -p_z)$$

- (Es gibt auch andere Varianten)
- Hat man diese Matrix, so wendet man diese auf jeden Vertex des Objektes an, was den Effekt der Rotation dieses Objektes um die vorgegebene Achse hat
- Das überläßt man natürlich OpenGL

Klassifikation aller Transformationen

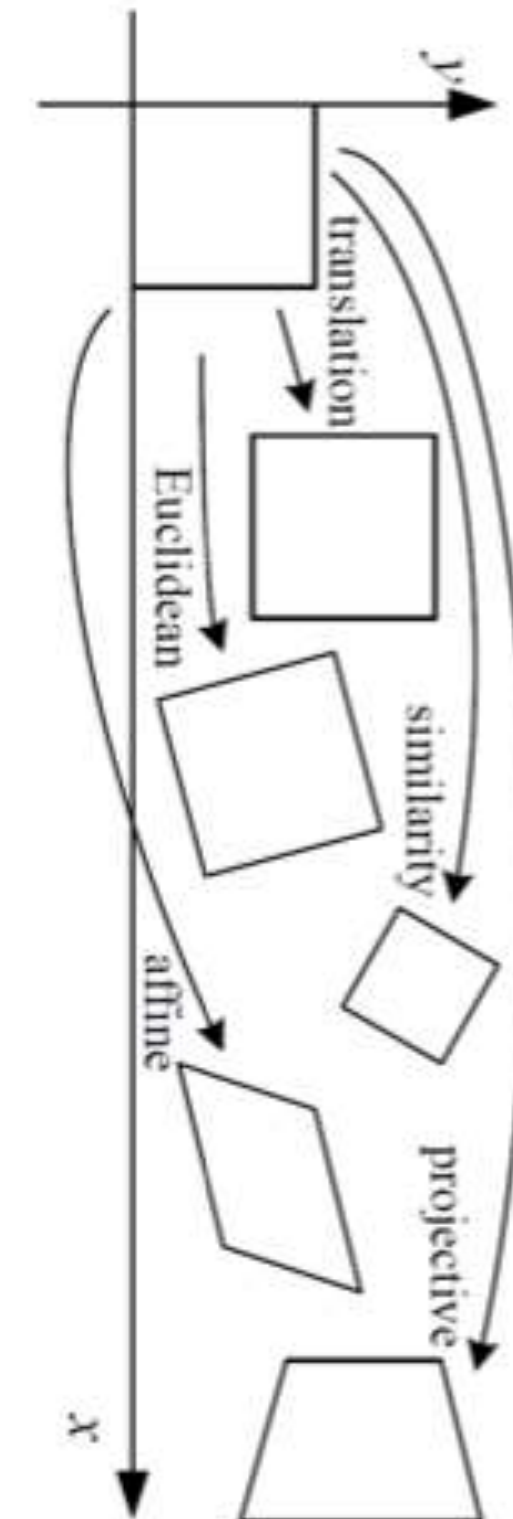


Klassifikation aller Transformationen



Eine Hierarchie von Transformationen (hier in 2D)

Transformation	Matrix	# DoF	Preserves	Icon
translation	$\begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{t} \end{bmatrix}_{2 \times 3}$	2	orientation	
rigid (Euclidean)	$\begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \end{bmatrix}_{2 \times 3}$	3	lengths	
similarity	$\begin{bmatrix} s\mathbf{R} & \mathbf{t} \end{bmatrix}_{2 \times 3}$	4	angles	
affine	$\begin{bmatrix} \mathbf{A} \end{bmatrix}_{2 \times 3}$	6	parallelism	
projective	$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{H}} \end{bmatrix}_{3 \times 3}$	8	straight lines	



Matrizen in OpenGL

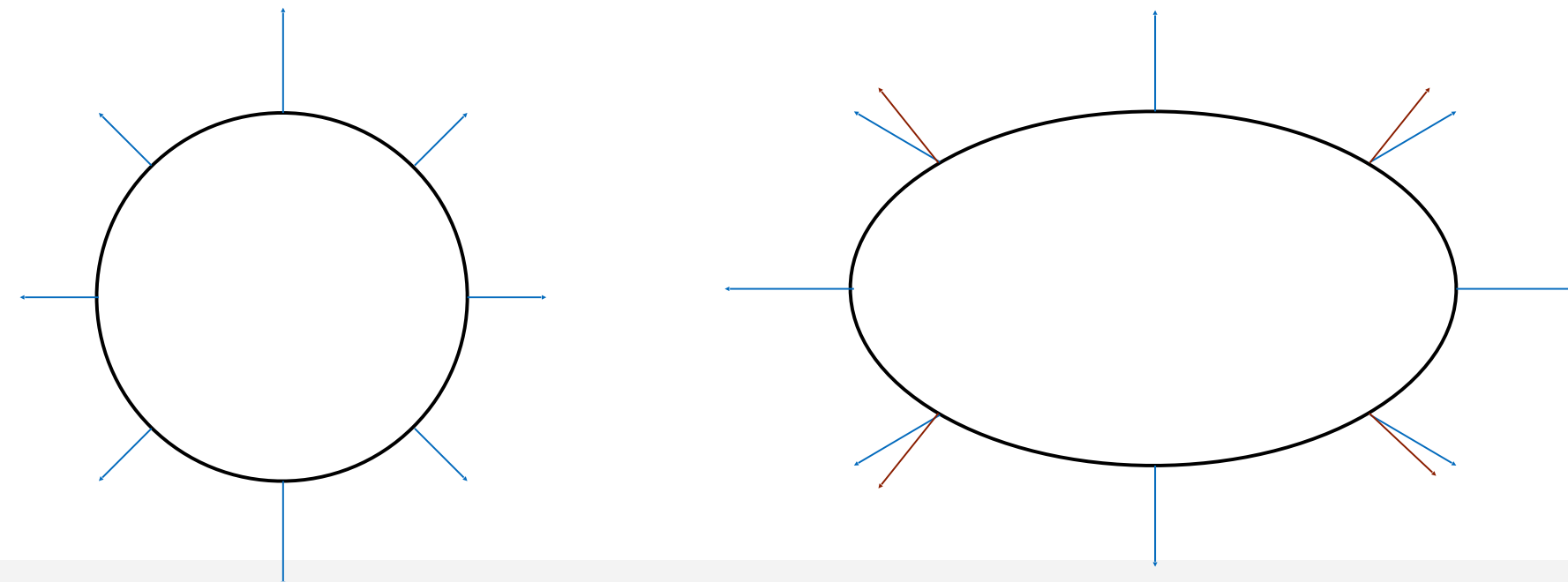
- Achtung: Matrizen werden **spaltenweise** im Speicher abgelegt, *nicht* — wie in C üblich — zeilenweise!
- Das nennt sich "*column-major order*" (der Standard, auch in C, ist *row-major order*)

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \iff$$

```
GLfloat matrix[] =  
{  
    1, 0, 0, 0,  
    0, 1, 0, 0,  
    0, 0, 1, 0,  
    tx, ty, tz, 1  
};
```

Transformation von Normalen

- Behauptung: wenn ein Objekt um M transformiert wird, dann müssen die Normalen der Oberfläche um $N = (M^T)^{-1}$ transformiert werden
- Bei starren (euklidischen) Transformationen:
 - Translation beeinflusst die Normalen der Oberfläche nicht
 - Im Fall der Rotation ist $M^{-1} = M^T$ und somit $N = M$
- Bei nicht-uniformer Skalierung und Scherung ist $N = (M^T)^{-1} \neq M$!
 - Beispiel:



Beweis

- Wir wissen: $(X - P)^T \mathbf{n} = 0$

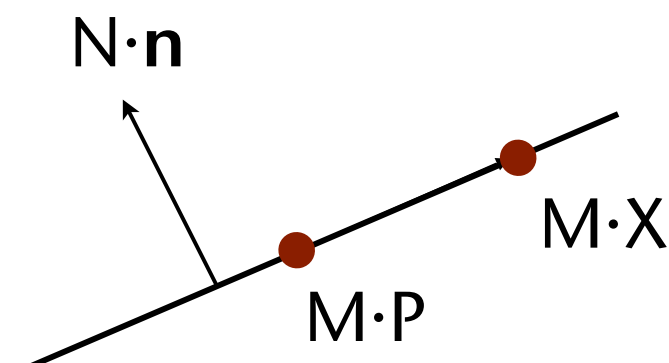
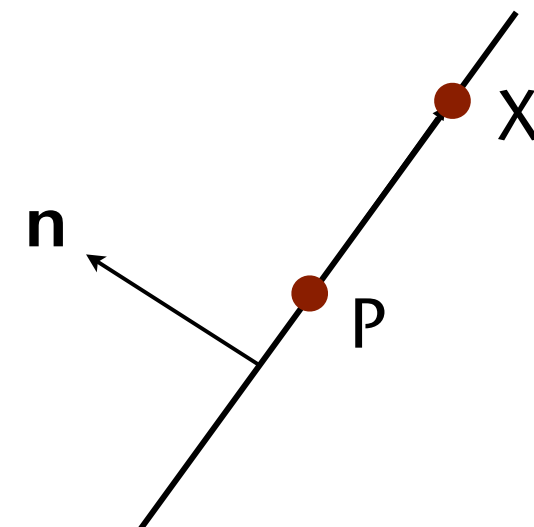
- Gesucht ist N , so daß:

$$(M \cdot X - M \cdot P)^T \cdot (N \cdot \mathbf{n}) = (X - P)^T \cdot M^T \cdot N \cdot \mathbf{n} = 0$$

- Setze also $N = (M^T)^{-1}$

- Damit ist

$$(X - P)^T \cdot M^T (M^T)^{-1} \cdot \mathbf{n} = (X - P)^T \cdot I \cdot \mathbf{n} = 0$$

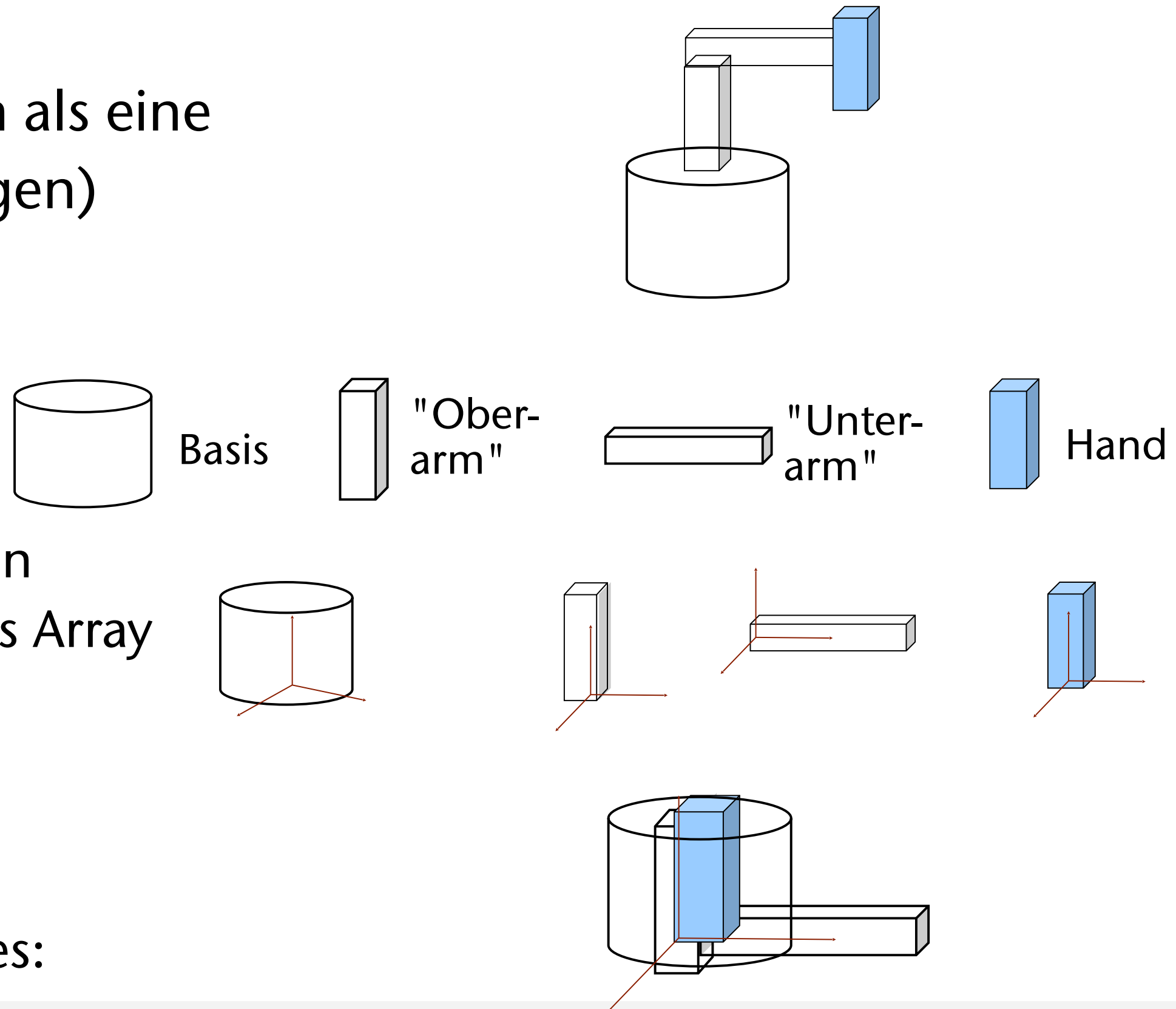


Relative und hierarchische Transformationen

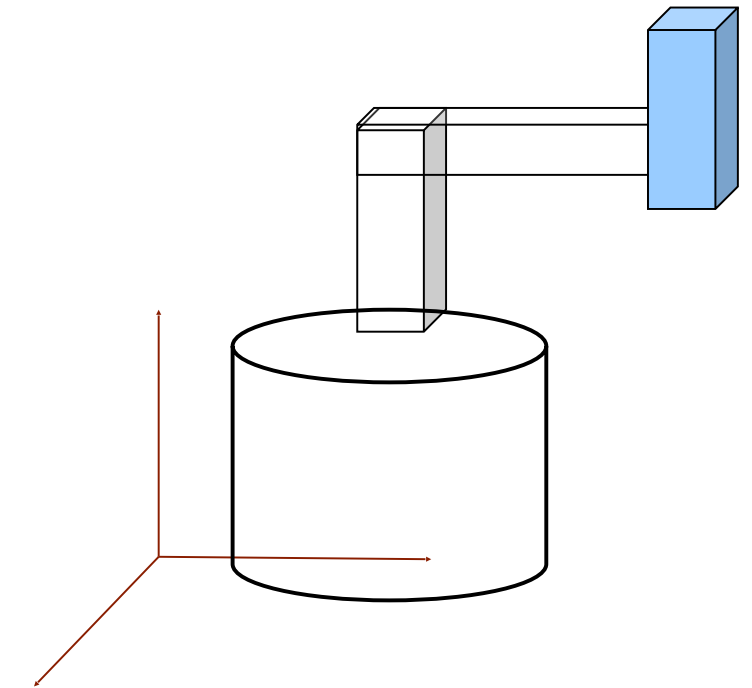
- Eine Konkatenierung von Transformationen kann man auch als eine Folge von (voneinander abhängigen) Koordinatensystemen ansehen

- Beispiel: Roboter

- Besteht aus diesen Einzelteilen
- Jedes Teil wurde in seinem eigenen Koordinatensystem spezifiziert (als Array von Punkten) → heißt **Objektkoordinatensystem**
- Rendert man alle Teile ohne jede Transformation, entsteht folgendes:



- Würde man jedes Teil, ausgehend vom Ursprung des Weltkoordinatensystems, einzeln an seinen Platz transformieren, sähe das ungefähr so aus:



```
// set up camera
```

```
[...]
```

```
// render robot
```

```
setTranslation( robot_pos_x, robot_pos_y , ... )
```

```
render base ...
```

```
setTranslation( robot_pos_x, robot_pos_y + 10, ... )
```

```
render upper arm ...
```

```
setTranslation( robot_pos_x, robot_pos_y + 10 + 5, ... )
```

```
render lower arm ...
```

```
. . .
```

Hypothetische Funktion

Ann.: Höhe der Basis ist 10

Ann.: Höhe des Oberarms ist 5

- Natürlich macht man es ungefähr so:

```
clearAllTransforms

translate( robot_pos_x, robot_pos_y , ... )
render base ...

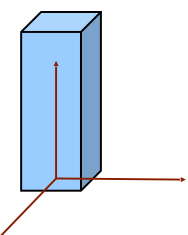
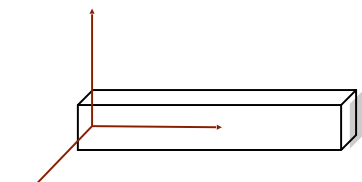
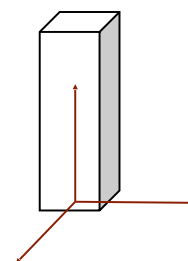
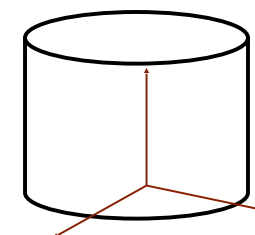
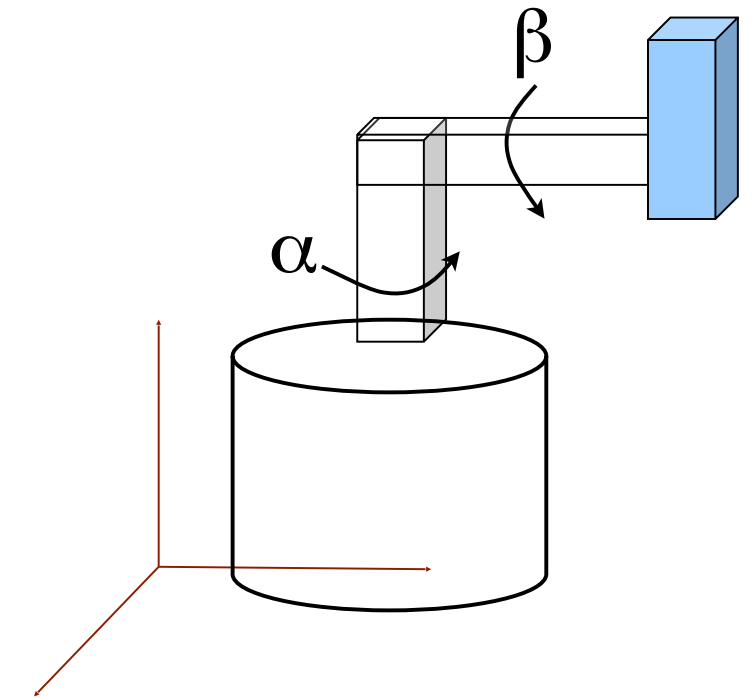
translate( 0, HEIGHT_BASE, 0 )
rotate( alpha, 0, 1, 0 );
render upper arm ...

translate( 0, LEN_UPPER_ARM, 0 )
rotate( beta, 1, 0, 0 );
render lower arm ...

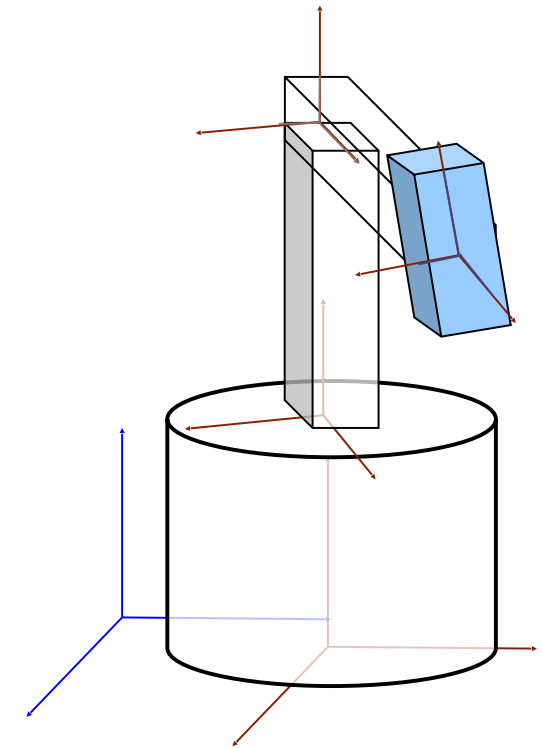
translate( LEN_LOWER_ARM, 0, 0 )
render hand ...
```

Hypothetische Funktionen,
die eine Transformation
RELATIV zur bis dahin
gültigen Transformation
setzen

Solche Parameter würde man natürlich in
einer Klasse 'Roboter' als Instanzvariablen
speichern



- Alternative Betrachtungsweise: bei jeder Transformation entsteht ein neues **lokales Koordinatensystem**, das **bezüglich** seines **Vater-Koordinatensystems** um genau diese Transf. transformiert ist



In dieser Reihenfolge entstehen die lokalen Koordinatensysteme aus dem Weltkoordinatensystem

```
clearAllTransforms

translate( robot_pos_x, robot_pos_y , ... )
render base ...

translate( 0, HEIGHT_BASE, 0 )
rotate( alpha, 0, 1, 0 );
render upper arm ...

translate( 0, HEIGHT_UPPER_ARM, 0 )
rotate( beta, 1, 0, 0 )
render lower arm ...

translate( X_SIZE_LOWER_ARM, 0, 0 )
render hand ...
```

In dieser Reihenfolge werden die Transformationen auf die Geometrie (d.h., die Vertices) angewendet

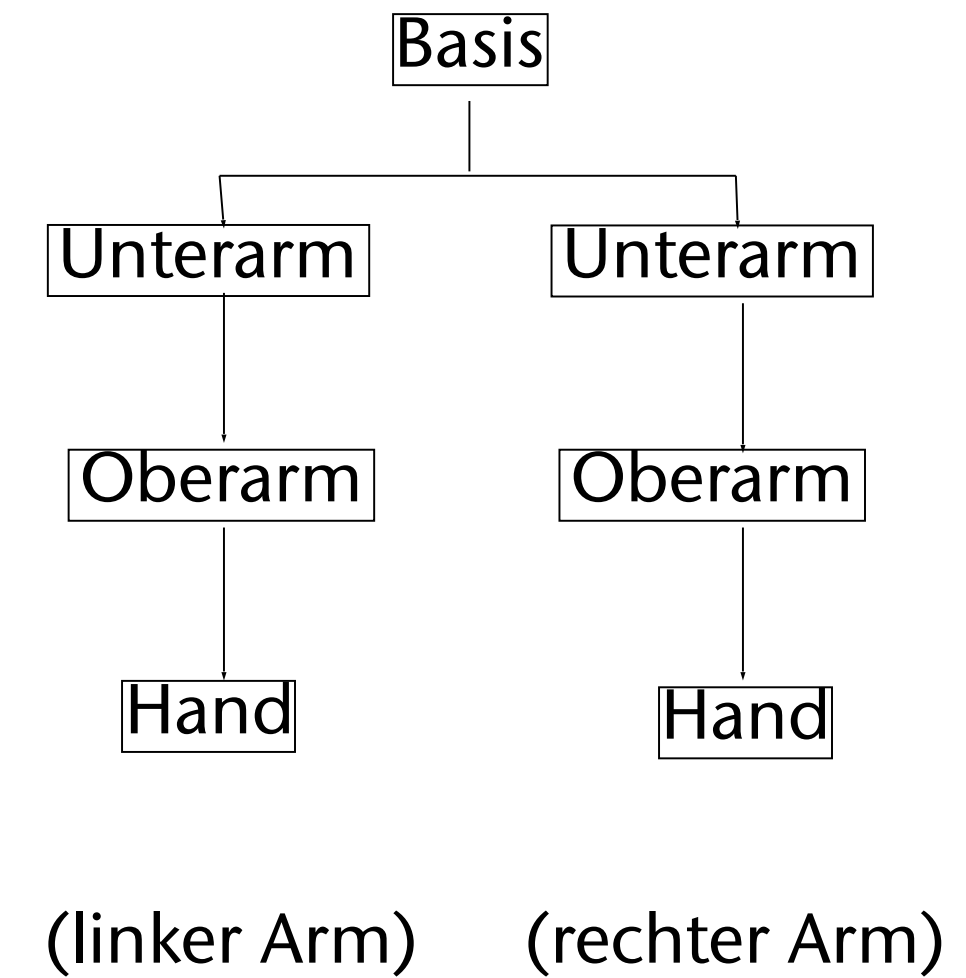
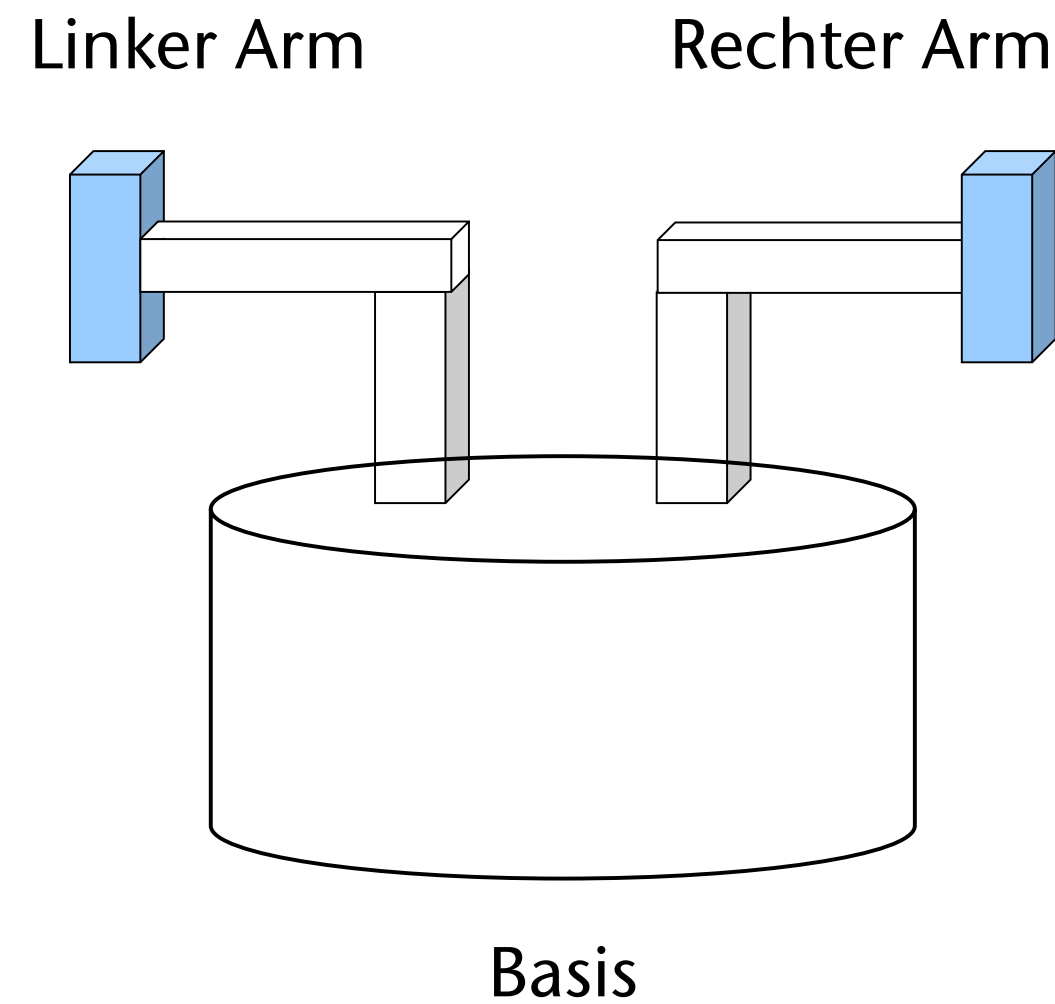
- Mathematische Realisierung: Konkatenation der einzelnen (= relativen) Transformationsmatrizen

Reihenfolge der Transformations-Befehle im Programmablauf

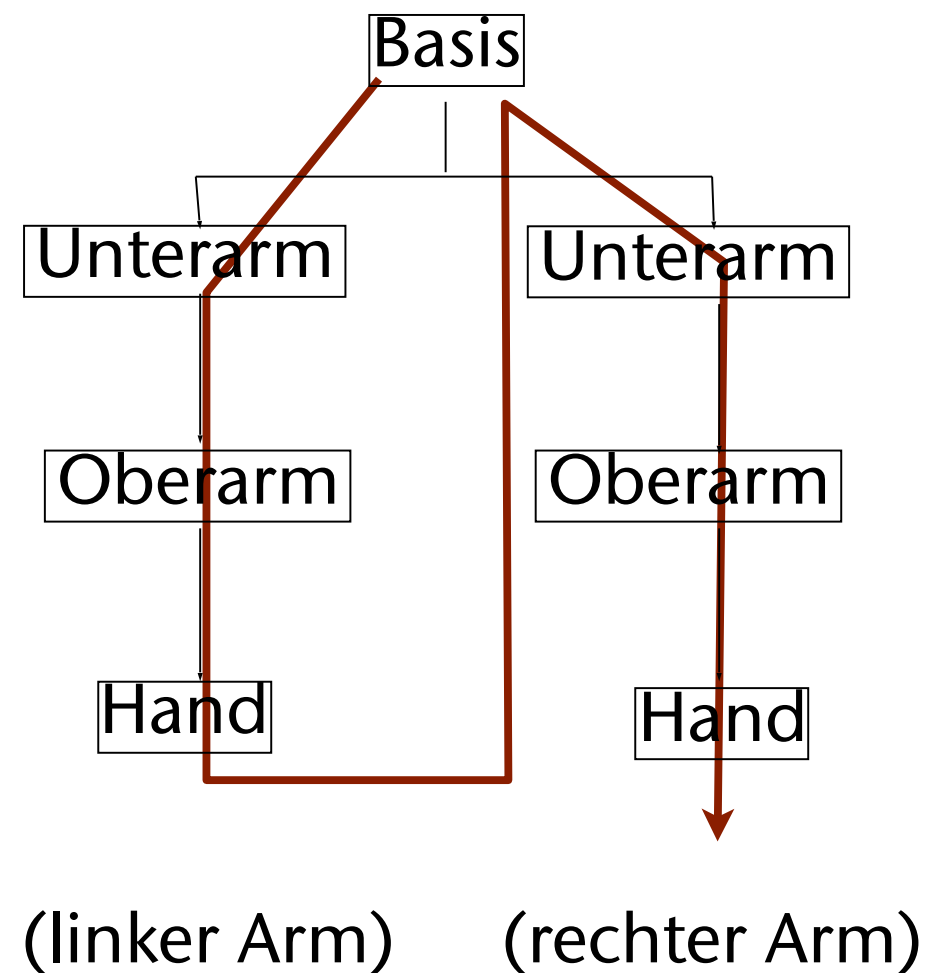
$$\begin{array}{ccc}
 \text{Vertex in Welt-Koordinaten} & & \text{Vertex in Modell-Koordinaten} \\
 \text{("hinteres" Ende der Pipeline)} & p' = M_n \cdot \dots \cdot M_2 \cdot M_1 \cdot p & \text{(vorderes Ende der Pipeline)} \\
 & \text{Reihenfolge der Ausführung} &
 \end{array}$$

- Bemerkung: da Vertices von rechts an die Matrix (Matrizen) multipliziert werden, *muss* M_n die zuerst im Programmablauf gesetzte Transformation sein
- Definition:
 - **Model-to-World-Matrix** $= M_n \cdot \dots \cdot M_2 \cdot M_1$
 $=$ Konkatenation aller aktuell gültigen, relativen Transf.en

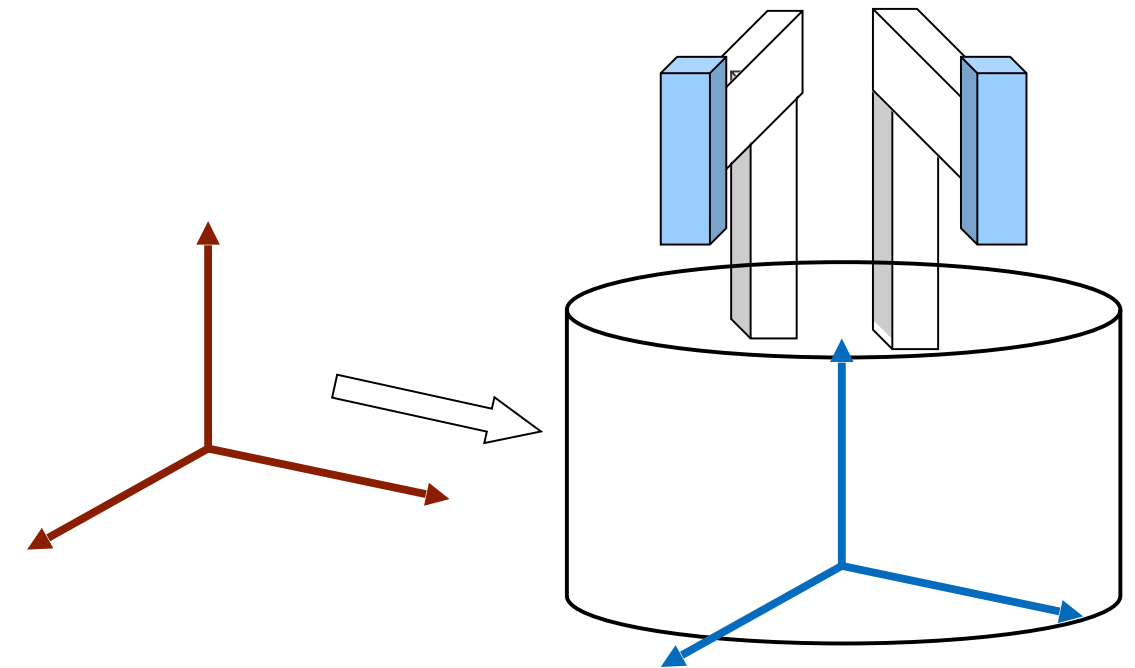
- Ein etwas komplizierteres Beispiel:



- Aufgabe: folgende Konfiguration darstellen
- Natürliche Vorgehensweise ist Depth-First-Traversal durch den Szenengraph



Do transformation(s)
 Draw base
 Do transformation(s)
 Draw left arm
 Do transformation(s)
 Draw right arm



Lösung: ein Matrix-Stack

```
Init ModelToWorld M = M0 = I
```

```
Translate(5, 0, 0) → M := M0·T
```

```
Draw base
```

```
Rotate(75, 0, 1, 0) → M := M0·T·R(a)
```

```
Draw left arm
```

```
Rotate(-75, 0, 1, 0)
```

```
Draw right arm
```

Speichere die aktuelle Model-to-World Matrix an dieser Stelle in einem Zwischenspeicher

Restauriere diese gemerkte Model-To-World an dieser Stelle aus dem Zwischenspeicher
→ M

Lösung: ein Matrix-Stack

```
Init ModelToWorld M = M0 = I
```

```
Translate(5, 0, 0) → M := M·T
```

```
Draw base
```

```
Rotate(75, 0, 1, 0)
```

```
Draw left arm
```

```
Rotate(-75, 0, 1, 0)
```

```
Draw right arm
```

An dieser Stelle die aktuelle Model-to-World auf den Stack pushen
Z.B.: `matrixStack.push( M );`

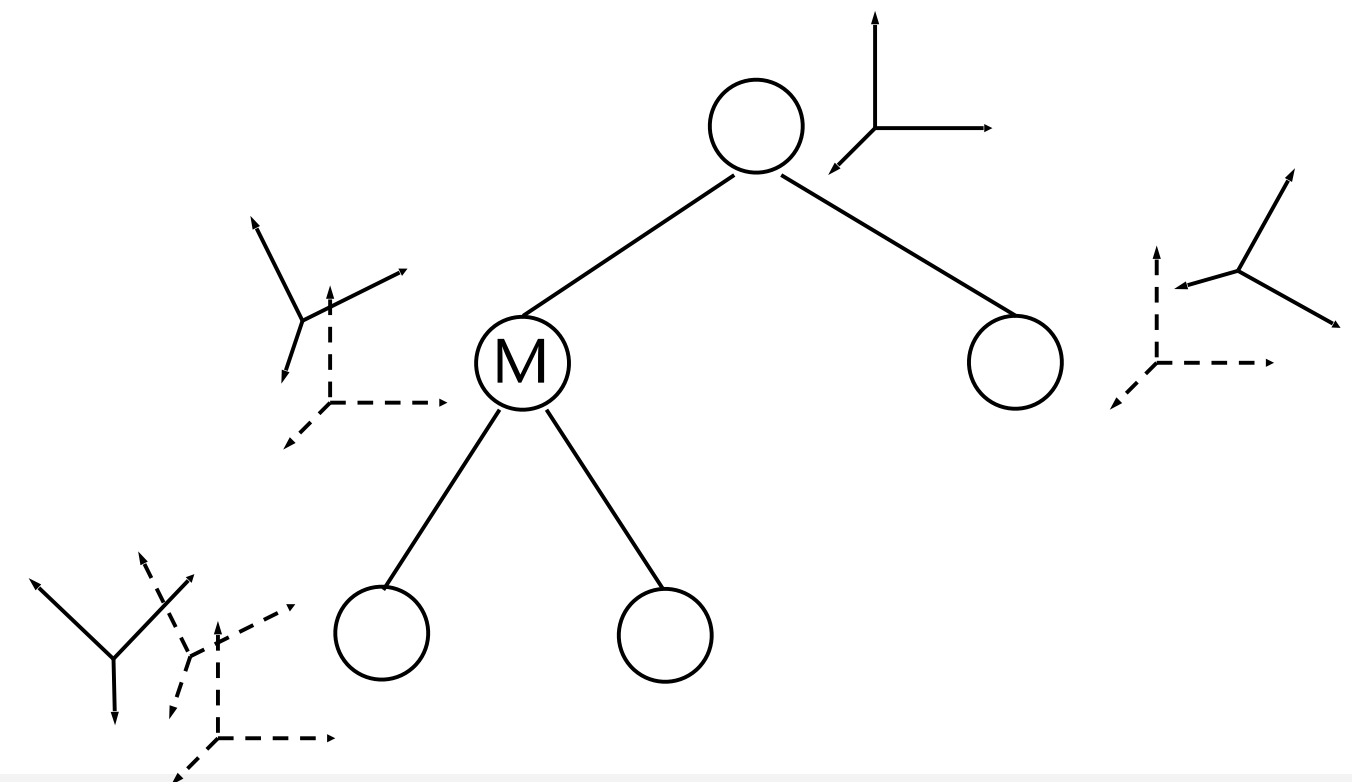
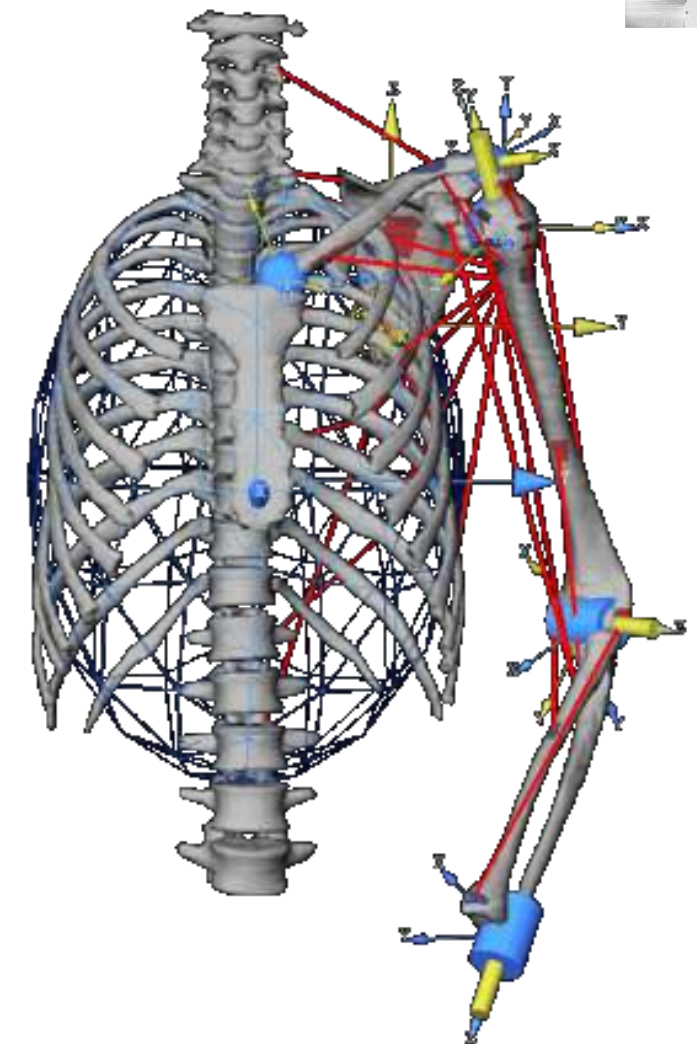
An dieser Stelle die oberste Matrix vom Stack pop-en und in die Model-to-World schreiben
Z.B.: `M = matrixStack.pop();`

Der Szenengraph

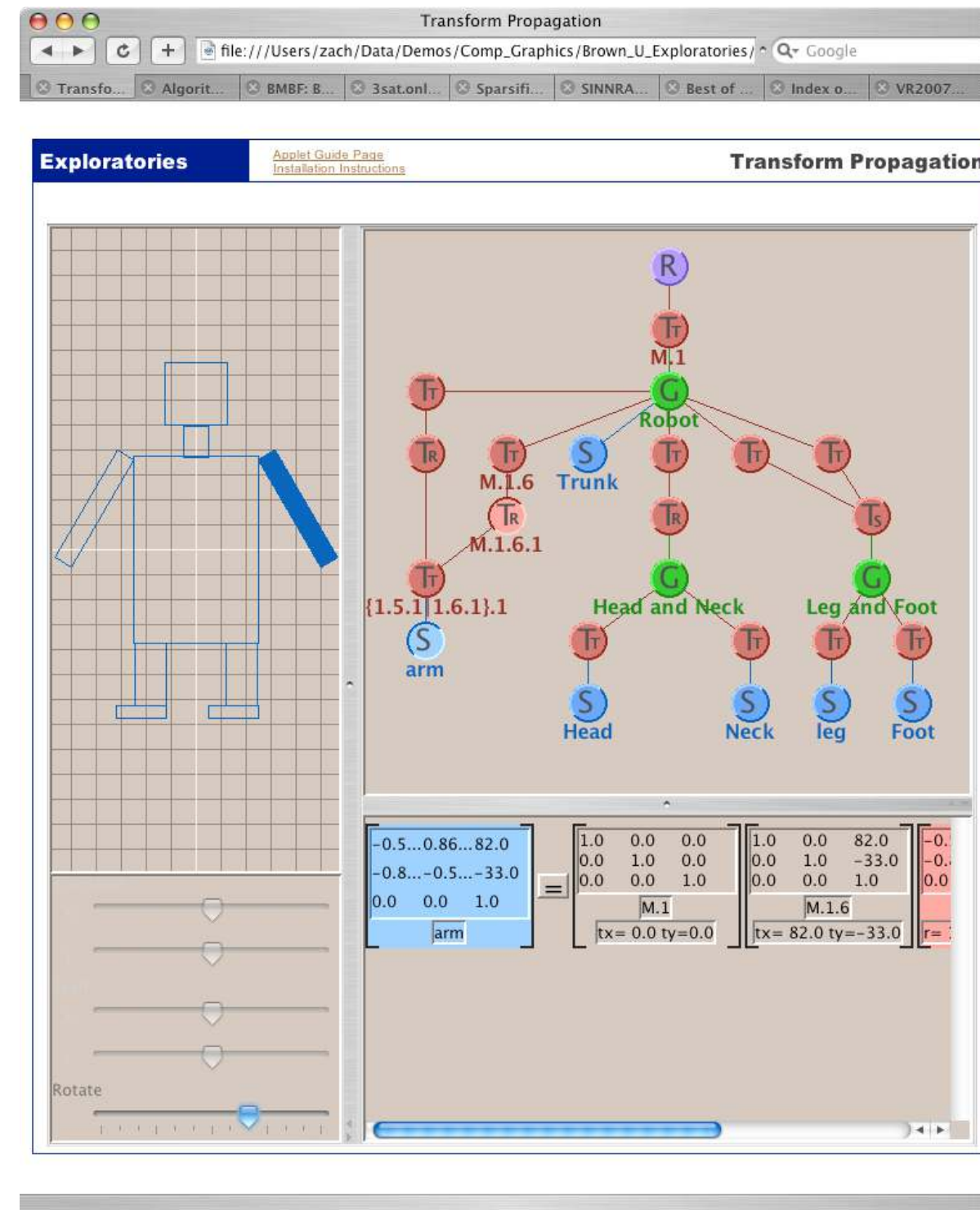
- Durch die relativen Transformationen ergibt sich eine Abhängigkeit der Objekte
- Der so definierte Baum heißt **Szenengraph**
- Knoten =
 - Transformationsknoten (speichern relative Traf.)
 - Geometrieknoten (i.A. Blätter)
- Aktion am Traf.-Knoten während Szenegraph-Traversal:

```

pushMatrix()
multMatrix( M )
    traverse sub-tree
popMatrix()
    
```



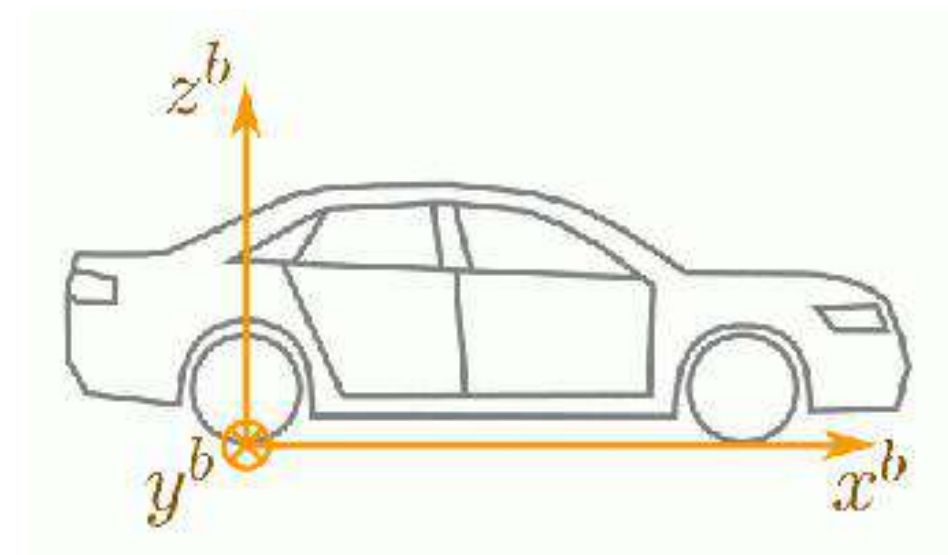
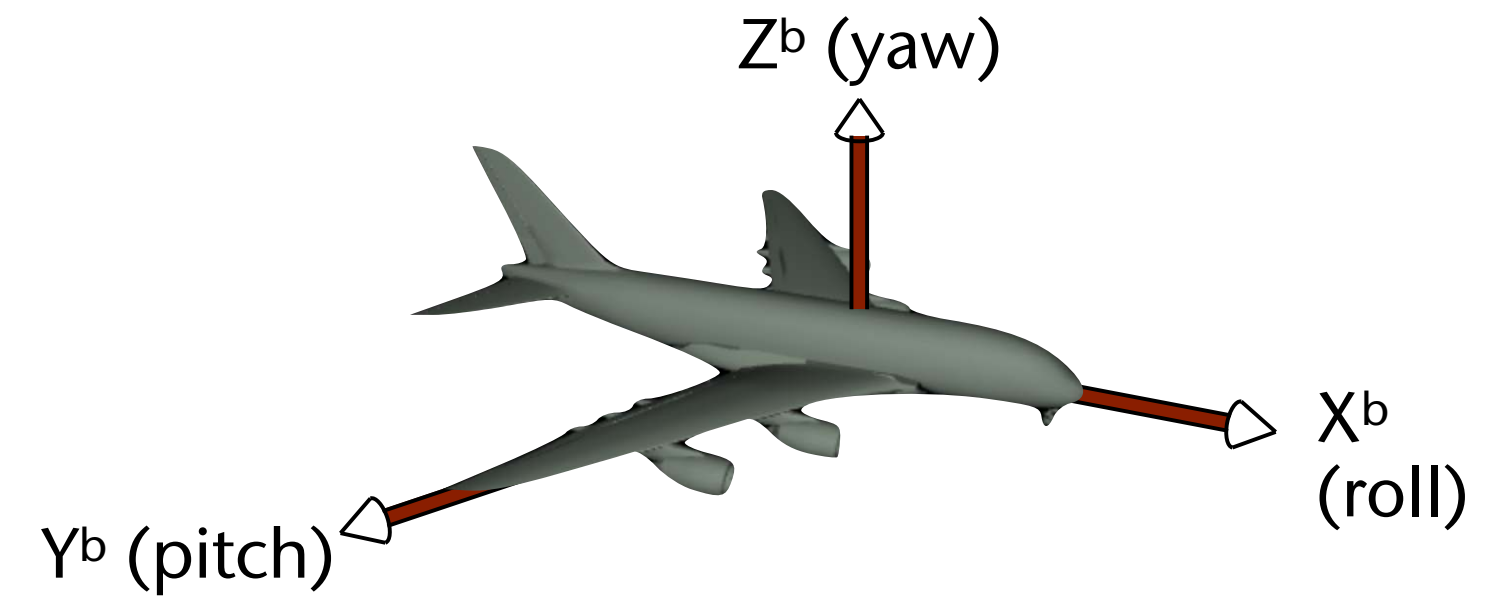
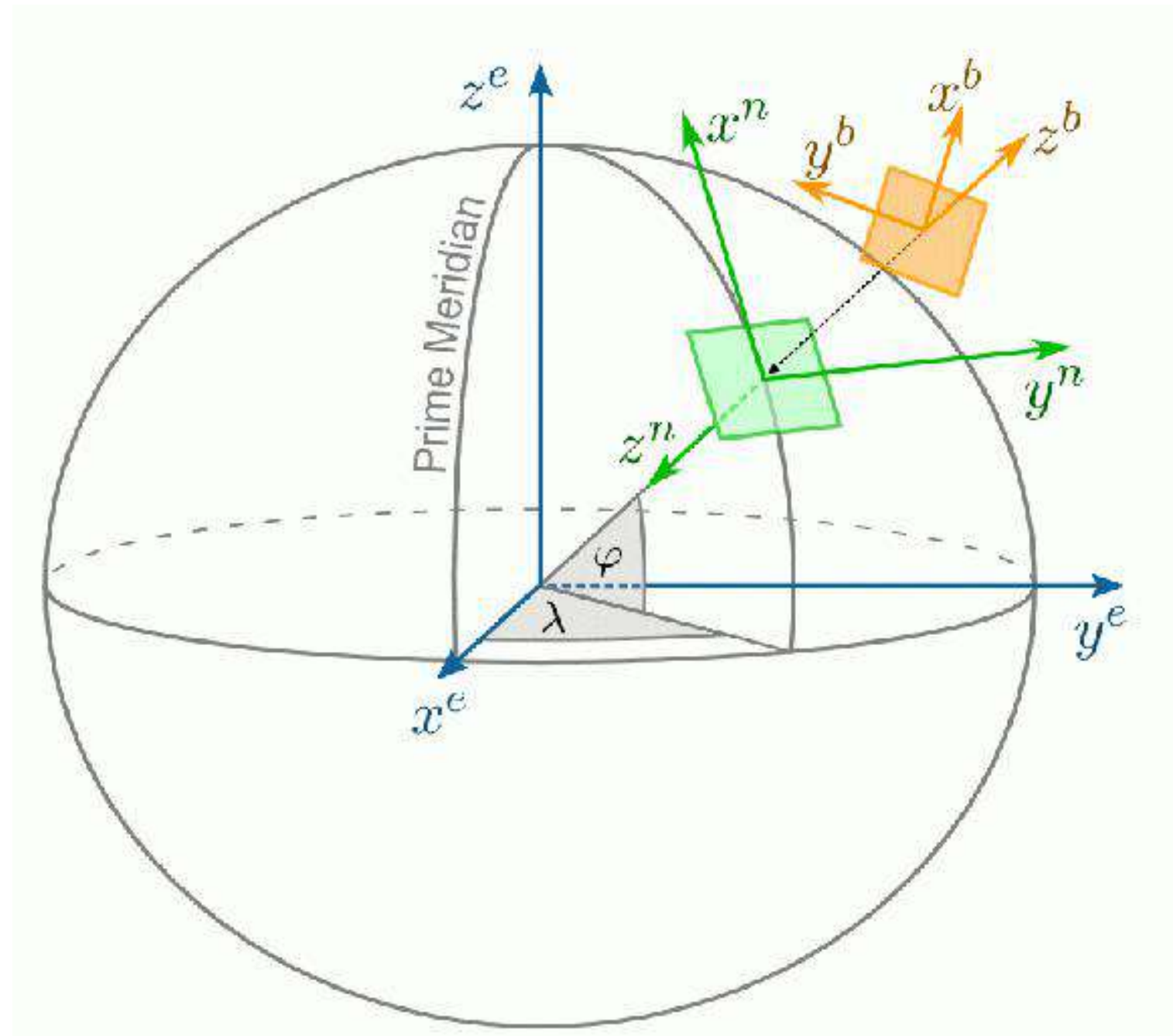
Demo zum Szenengraph



<http://graphics.cs.brown.edu/research/exploratory/freeSoftware> → Complete Catalog → Transformation Propagation

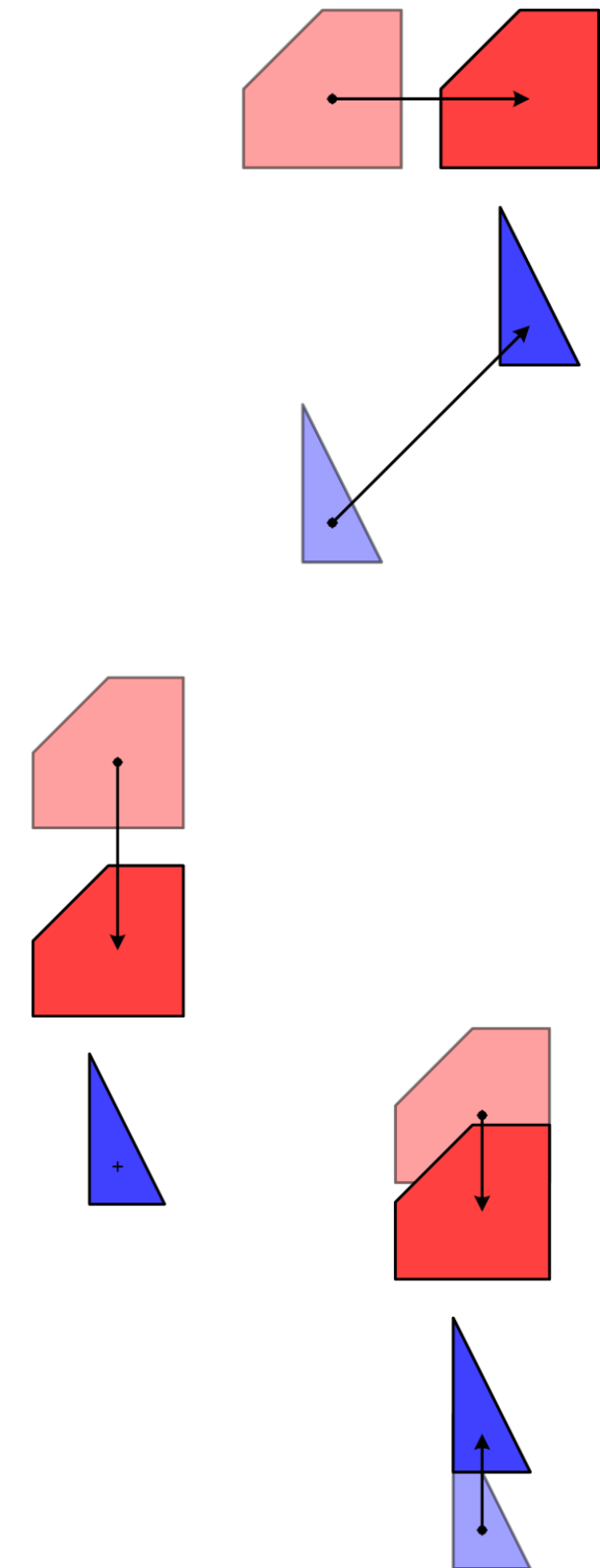
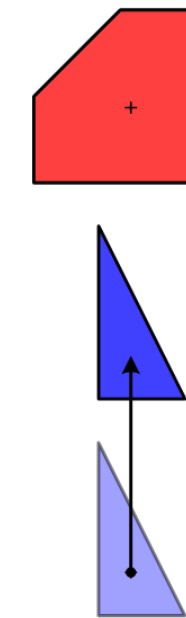
Exkurs: Koordinatensysteme in der Luftfahrt/Raumfahrt

- Body Frame, Navigation Frame, Earth-Fixed Frame



Relative Bewegung

- Betrachte Objekte A und B, die sich bzgl. des Weltkoordinatensystems bewegen
- Betrachte die Bewegung von A's Koordinatensystem (**reference frame**) aus
- Und von B's Koordinatensystem aus
- Vom Inertialsystem aus (Schwerpunkt zwischen beiden)
- Fazit: man kann zu jedem Zeitpunkt eine Transformation M finden, so dass $M(A)$ immer im Ursprung bleibt – und $M(B)$ sich relativ dazu bewegt.

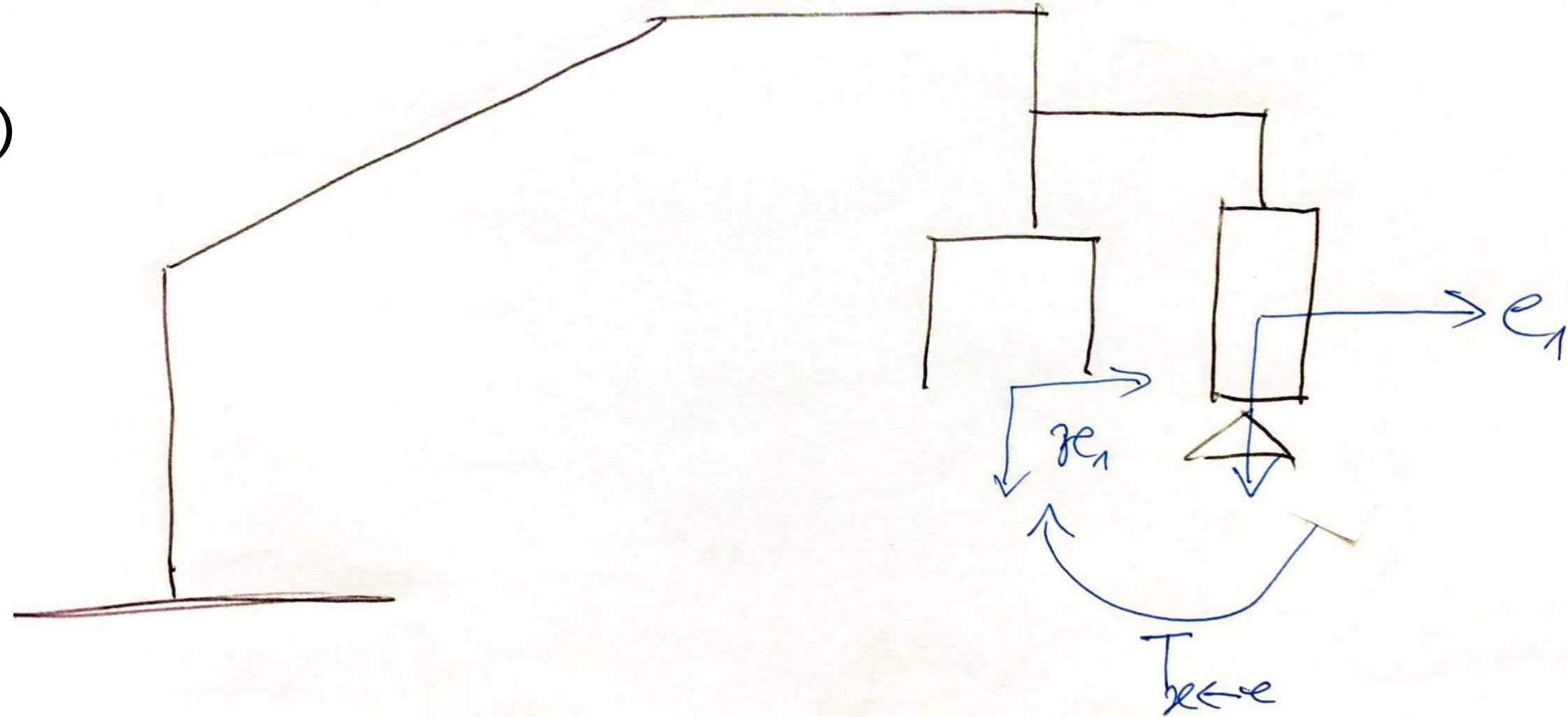


- Eine Anwendung:
It is always possible to reduce a collision check between two moving objects to a collision check between a moving object and a stationary object (by reframing)

Hand-Eye Calibration

Optional

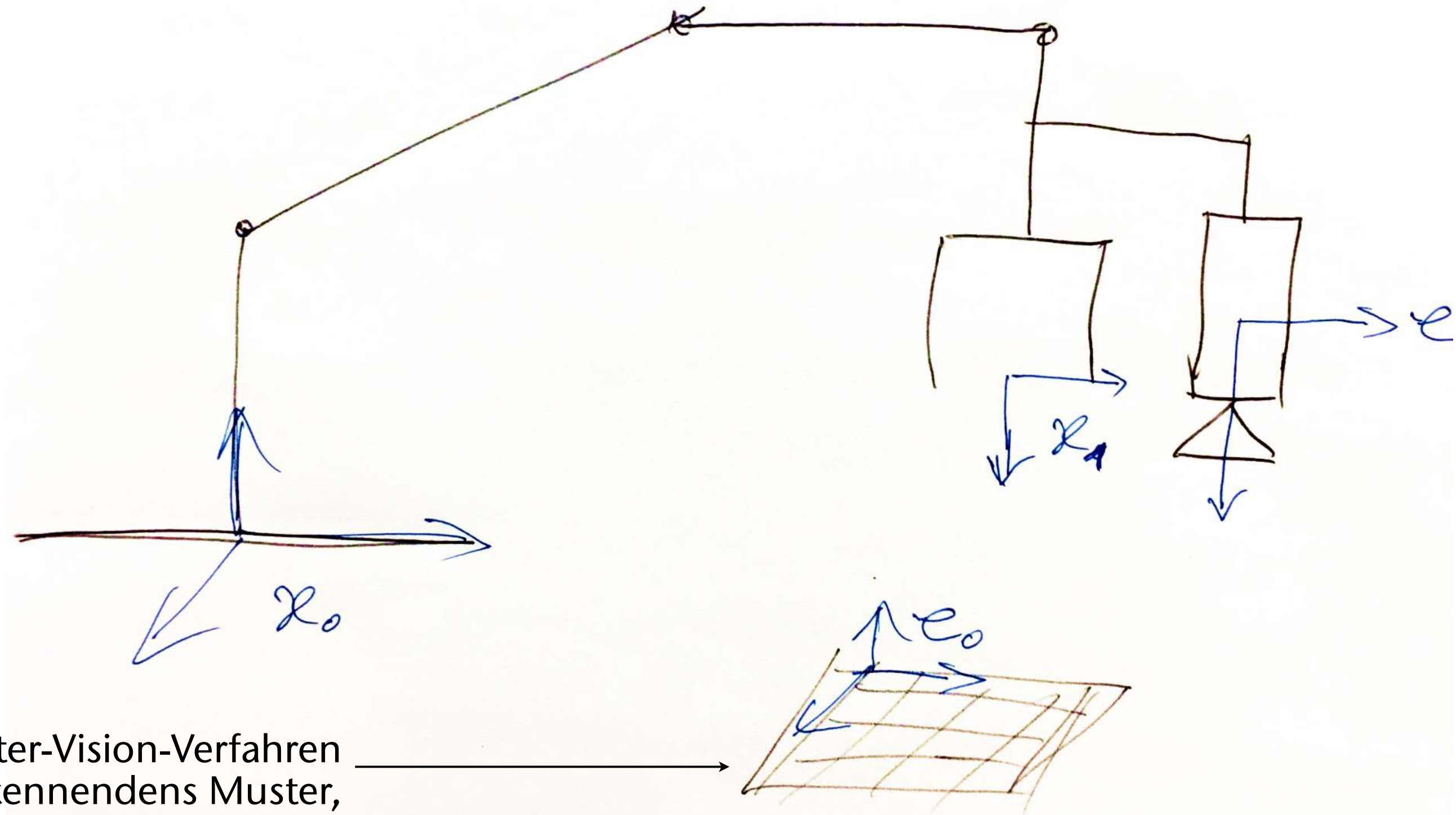
- A.k.a.: Sensor-manipulator calibration, Tracker-HMD-calibration, extrinsische Kamerakalibrierung, ...
- Gegeben:
Roboter mit Kamera ("eye")
und Endeffektor ("hand")



- Gesucht: $T_{\mathcal{H} \leftarrow \mathcal{C}}$
- Problem: auch C_1 kann man (oft) nicht bestimmen (relativ zu H? relativ zur Roboter-Basis?)

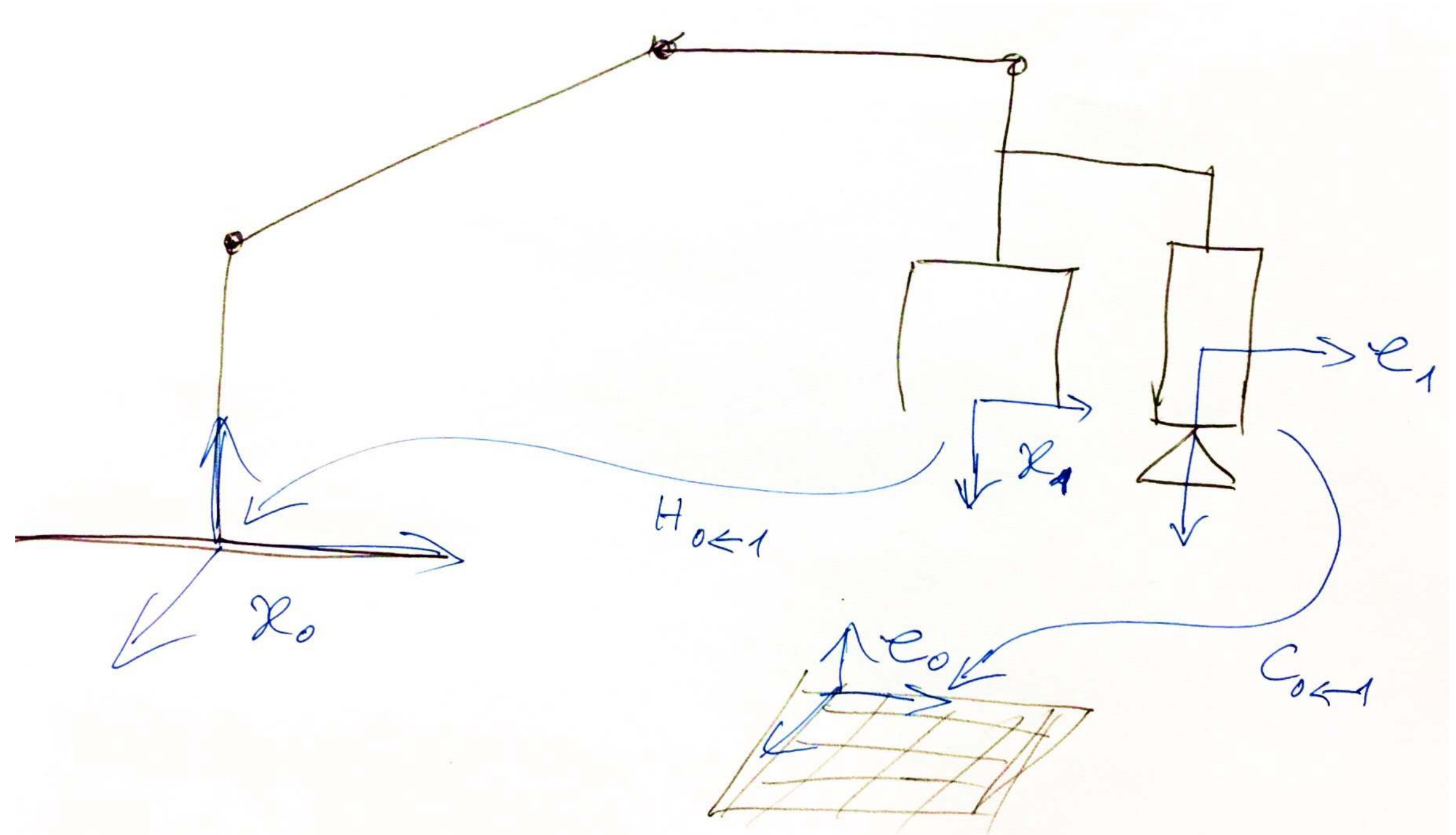
Ansatz

- Führe (zunächst) weitere Koordinatensysteme ein

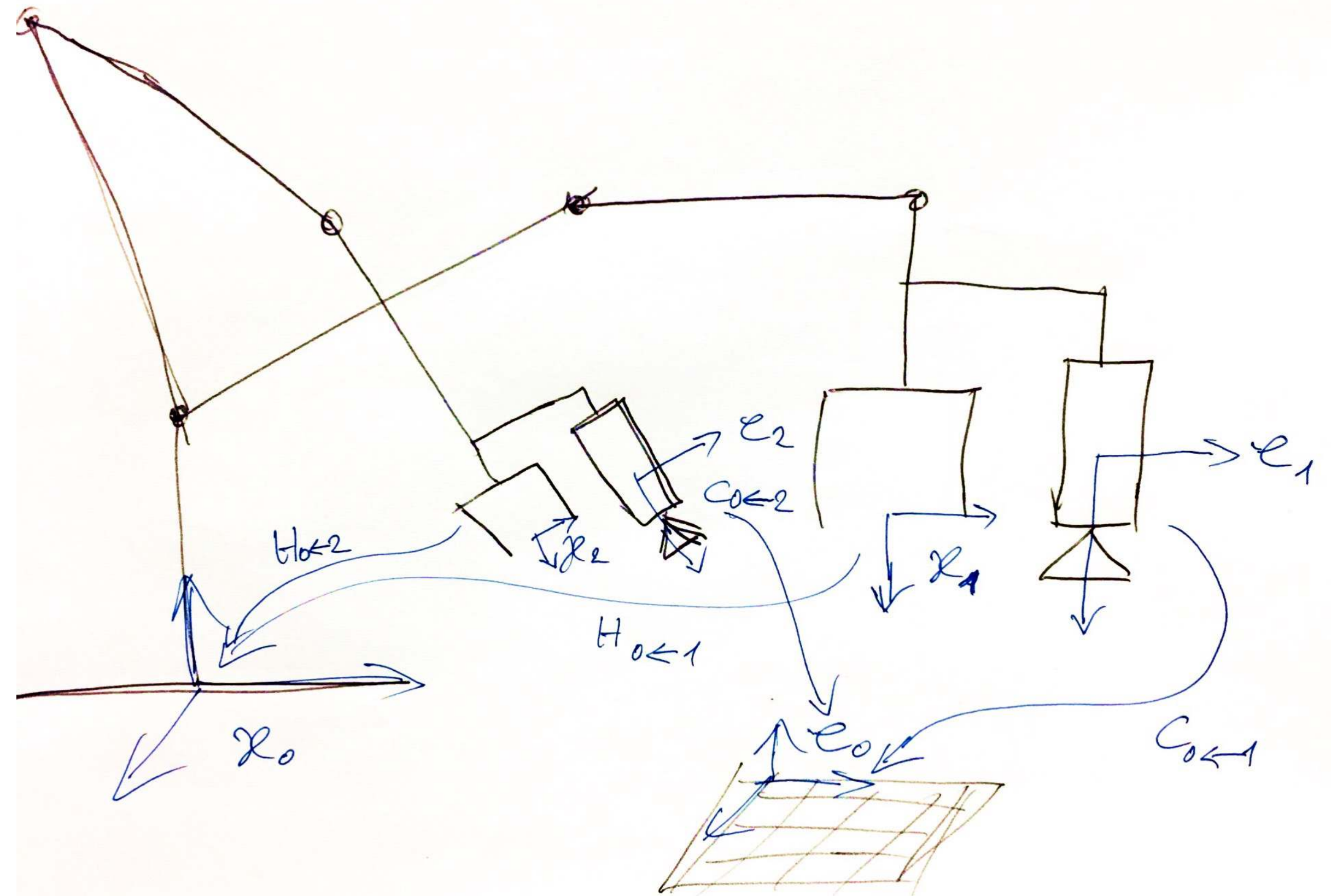


Ein per Computer-Vision-Verfahren
"einfach" zu erkennendes Muster,
typischerweise ein "checkerboard pattern"

- Bestimme mittels sog. "Vorwärts-Kinematik" $H_{0 \leftarrow 1}$ (leicht und präzise)
- Mit Hilfe von Computer-Vision-Verfahren kann man $C_{0 \leftarrow 1}$ "relativ leicht" bestimmen (Präzision ist allerdings nicht einfach zu erzielen)



- Fahre nun die Roboter-Hand in Position 2 (fast beliebige)



- Nun gilt:

Punkte in $\mathcal{C}_1$: P_{e_1}

$$P_{e_1} = \underbrace{T_{x \leftarrow e}^{-1} \cdot H_{0 \leftarrow 1}^{-1} \cdot H_{0 \leftarrow 2} \cdot T_{x \leftarrow e} \cdot C_{0 \leftarrow 2}^{-1} \cdot C_{0 \leftarrow 1}}_{\stackrel{!}{=} I} \cdot P_{e_1}$$

$\Rightarrow$

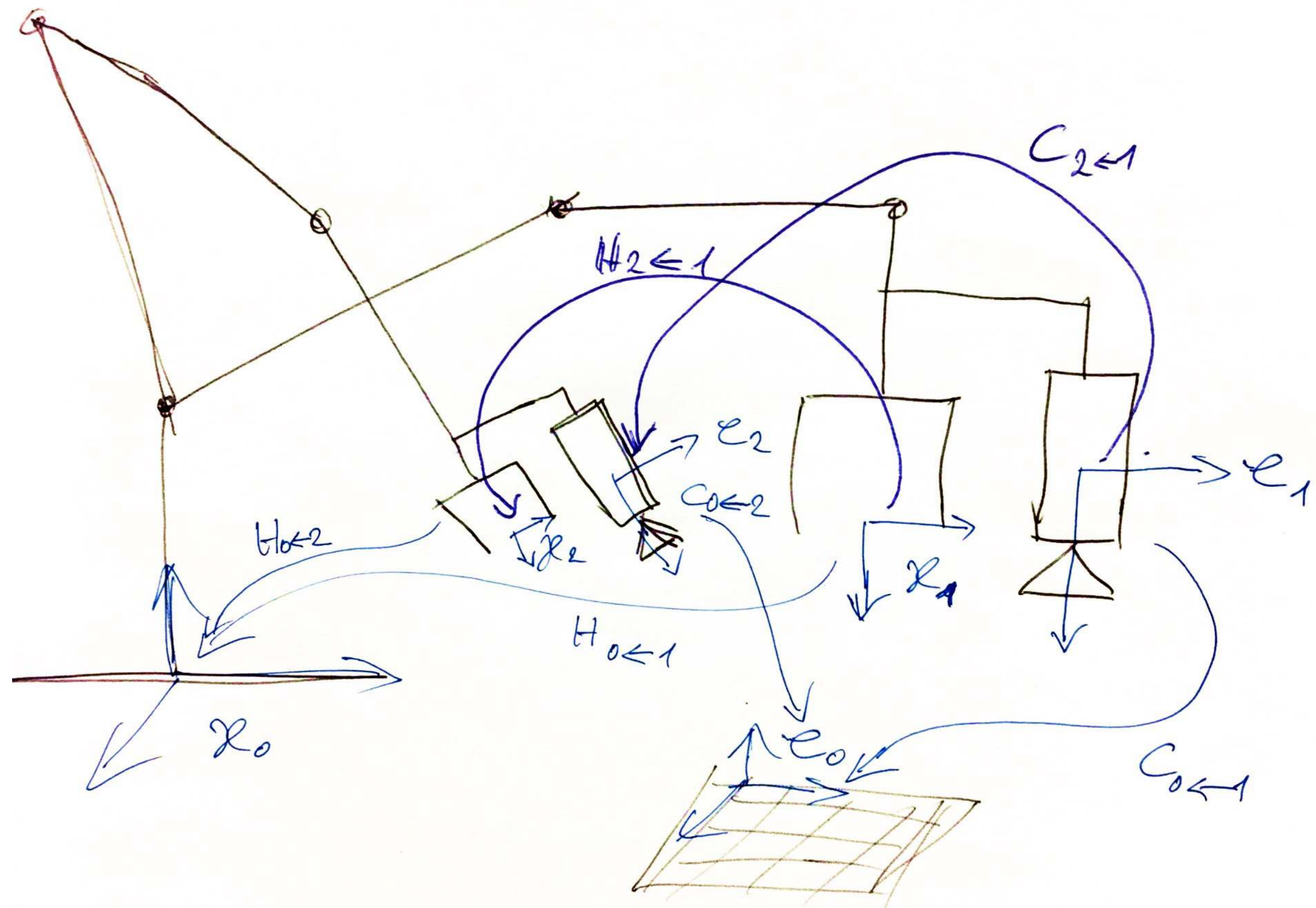
$$T_{x \leftarrow e} \cdot C_{0 \leftarrow 2}^{-1} \cdot C_{0 \leftarrow 1} \stackrel{!}{=} H_{0 \leftarrow 2}^{-1} \cdot H_{0 \leftarrow 1} \cdot T_{x \leftarrow e}$$

$\parallel$
 $C_{2 \leftarrow 0}$
 $\underbrace{\hspace{10em}}$
 $\parallel$
 $C_{2 \leftarrow 1}$

$\parallel$
 $H_{2 \leftarrow 0}$
 $\underbrace{\hspace{10em}}$
 $\parallel$
 $H_{2 \leftarrow 1}$

- Für eine beliebige Position 2 für Hand+Augen gilt:

$$T_{\mathcal{H} \leftarrow \mathcal{C}} \cdot C_{2 \leftarrow 1} = H_{2 \leftarrow 1} \cdot T_{\mathcal{H} \leftarrow \mathcal{C}}$$



Weiteres Beispiel: Tracker-HMD-Calibration

