

Einführung in **Computational Engineering und Robotik** (Grundlagen der Modellierung und Simulation)

Prof. Dr. Oskar von Stryk

Fachgebiet Simulation, Systemoptimierung und Robotik

Fachbereich Informatik

Sekretariat: Raum D213, Hochschulstr. 10

E-Post: stryk@sim.tu-darmstadt.de

Sprechstunde: nach Vereinbarung und siehe Webseite

www.sim.tu-darmstadt.de/edu/gms/

<https://moodle.informatik.tu-darmstadt.de>



1. Einführung

Worum geht es?

Lerninhalte

- Generelle Einführung in die Grundlagen der Modellierung und Simulation
 - mit Fokus auf dynamische Systeme (gewöhnliche Differentialgleichungen)
- Verdeutlicht an Beispielen vor allem (aber nicht nur) mechanischer Systeme (Roboter)

Qualifikationsziele

- Grundlegende Schritte zur Entwicklung von Modellen und Simulationen
- Kennenlernen und Durchführen erster Simulationsstudien, insbesondere an Beispielen aus der Robotik

Gliederung (geplant)

1. Einführung

- 1.1 Allgemeine Beispiele
- 1.2 Beispiele aus der Robotik
- 1.3 Begriffsbildung
- 1.4 Schritte einer Simulationsstudie

2. Modellierung und Simulation mit nichtlinearen Gleichungsmodellen

- 2.1 Explizite Gleichungsmodelle
Anwendung: Vorwärtskinematik von Roboterarmen und -beinen
- 2.2 Implizite Gleichungsmodelle
Fixpunktiteration, Newton-Verfahren
Anwendung: inverse Roboterkinematik

3. Grundlagen zeitkontinuierlicher Modelle

- 3.1 Einleitung
- 3.2 Beschreibung zeitkontinuierlicher Systeme
- 3.3 Lösbarkeit
- 3.4 Gleichgewichtslösungen
- 3.5 Linearisierung um die Ruhelage
- 3.6 Stabilität und Regelung
Lösung von $\dot{x} = Ax$
Beispiel: Wettrüsten
- 3.7 PD-Regelung linearer Systeme
- 3.8 Weitere Eigenschaften (Zeitcharakteristik, steife DGL)

4. Grundlagen der numerischen Simulation

Zahldarstellung, Rundungsfehler, Fortpflanzung von Rundungsfehlern, Kondition, Numerische Stabilität

5. Numerische Simulation zeitkontinuierlicher Modelle

- 5.1 Einleitung
- 5.2 Einschrittverfahren
 - 5.2.1 Explizites Euler-Verfahren
 - 5.2.2 Implizites Euler-Verfahren
 - 5.2.3 Heun-Verfahren
 - 5.2.4 Runge-Kutta-Verfahren 4. Ordnung
 - 5.2.5 Schrittweitensteuerung
- 5.3 Integration steifer Zustands-DGLn
- 5.4 Integration von Zustands-DGLn mit Unstetigkeiten

6. Teilschritte einer Simulationsstudie

7. Interpretation und Validierung /

8. Identifikation von Modellen

9. Physikalisch basierte Spiele /

10. Simulation autonomer Roboter

Organisatorisches (1)

■ Termine:

Reihenfolge ab nächster Woche:

- Montags, 13:30 – 14:15 Uhr: Übung
- Montags, 14:25 – 16:05 Uhr: Vorlesung

■ Materialien:

- Online auf FB-Moodle: <https://moodle.informatik.tu-darmstadt.de/course/view.php?id=591>
- Passwort: 5!mulat!0n („Simulation“ mit $S \rightarrow 5$, $i \rightarrow !$, $o \rightarrow 0$)
- Vor Vorlesungsbeginn: Folien (PDF) sind künftig in der Regel vorher im Moodle online.
- In den Tagen nach der Vorlesung wird die Aufzeichnung (Video) im Moodle bereit gestellt.

Organisatorisches (2)

Übungsbetrieb und Sprechstunden

- werden im Anschluss an die heutige Vorlesung vorgestellt (siehe Foliensatz „Vorstellung Uebungsbetrieb.pdf“)

Nachteilsausgleich

- Die Teilnahme an der CER-Klausur mit einem **Nachteilsausgleich** erfordert die Übersendung der entsprechenden **Genehmigung der Prüfungskommission** bis zum **16. Juni 2019** per Mail (cer@sim.tu-darmstadt.de). Später eingegangene Genehmigungen können nicht mehr berücksichtigt werden.

Matrikelnummer im Moodle-Profil

- Bitte prüfen Sie, ob Ihre Matrikelnummer im Feld "ID-Nummer" unter "Optionale Einträge" korrekt in Ihrem Moodle-Profil eingetragen ist. Dieser Eintrag ist für die korrekte Zuordnung der Übungspunkte zu den in der Klausur erreichten Leistung zwingend erforderlich.

Auslandssemester

- Sollten Sie aufgrund eines Auslandssemesters nicht an der CER-Prüfung am **2. September 2019** teilnehmen können, melden Sie sich bis spätestens zum **30. April 2019** per Mail (cer@sim.tu-darmstadt.de).

Hinweise zur Klausur

■ Schriftliche Klausur:

(Angabe laut TUCaN ohne Gewähr. Bitte selbst überprüfen!) am

Mo, 2. Sep. 2019, 9:00-11:00 Uhr (Dauer: 90 Min.)

■ Zugelassene Hilfsmittel:

- ein Blatt DIN A4 mit eigenen Notizen (von eigener Hand beschrieben, Vorder- u. Rückseite)
- bei begründetem Bedarf: Wörterbuch Deutsch als Fremdsprache (alternativ: Aufgaben in deutscher und englischer Sprache)
- Weitere Hilfsmittel (z.B. Taschenrechner oder das Skript) sind nicht zugelassen.
- Bitte verwenden Sie zum Schreiben blau oder schwarz schreibende Kugelschreiber. Bleistifte sowie rotes oder grünes Schreibwerkzeug sind nicht zugelassen.

■ **Nicht zugelassen** ist alles, was nicht explizit zugelassen ist, u.a.:

- Kopien (Folien, Übungen, sonstiges)
- mathematische Formelsammlung
- Jegliche elektronischen Geräte

Lernziele heute: Beantwortung Kernfragen

- Was sind die **Grundbegriffe** der Modellierung und Simulation und was sind ihre Bedeutungen?
- **Wofür** kann man Simulationen einsetzen (Beispiele für Anwendungen?)
- Wie lauten die fünf wesentlichen **Schritte** einer Simulationsstudie?
- Welche **Instrumentarien** gibt es zur Beschreibung von Modellen?
- Wie kann man Modelle **klassifizieren**?



1. Einführung

1.1 Allgemeine Beispiele

An der TU Darmstadt gibt es über die an der interdisziplinären Graduiertenschule Computational Engineering beteiligten Forschungsgruppen sehr gute Möglichkeiten, sich in diesen Bereichen (und vielen anderen) zu spezialisieren: www.ce.tu-darmstadt.de.

Diese Beispiele werden in der Vorlesung nicht weiter vertieft.



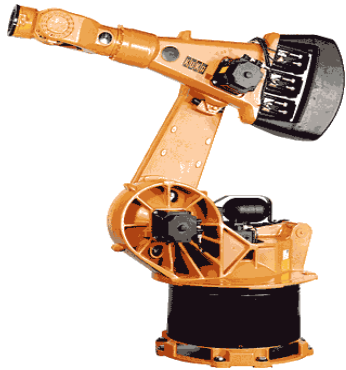
1. Einführung

1.1 Allgemeine Beispiele

1.2 Beispiele aus der Robotik

What is a Robot? — Examples

Industrial Robot



Service Robot



Personal Robot



Edutainment Robots



Robotic Wheelchair



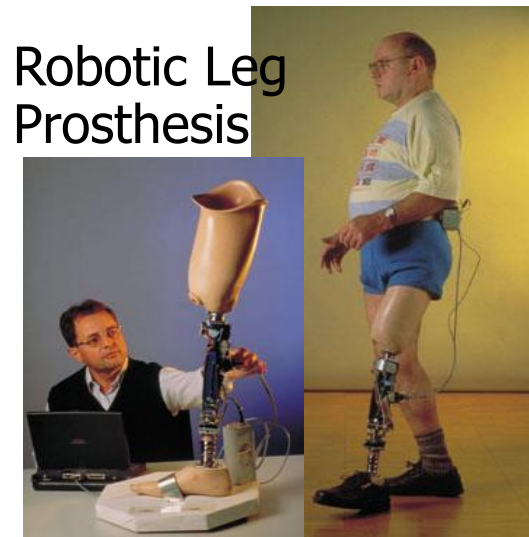
Self-Driving Car



Teleoperated Robot



Robotic Leg Prosthesis



What is a Robot? — Examples

Industrial Robot



Service Robot

Personal Robot



Edutainment Robots



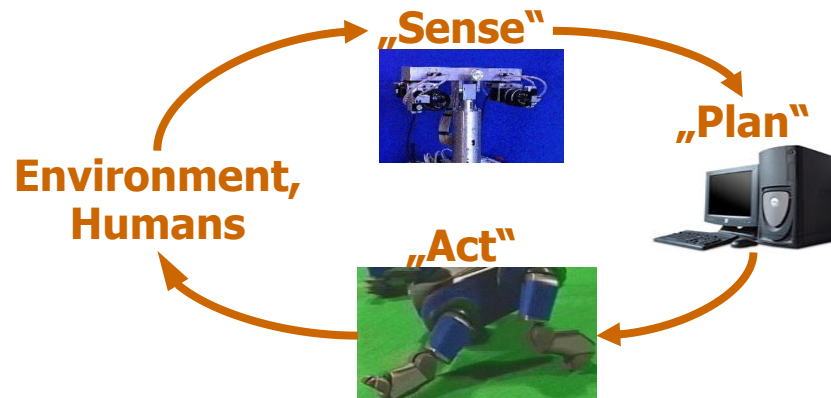
What do these robots have in common?

- (1) Physical interaction abilities
- (2) Sensing abilities
- (3) Planning abilities (onboard computers)

Robotic Wheelchair



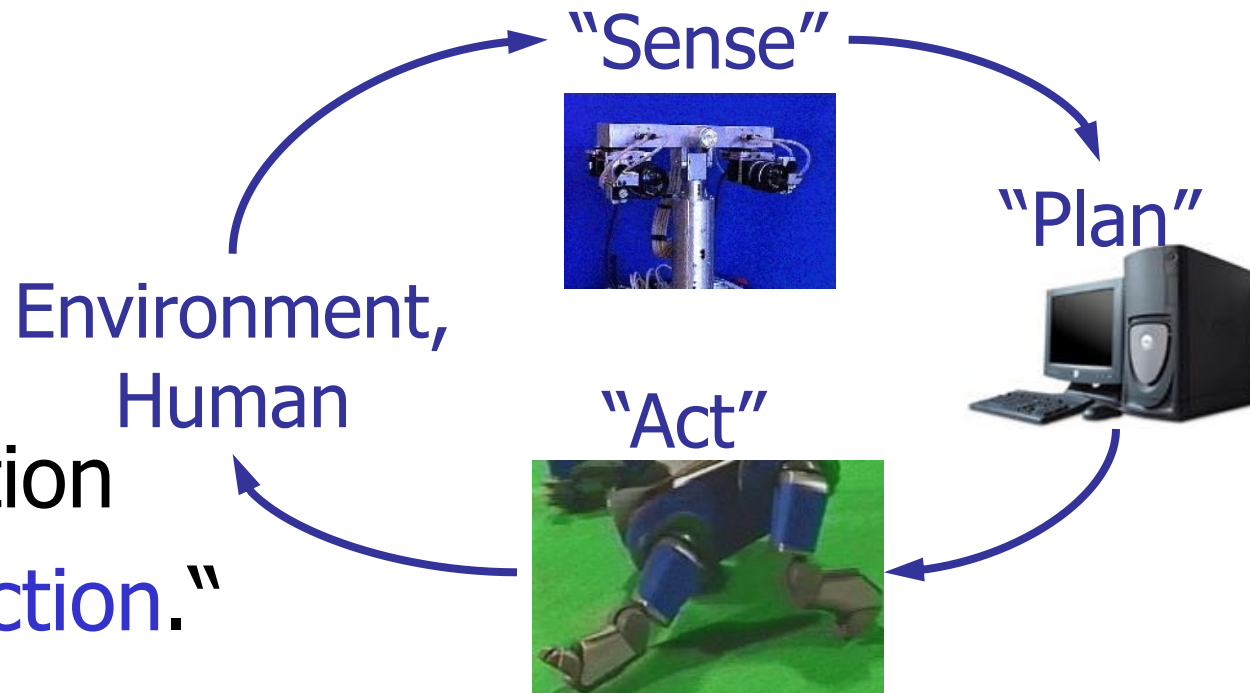
Prosthesis



What is Robotics? — Definition

“Sense-Plan-Act” Cycle:

M. Brady (1985):
„Robotics is the
intelligent connection
of perception to action.”



Physical Interaction: Most Common Modes



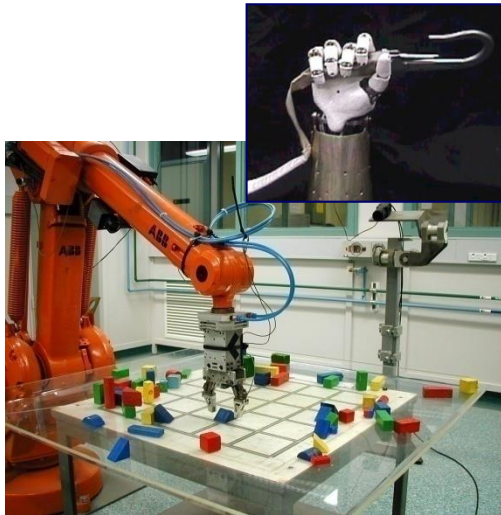
Locomotion



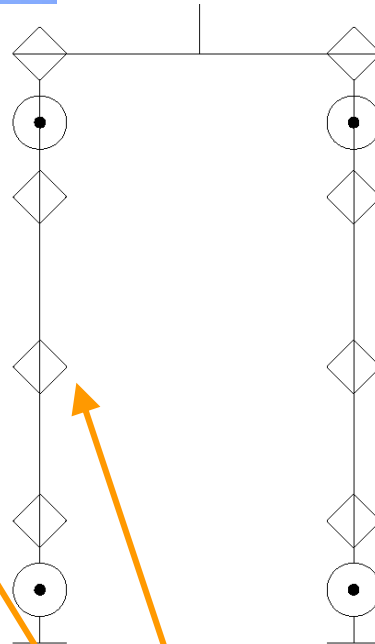
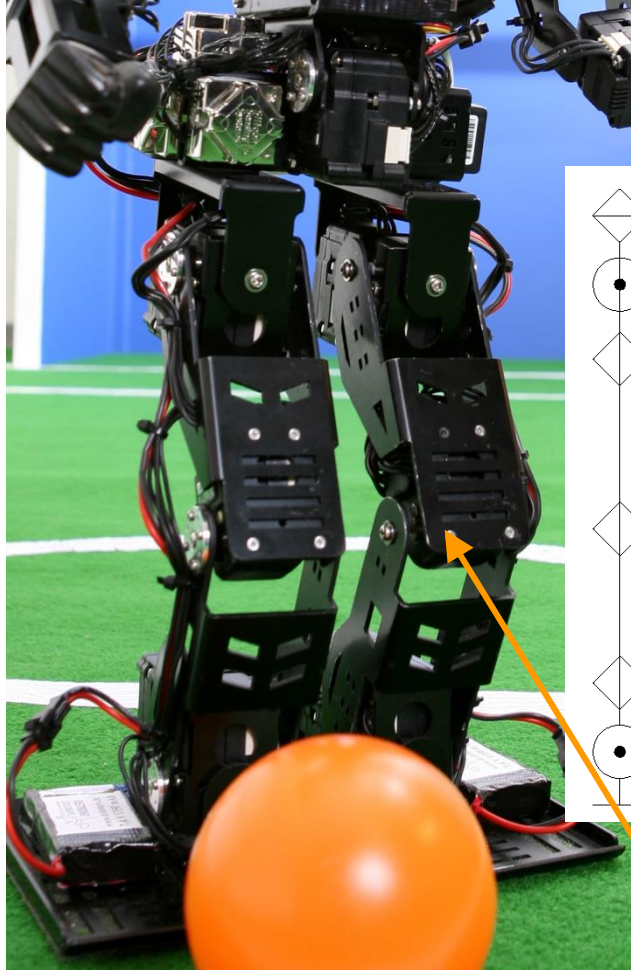
**Robot
Kinematics**



Manipulation

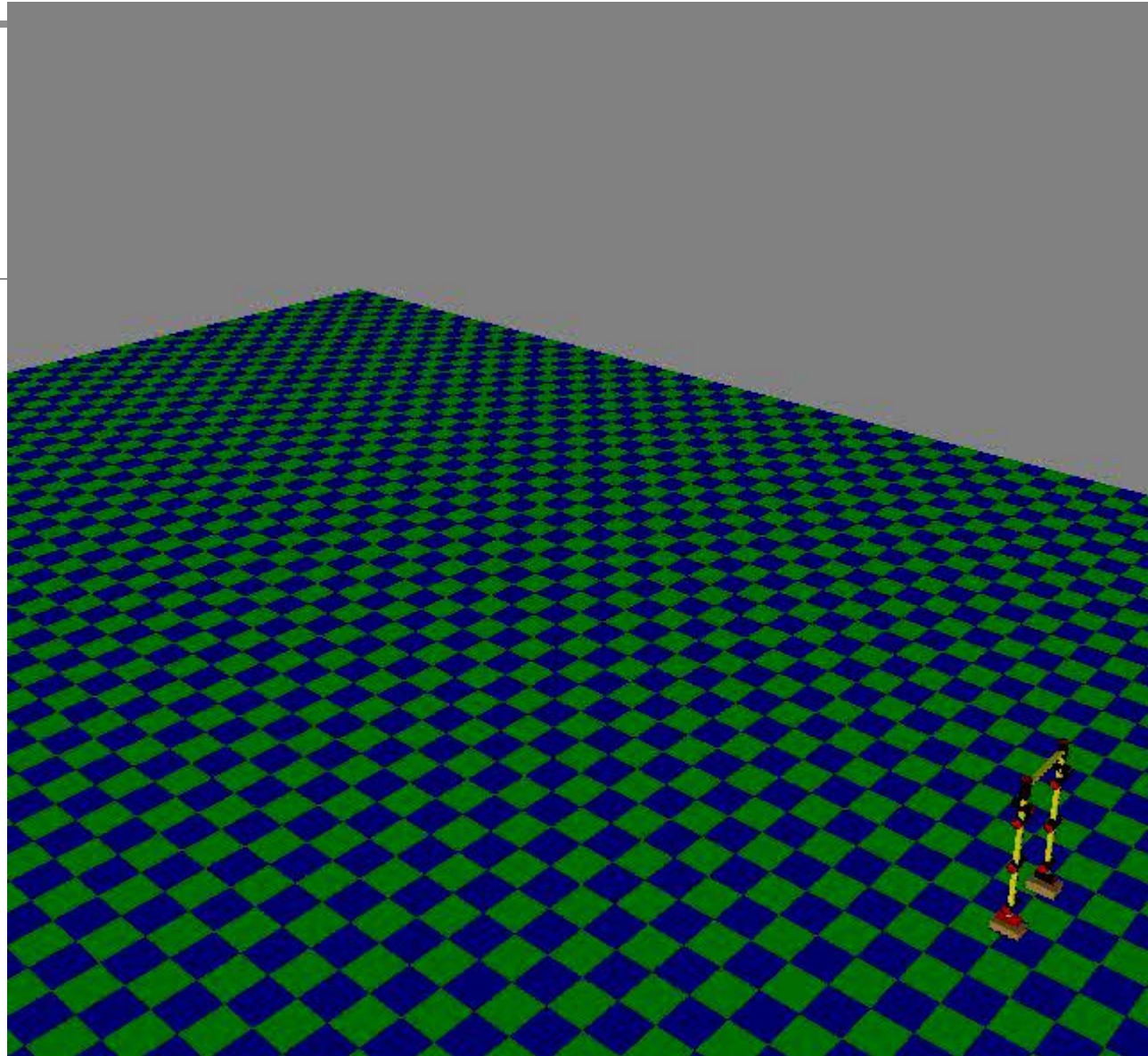
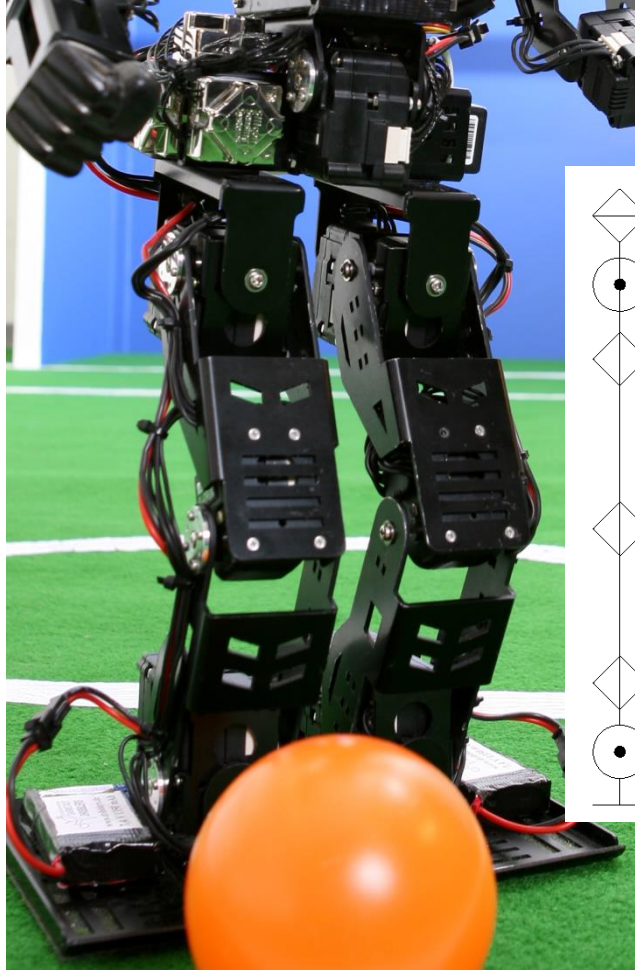


Typical Humanoid Robot Leg/Arm Design

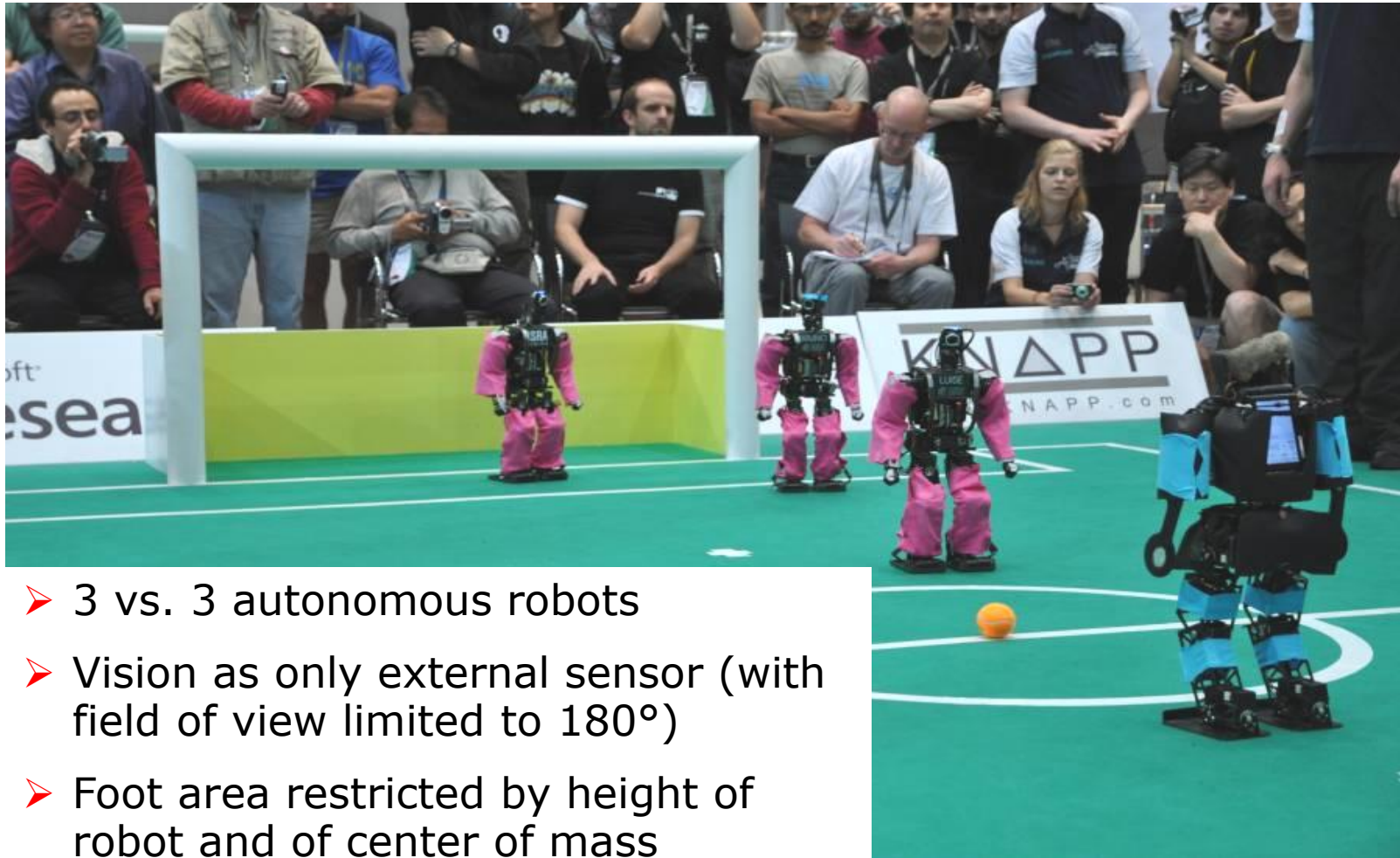


- 6 (- 7) rotational joints
 - 3 in the hip
 - 1 in the knee
 - 2 in the foot ankle
- rigid kinematical structure
 - chain of rigid joints and rigid links
- Why 6 joints?
 - To enable the robot with the tip of the foot to reach a general 3D position with 3D orientation within the leg's range.

Typical Humanoid Robot Leg Design



Beispielanwendung: Autonome humanoide Fussballroboter



- 3 vs. 3 autonomous robots
- Vision as only external sensor (with field of view limited to 180°)
- Foot area restricted by height of robot and of center of mass

Roboter: Funktionale Anforderungen

"Plan"

Behavior Control

Ball tracking, ball search,
striker, defender, goalie,
team behavior, ...

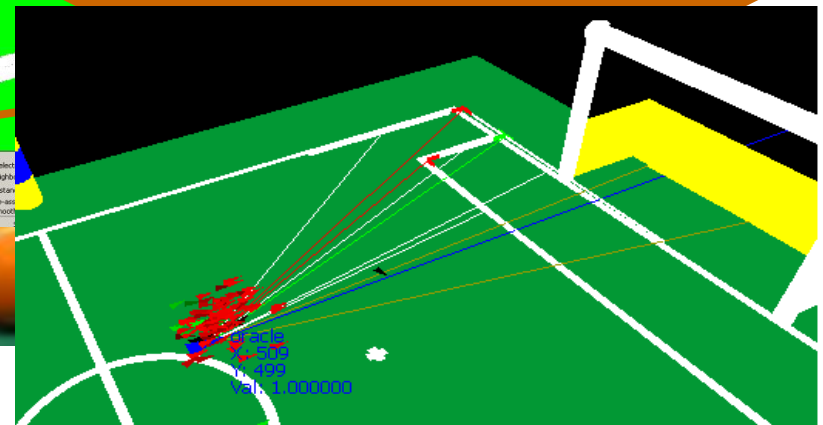
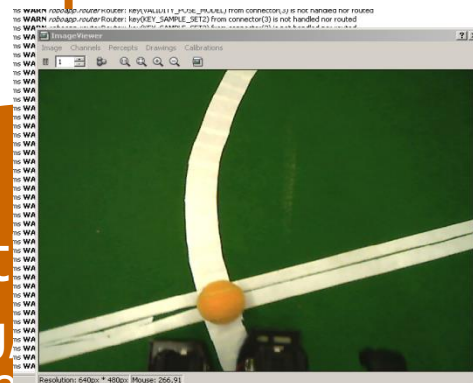
head camera

Mot
Walking
getting up, ...

"Sense"

Perception

Real-time image processing,
self-/object localization



Roboter: Funktionale Anforderungen

"Plan"

Behavior Control

Ball tracking, ball search,
striker, defender, goalie,
team behavior, ...



"Act"

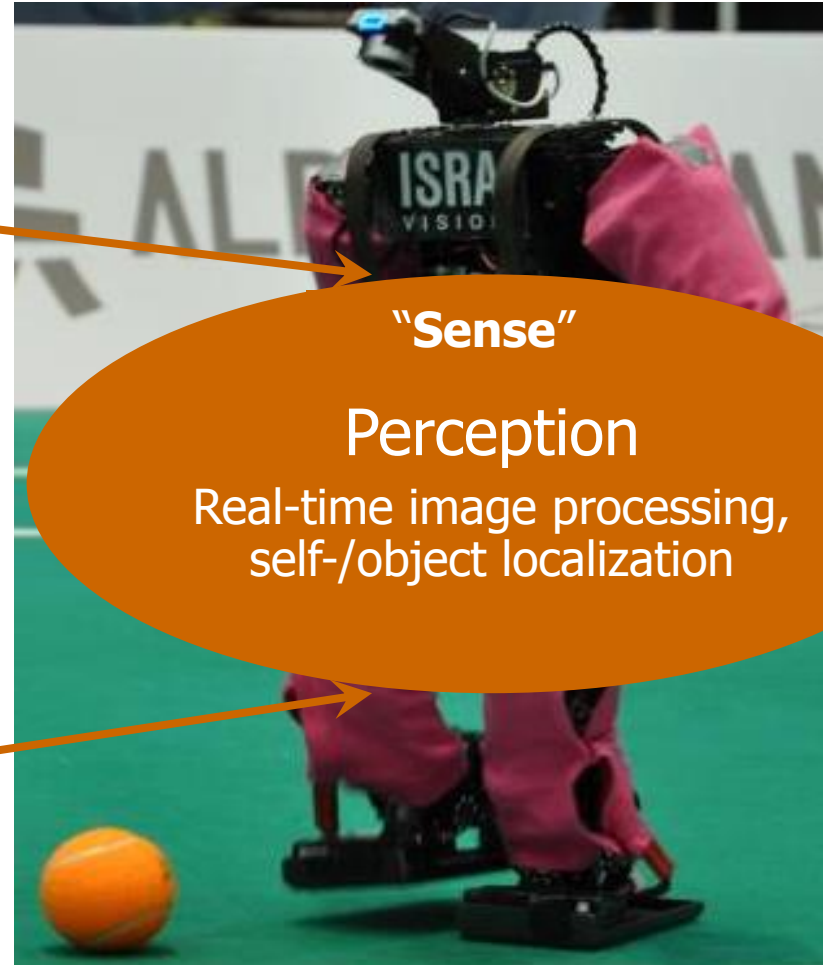
Motion Control

Walking, turning, kicking,
getting Up, ...

"Sense"

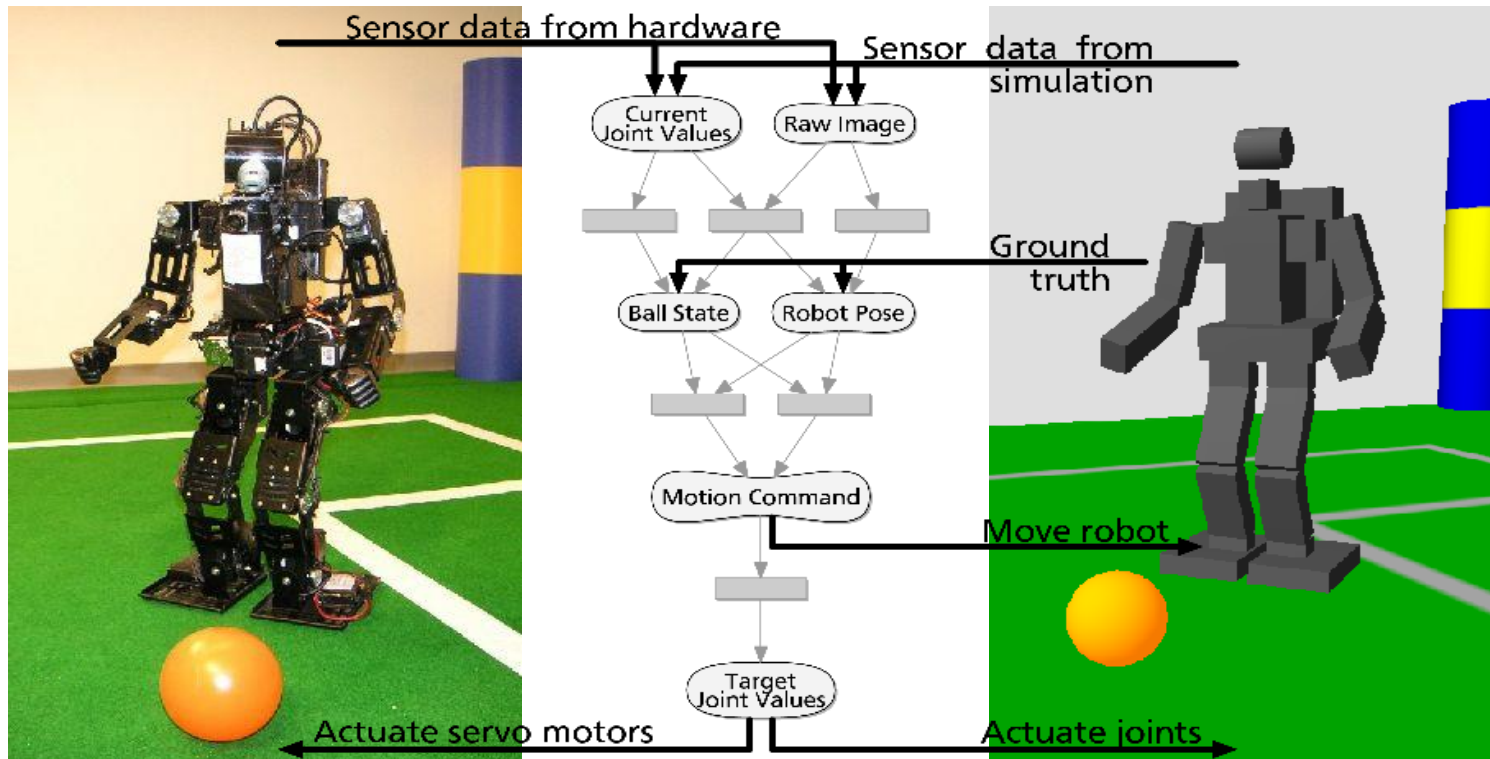
Perception

Real-time image processing,
self-/object localization

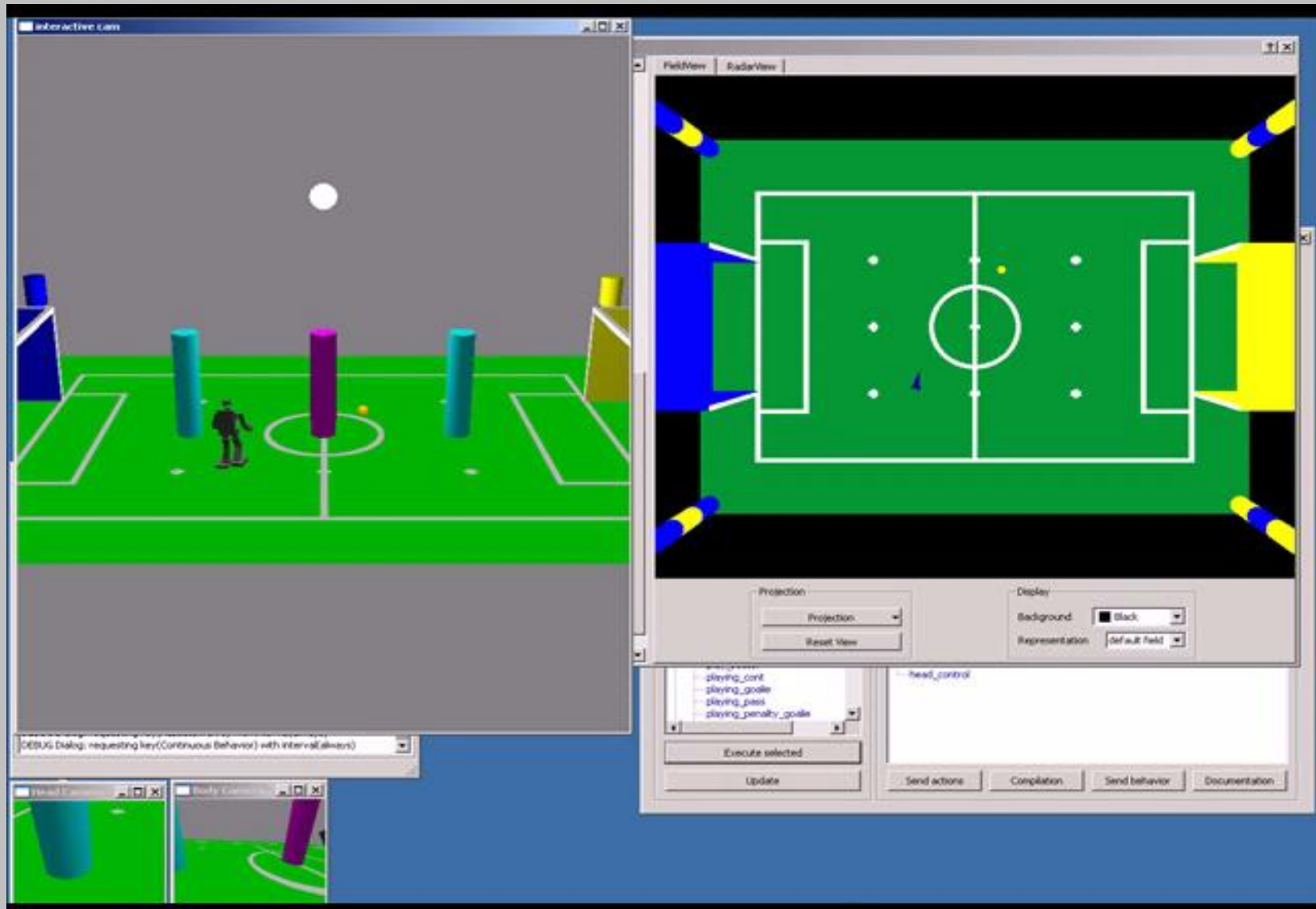


Software-in-the-Loop Test und Validierung

- Ersetzen der Hardware (Sensoren, Antriebe, ...) durch **realistische Simulation des Bewegungsapparates und dessen Sensoren** sowie deren Interaktion mit der Umwelt („digital twin“)
- Gleiche **Schnittstellen** zu realer wie virtueller Roboter-Hardware
- **Konsistente Taktraten** von Roboter-Simulation und Steuerungssoftware



Video – Simulation (RoboCup 2007-8: Dribbling Challenge)



Video – Realität (RoboCup 2007-8: Dribbling Challenge)





1. Einführung

1.1 Allgemeine Beispiele

1.2 Beispiele aus der Robotik

1.3 Begriffsbildung

Begriffsbildung: „Simulation“

Simulation:

virtuelles (i.Allg. rechnergestütztes) Experiment am **Modell**, eigentliches Ziel der **Modellierung**

R. Shannon (1975):

„Simulation is the process of

- designing a model of a real system and
- conduction [virtual] experiments with this model for the purpose either of
- understanding the behavior of the [real] system and its underlying causes or of
- evaluating various designs of an artificial system or strategies for operation of the [real] system.“



1. Einführung

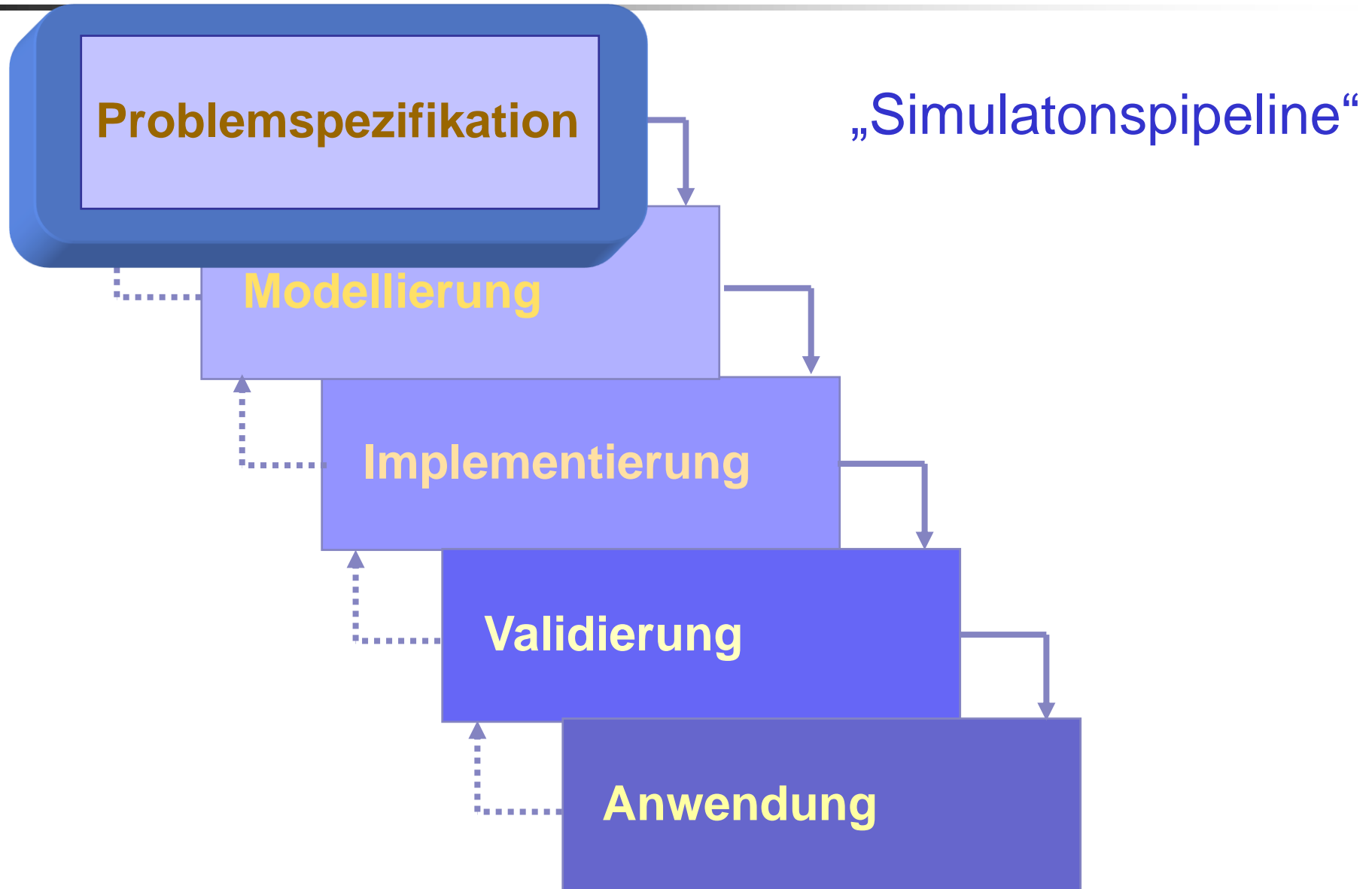
1.1 Allgemeine Beispiele

1.2 Beispiele aus der Robotik

1.3 Begriffsbildung

1.4 Schritte einer Simulationsstudie

Schritte einer Simulationsstudie



Beispiel für Simulationsstudie: Schiffschaukel



<https://www.youtube.com/watch?v=k45WZUyLZpM>

(Einige Folien zur Schiffschaukel
beruhen auf W. Wiechert, Uni Siegen)



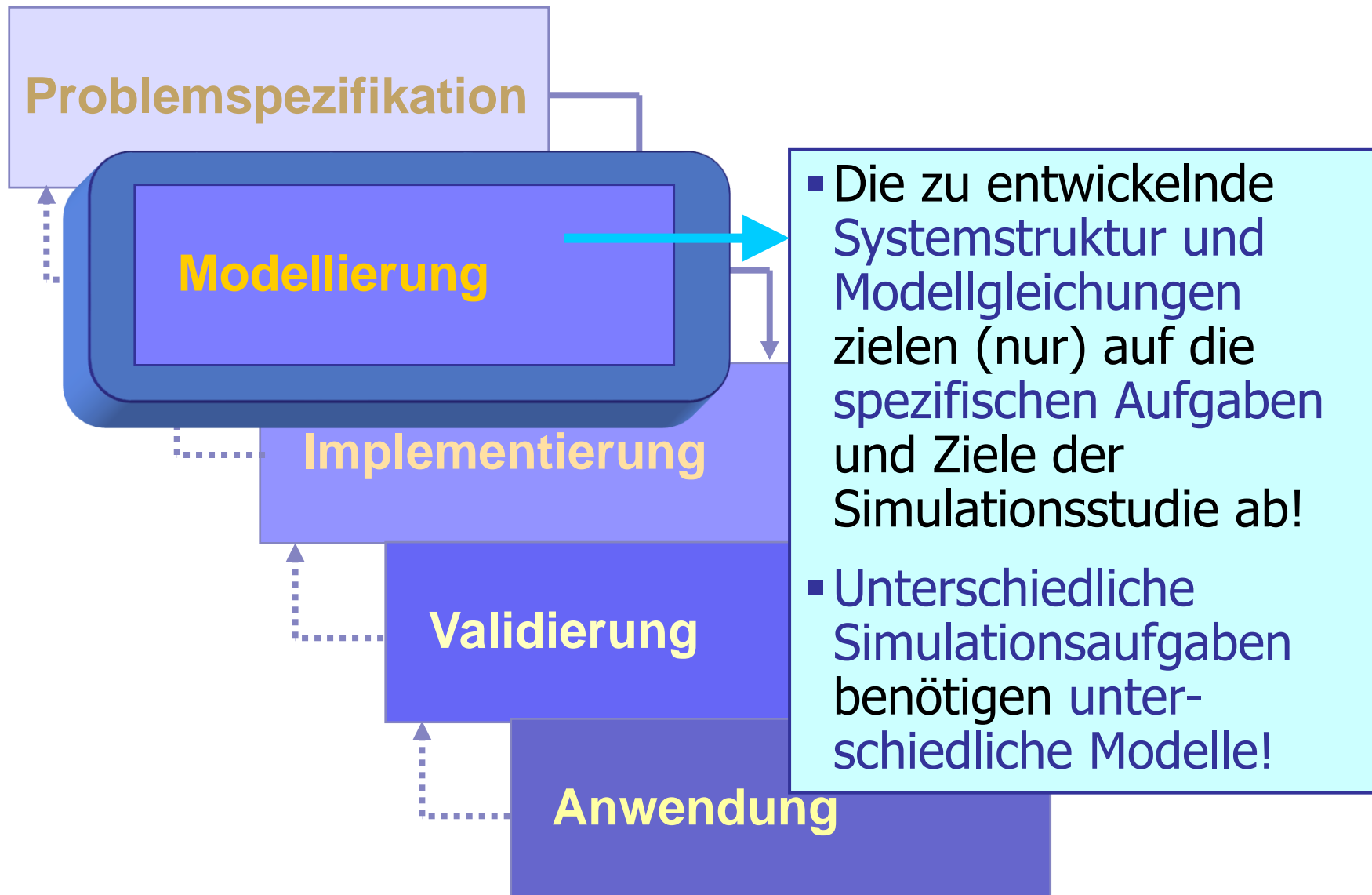
Problemspezifikation: Beispiel Schiffschaukel

Möglicher Zweck der Untersuchungen: z.B.

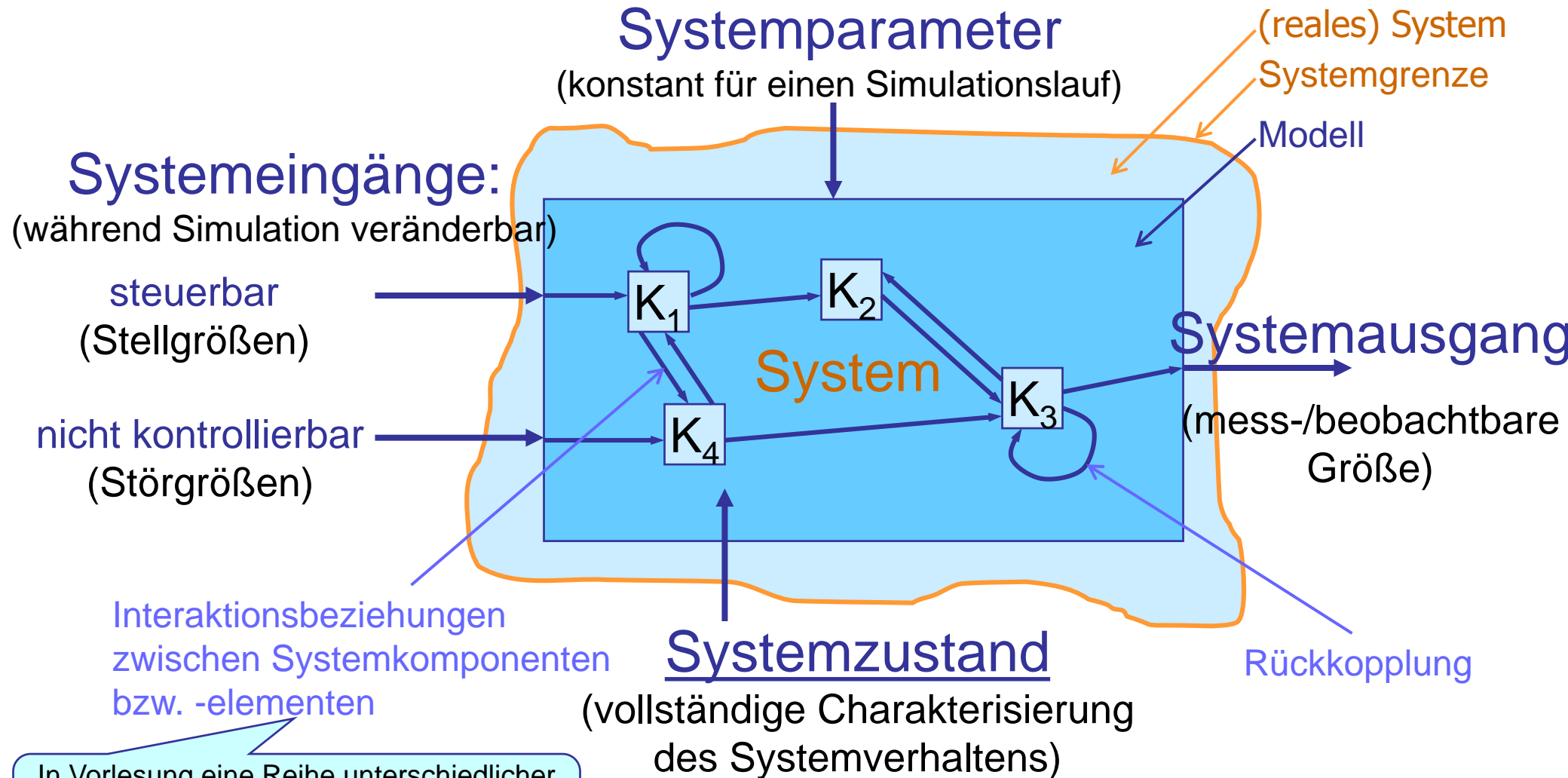
1. Benötigte Zeiten und auftretende Kräfte bei unterschiedlichen Schaukelstrategien
2. Auftretende Belastungen in den unterschiedlichen Tragestrukturen
3. Wartezeiten und Durchsatz von Kunden



Schritte einer Simulationsstudie



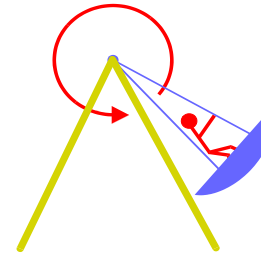
(Reales) System und Modell



In Vorlesung eine Reihe unterschiedlicher Beispiele für Systemelemente und ihre Interaktionsbeziehungen

Herleitung von Modellen (1)

Modell



Original



Anforderungen an Modelle:

1. Um Ergebnisse vom Modell auf das Originalsystem übertragen zu können, ist eine „ausreichend genaue“ Abbildung bzgl. der für die Simulationszwecke relevanten Merkmale notwendig.
2. Damit Modell einfacher handhabbar ist als Original, müssen Details weggelassen werden (Idealisierung bzw. Abstraktion).

Schwierigkeiten:

- Zielkonflikt zwischen 1. und 2.
- Alle relevanten Merkmale oft a priori nicht bekannt
- Auswirkungen von Idealisierungen i.Allg. nicht von vorneherein absehbar

Herleitung von Modellen (2a)

- 1) Was genau soll modelliert werden?
- 2) Welche Größen spielen eine Rolle (qualitativ) und wie groß ist ihr Einfluss (quantitativ)?
- 3) In welchem Beziehungsgeflecht stehen die als relevant identifizierten Größen miteinander?
- 4) Mit welchem Instrumentarium lassen sich die Wechselwirkungen und Abhängigkeiten beschreiben?
- 5) Welche Gestalt hat die resultierende Berechnungsaufgabe zur Lösung der Modellbeziehungen?

Problemspezifikation: Beispiel Schiffschaukel

Möglicher Zweck der Untersuchungen: z.B.

1. Benötigte Zeiten und auftretende Kräfte bei unterschiedlichen Schaukelstrategien
2. Auftretende Belastungen in den unterschiedlichen Tragestrukturen
3. Wartezeiten und Durchsatz von Kunden



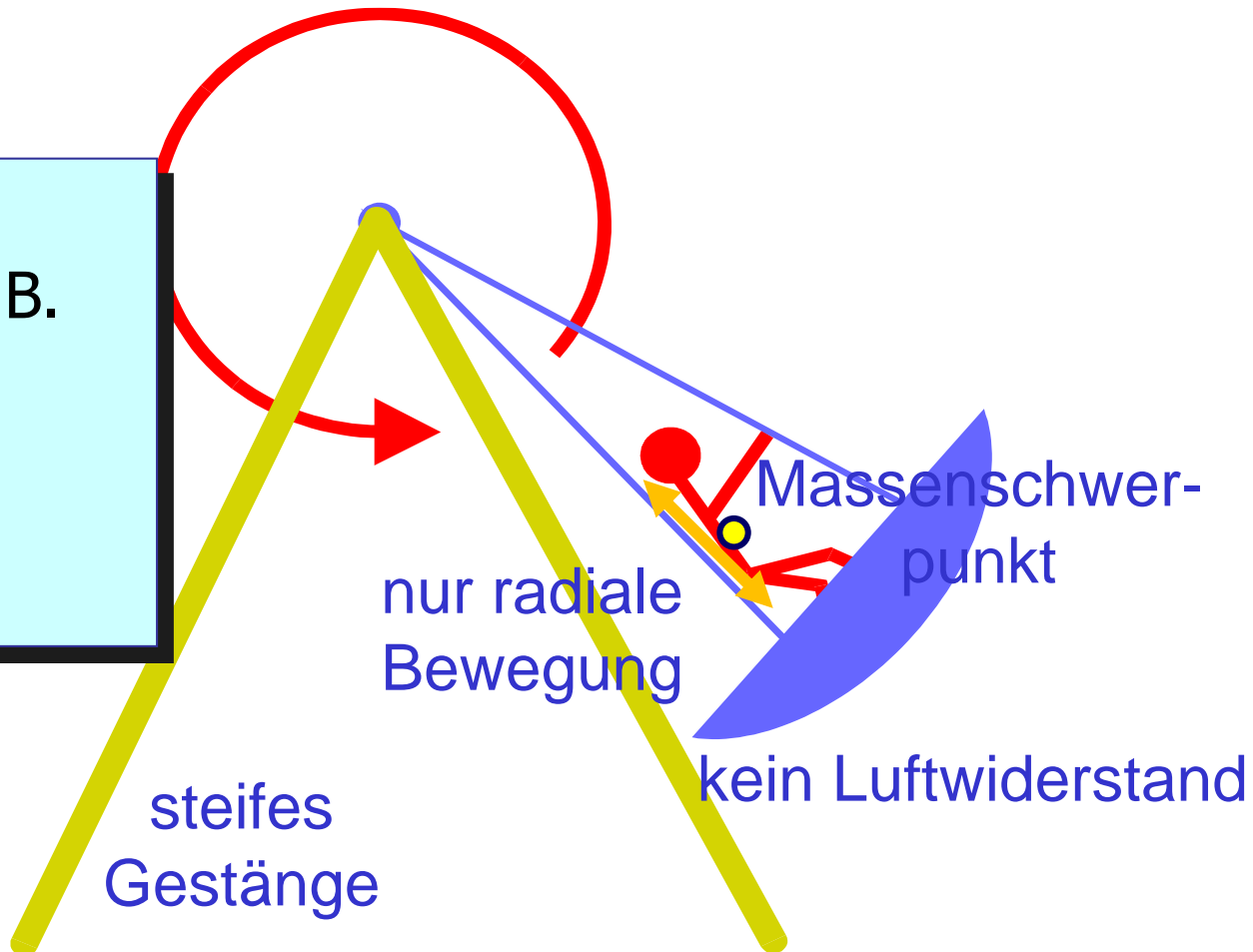
Mathematische Modellierung: Annahmen

Schiffschaukel

Zweck der Untersuchungen: z.B.

1. Benötigte Zeiten und auftretende Kräfte bei unterschiedlichen Schaukelstrategien

→ Die resultierenden Modelle sind Systeme gewöhnlicher Differentialgleichungen, die nachfolgend in der Vorlesung behandelt werden.



Modellierung: Veranschaulichung von Annahmen



Das Modell kann reale Bewegungen nur mit gewissen Einschränkungen wiedergeben.

Zustandsvariablen eines Modells

Zustandsvariablen

- sind zeitabhängige Größen,
- legen die aktuelle Konfiguration eines Systems exakt fest,
- legen den zukünftigen Verlauf genau fest,
- sind nicht redundant.

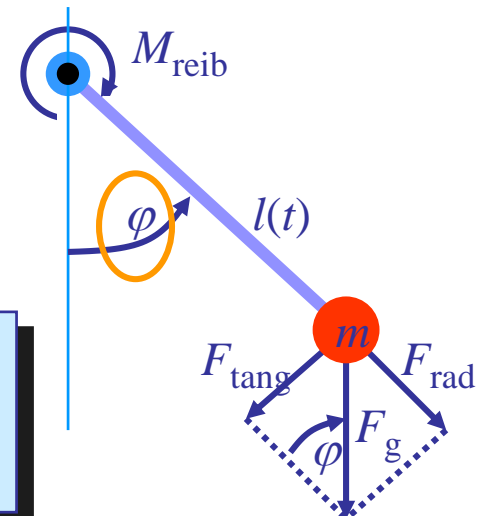
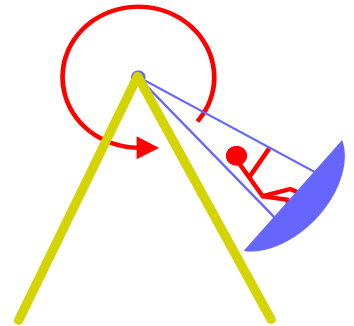
Beispiel Schiffschaukel (→ Näheres in der VL)

- Winkel φ und Winkelgeschwindigkeit ω sind Zustandsvariablen.

$$\begin{aligned}\dot{\varphi} &= \omega \\ \dot{\omega} &= -\left(2 \frac{\dot{l}}{l} + \frac{d}{m l^2}\right) \omega - \frac{g}{l} \sin \varphi\end{aligned}$$

Grundprinzip

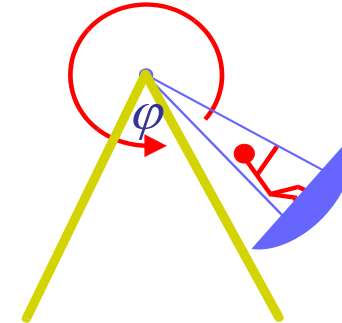
Die Festlegung der Zustandsvariablen ist der Ausgangspunkt jeder Modellbildung.



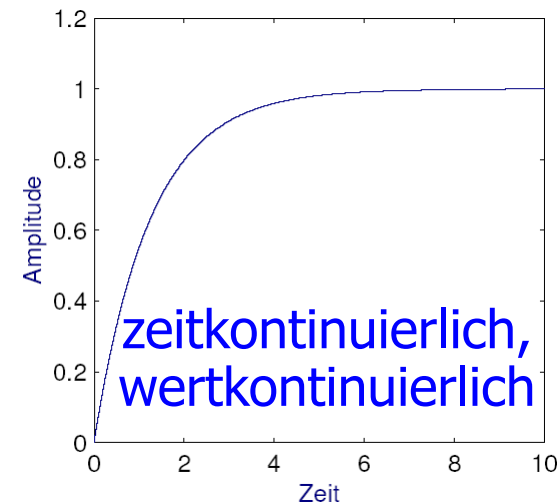
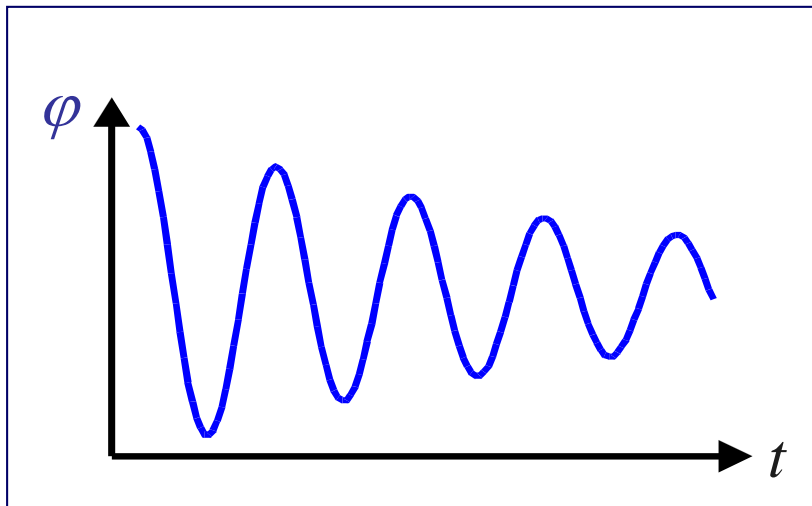
Zustandsvariablen eines Modells

Beispiel Schiffschaukel

- φ und ω sind Zustandsvariablen.



Zustandsvariablen,
deren Verhalten durch **gewöhnliche
Differentialgleichungen** beschrieben wird,
ändern sich **zeitkontinuierlich** und **wertkontinuierlich**:

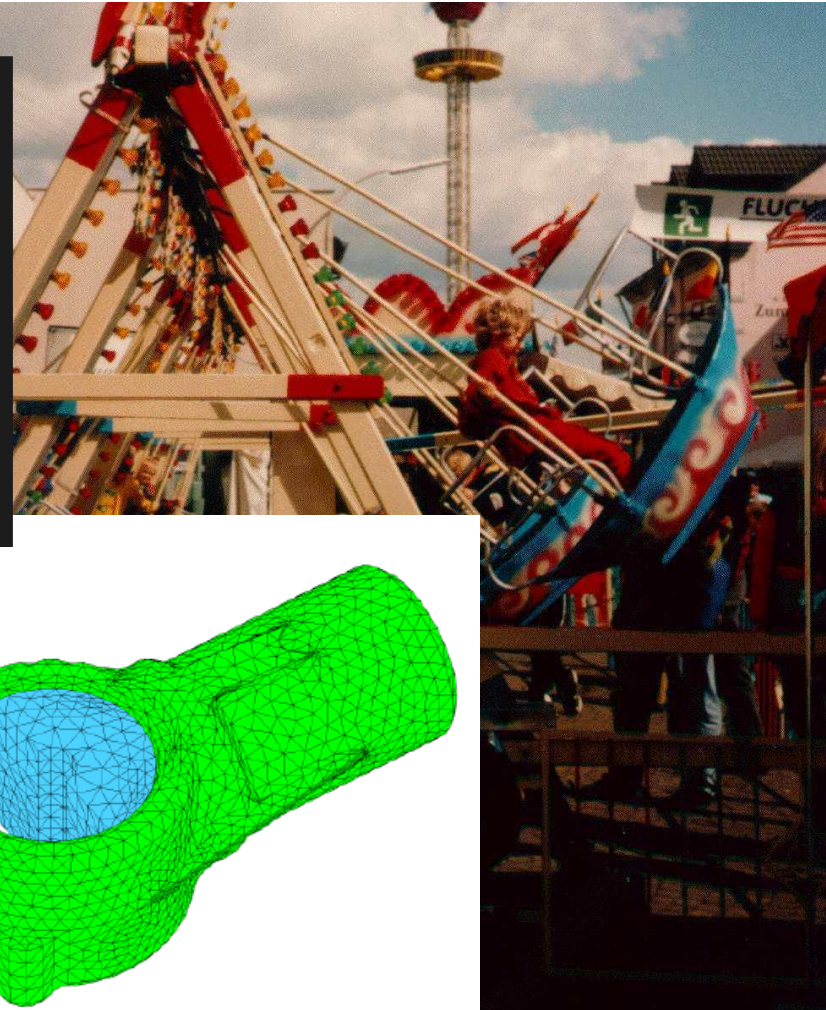
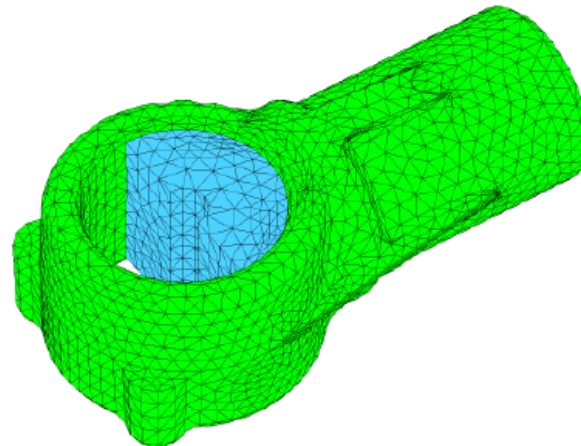


Problemspezifikation: Beispiel Schiffschaukel

Zweck der Untersuchungen: z.B.

2. Auftretende Belastungen in den unterschiedlichen Tragestrukturen

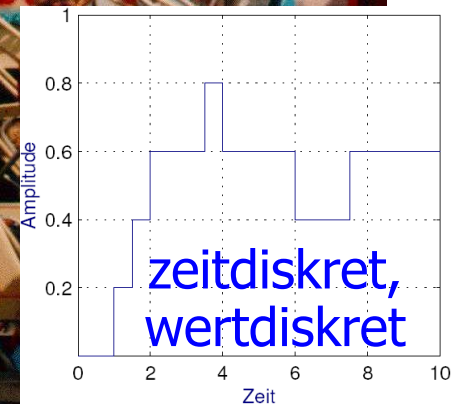
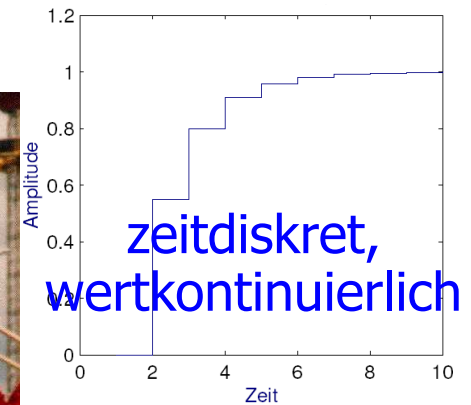
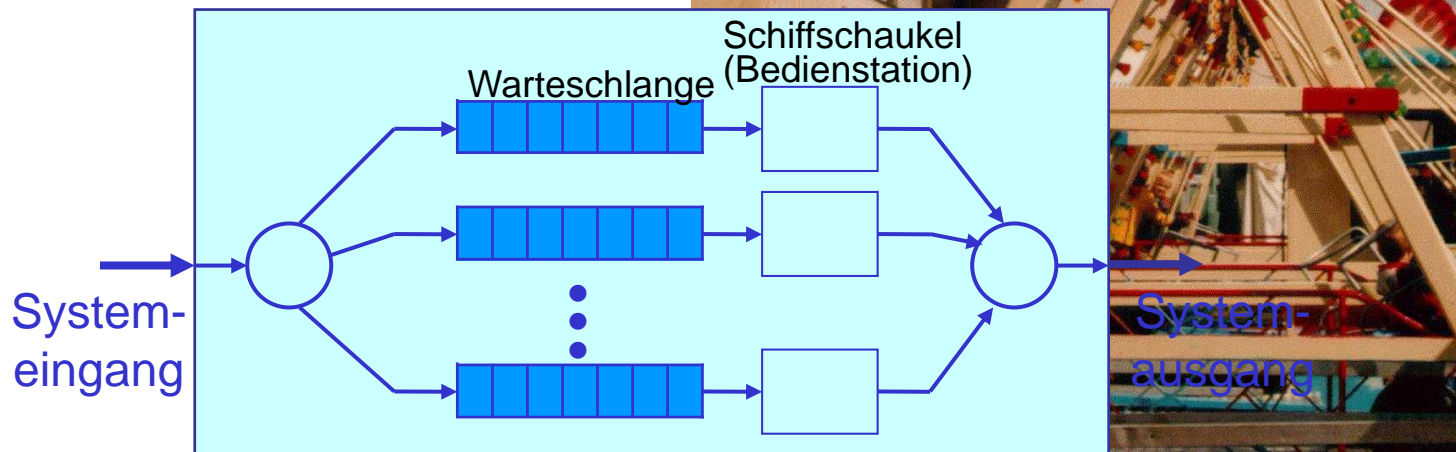
→ Die resultierenden Modelle sind **partielle Differentialgleichungen**, die in der Vorlesung nicht behandelt werden können.



Problemspezifikation: Beispiel Schiffschaukel

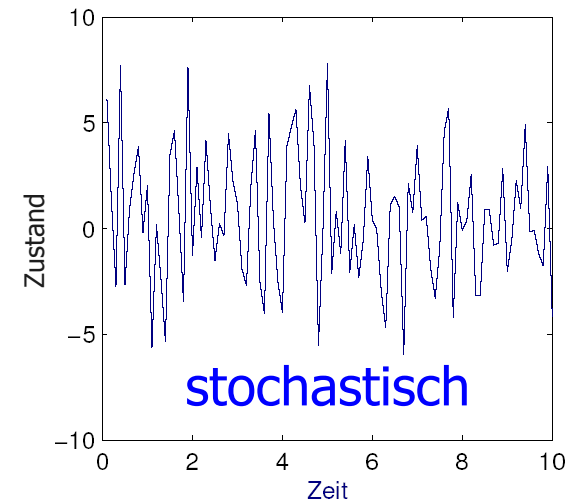
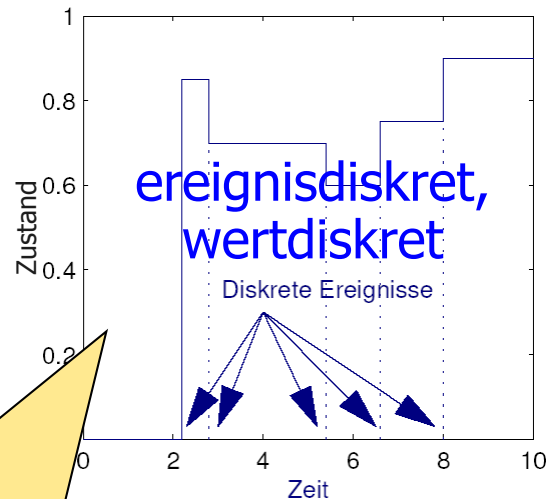
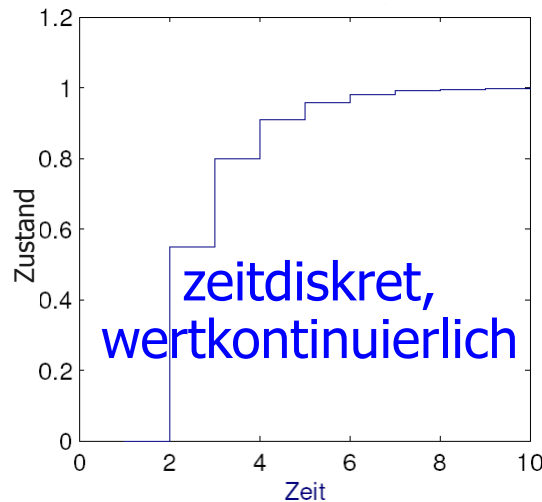
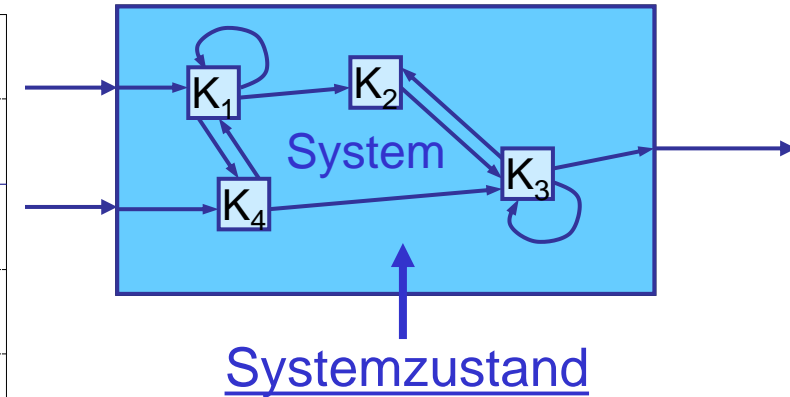
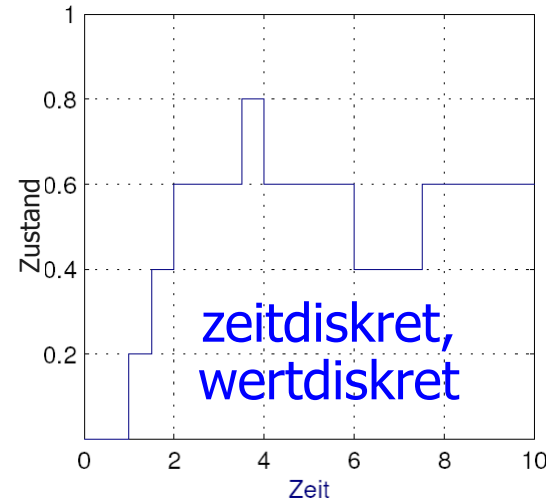
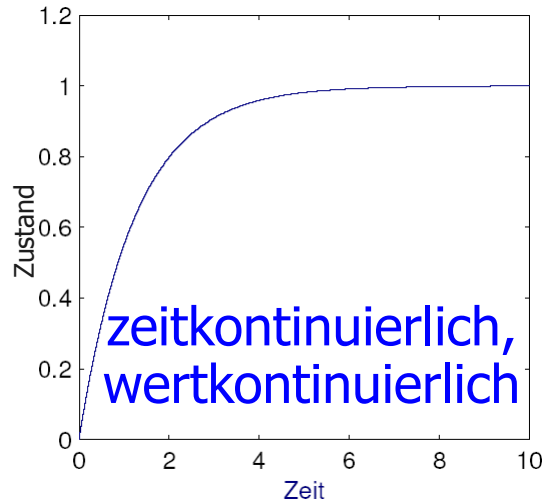
Zweck der Untersuchungen: z.B.

3. Wartezeiten und Durchsatz von Kunden



→ Die Zustandsvariablen der resultierenden Modelle ändern sich **zeitdiskret** und sind **wertkontinuierlich** oder **wertdiskret**.

Modellklassifikation (1)

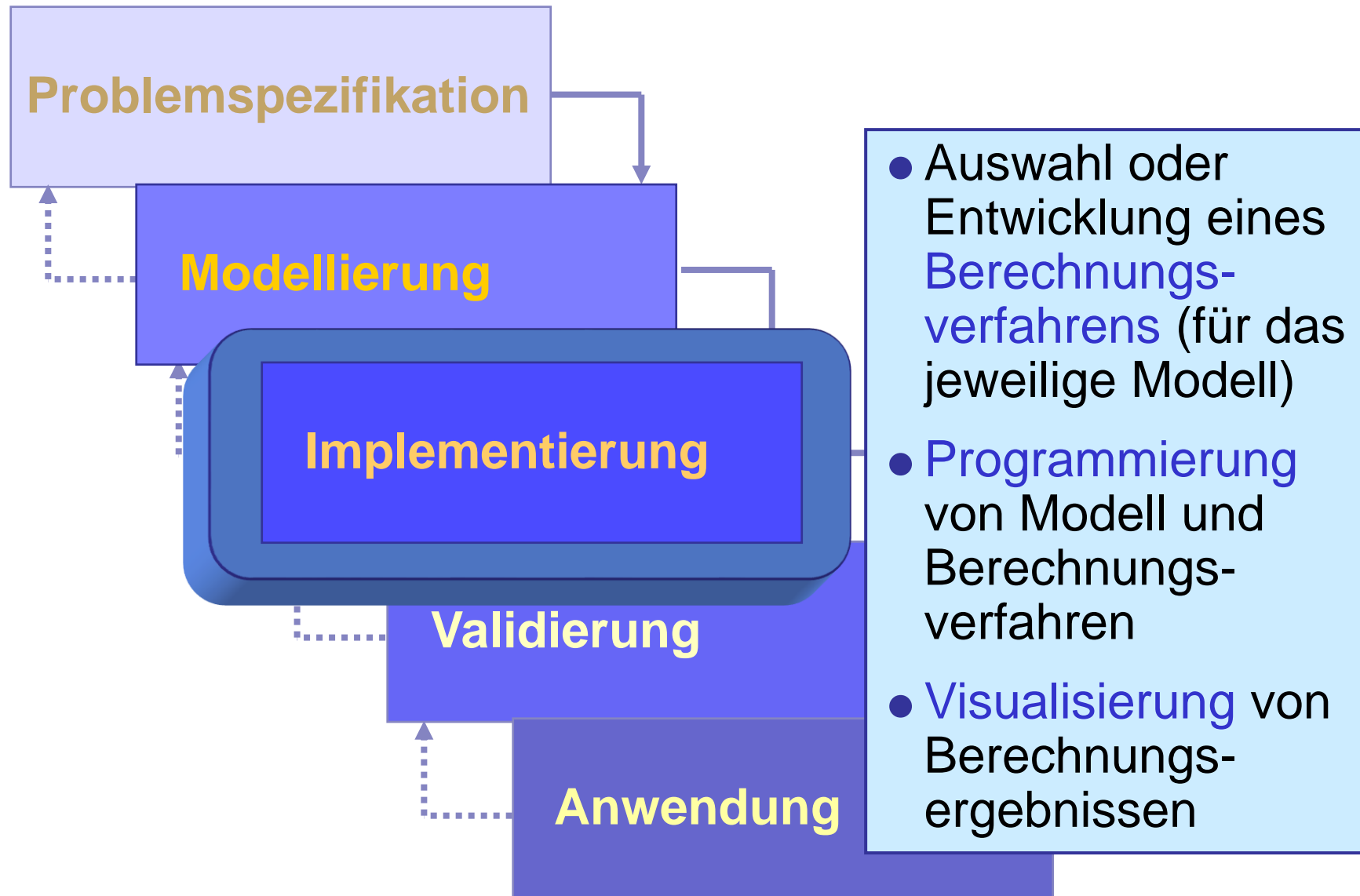


Ereignisdiskret bedeutet, dass sich Zustände in Abhängigkeit von eintretenden Ereignissen ändern können, deren Eintrittszeitpunkte nicht von vorneherein bekannt sind.

Modellklassifikation (2)

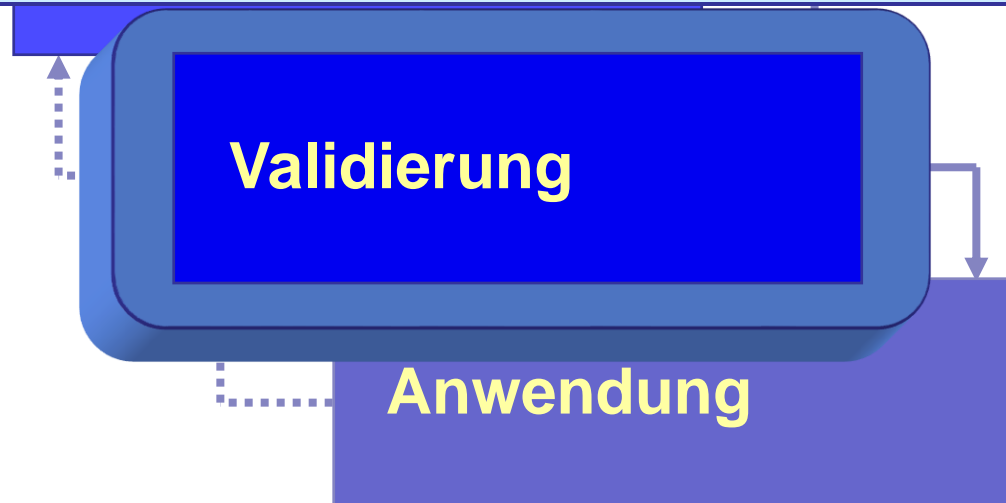
Dynamik	Zeitachse	Zustandsraum	Zustandsübergänge
stationär $0 = f(x)$			
instationär (dynamisch) $\dot{x} = f(x)$	zeitkontinuierlich oder zeitdiskret oder ereignisdiskret	wertdiskret oder wertkontinuierlich	deterministisch oder stochastisch

Schritte einer Simulationsstudie



Schritte einer Simulationsstudie

- **Validierung** ist eine **systematische Plausibilitätsüberprüfung**, ob das Simulationsmodell die Anforderungen erfüllt. Ziel ist der **Nachweis ausreichender Glaubwürdigkeit** des Simulationsmodells im Hinblick auf die Problemspezifikation.
- Validierung reduziert die **Wahrscheinlichkeit falscher Schlussfolgerungen** aus der Simulation.
- Validierung beruht auf sorgfältig ausgewählten **Tests**. Eine exakter Korrektheitsnachweis (Verifikation) ist in der Regel **unmöglich**.

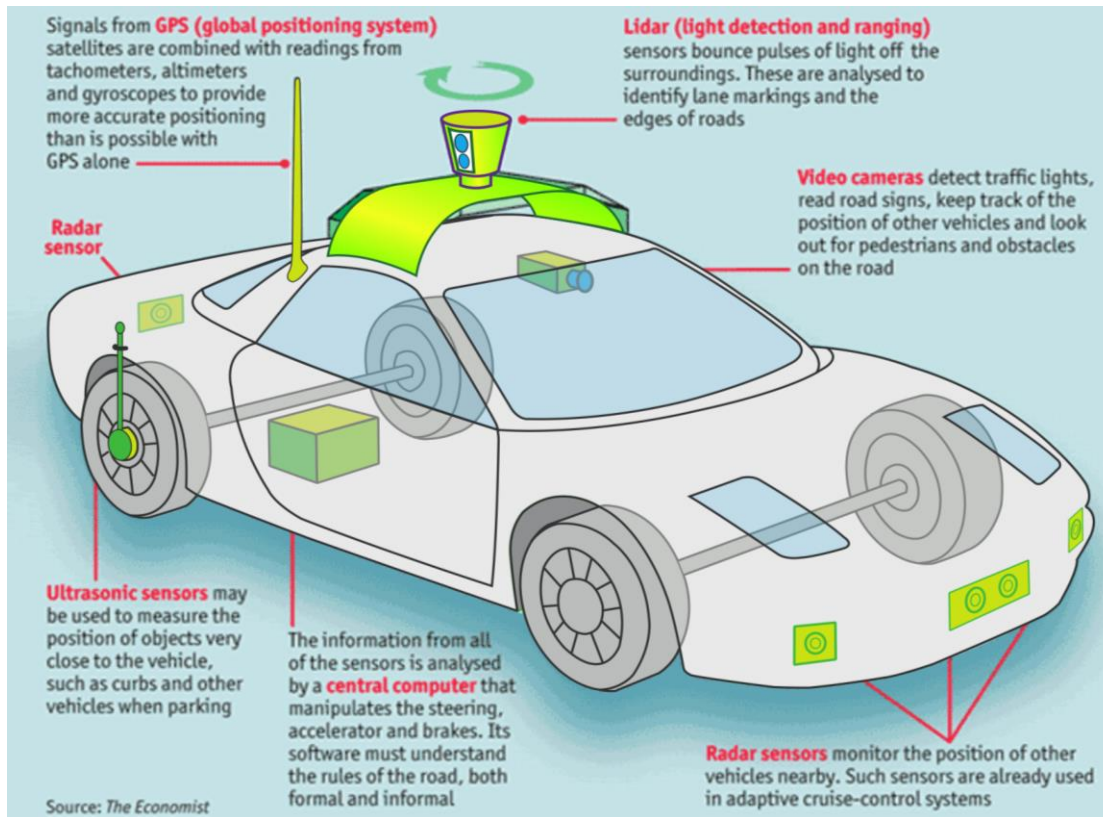


Vergleich: Simulation – Experiment



www.dribblers.de

Aktuelle Anwendung: Selbstfahrende Autos



- **Simulation** ist Kerntechnologie für selbstfahrende Autos (= mobile autonome Roboter)
- Millionen von Szenarien und beliebig viele Varianten können mit Simulation völlig gefahrlos und ohne den enormen Zeit- und Kosten-Aufwand für vergleichbare Hardware-Experimente getestet werden.
 - **Herausforderung:** Realistische und echtzeitfähige Simulation

- Simulation wird Teil des zukünftigen Zulassungsverfahrens autonomer Fahrzeuge:



“Simulating traffic situations plays a crucial role in homologating highly/fully automated vehicles due to the sheer volume of situations that need to be tested. TÜV SÜD experts estimate there are up to 100 million situations per fully automated driving function to determine self-driving capability. The time and costs to perform traditional on-road tests to evaluate these critical scenarios are no longer practical. In future digital homologation, virtual procedures will augment established methods.”

Aktuelle Anwendung: Selbstfahrende Autos

- Viele Firmen der Automobilindustrie, IT-Industrie und viele Startups nutzen Simulation und entwickeln diese weiter, z.B.:



<https://wayve.ai/blog/sim2real> (Dez. 2018)

Lernziele heute: Beantwortung Kernfragen

- Was sind die **Grundbegriffe** der Modellierung und Simulation und was sind ihre Bedeutungen?
 - **Wofür** kann man Simulationen einsetzen (Beispiele für Anwendungen?)
 - Wie lauten die fünf wesentlichen **Schritte** einer Simulationsstudie?
 - Welche **Instrumentarien** gibt es zur Beschreibung von Modellen?
 - Wie kann man Modelle **klassifizieren**?
- **Selbsttest: Können Sie diese Fragen beantworten?**