

Grundlagen der Robotik

13. Digitale Filter, Performanz von Reglern, Verhaltenssteuerung

Prof Sven Behnke

Vorletzte Vorlesung

■ Diskrete Fourier-Transformation:

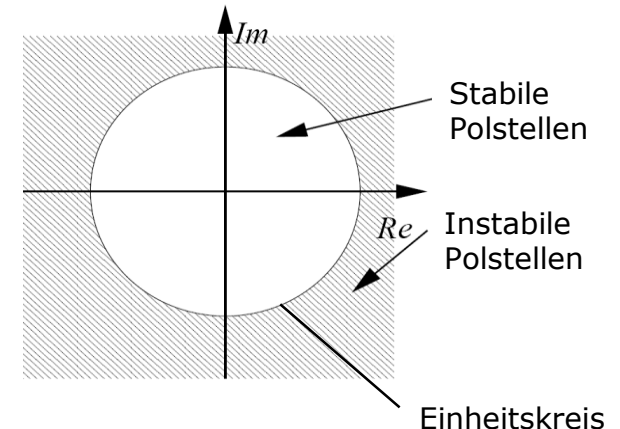
$$\Omega = \omega T \qquad F(e^{j\Omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f[n]e^{-jn\Omega}$$

■ **Z-Transformation** ist diskrete Variante der Laplace-Transformation

$$z = r e^{j\Omega} \qquad F(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f[n]z^{-n}$$

■ Stabilität zeitdiskreter Systeme: Betrag aller Polstellen muss kleiner als Eins sein:

$$|z_{\infty,i}| < 1$$



Lineare Digitale Filter

- Realisierung zeitdiskreter linearer Systeme mit digitalen Schaltkreisen
- Anwendungen:
 - Signalverarbeitung
 - Regelungstechnik

- **Eingabe:** Digitales Signal

$$u[n] \quad \circ \text{---} \bullet \quad U(z)$$

- **Ausgabe:** Digitales Signal

$$y[n] \quad \circ \text{---} \bullet \quad Y(z) = U(z)H(z)$$

Klassen Linearer Filter

Klassifikation:

- **FIR-Filter:** (finite impulse response)
 - Immer stabil
 - Höherer Implementierungsaufwand
- **IIR-Filter:** (infinite impuls response)
 - Möglicherweise instabil
 - Geringer Implementierungsaufwand

FIR-Filter

- Finite **I**mpulse **R**esponse - Filter
- Auch: **M**oving **A**verage (MA-Filter)
- Lineare Differenzengleichungen der Form

$$y[n] = \sum_{k=1}^N a_k y[n - k] + \sum_{k=0}^M b_k u[n - k]$$

mit $a_i = 0$:

$$y[n] = b_0 u[n] + b_1 u[n - 1] + \dots + b_M u[n - M]$$

- Transferfunktion: $H(z) = \sum_{k=0}^M b_k z^{-k}$
- Keine Polstelle => **Stabilität**, unabhängig von der Wahl der Parameter!

FIR-Filter Beispiele

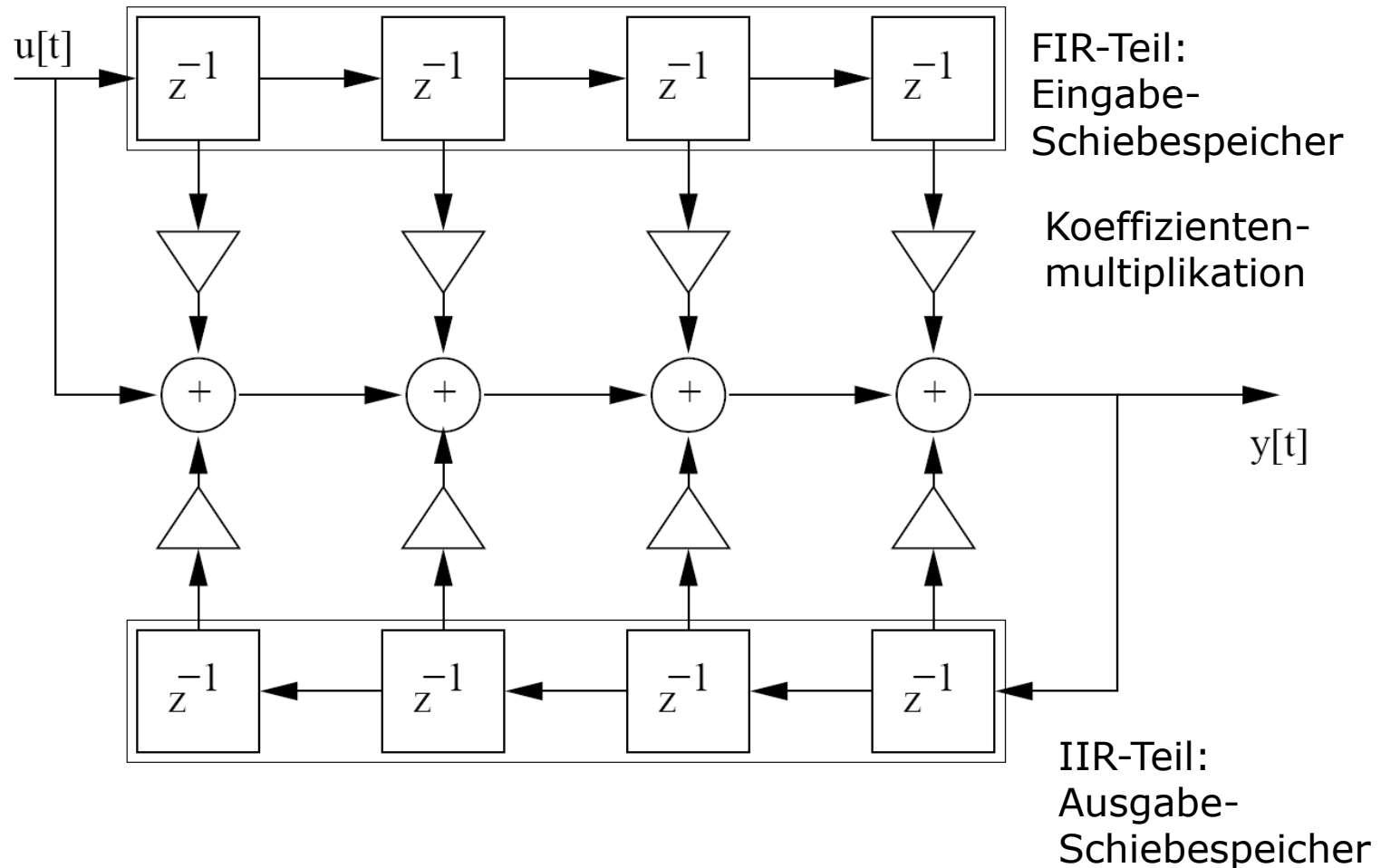
- $y[n] = \frac{1}{4}u[n] + \frac{1}{2}u[n-1] + \frac{1}{4}u[n-2]$

- $y[n] = u[n] - u[n-1]$

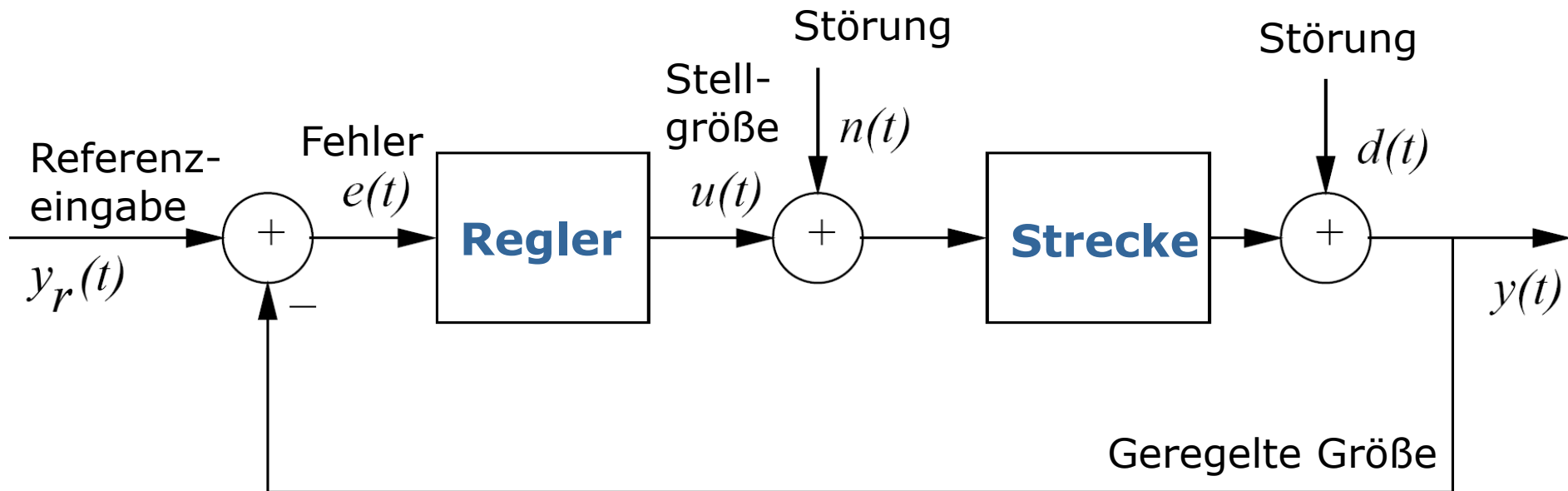
IIR-Filter

- Infinite Impulse Response - Filter
- Auch: Auto-Regressive Moving Average - Filter (ARMA-Filter)
- Lineare Differenzengleichungen mit $a_i \neq 0$
- Stabilität nur, wenn Betrag der Polstellen < 1
 - Stabiler Tiefpass: $y[n] = 0.01 u[n] + 0.99 y[n - 1]$
 - **Instabil:** $y[n] = 0.01 u[n] + 1.01 y[n - 1]$

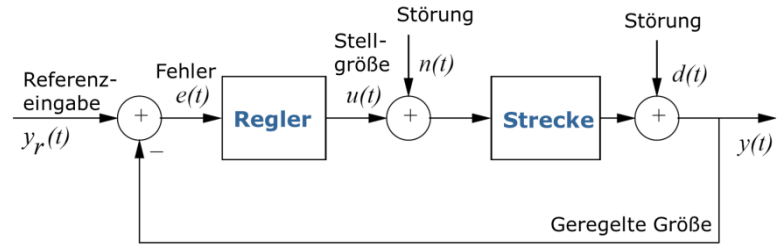
Implementierung digitaler Filter



Erinnerung: Regler



Formulierung der Ziele von Reglern im Frequenzraum



- Folgeverhalten:

$$H_{CL}(s) = \frac{Y(s)}{Y_r(s)} \rightarrow 1$$

- Rückweisung von Störungen:

- Störung nach der Strecke: $H_D(s) = \frac{Y(s)}{D(s)} \rightarrow 0$

- Störung vor der Strecke: $H_N(s) = \frac{Y(s)}{N(s)} \rightarrow 0$

PT_1 - Strecke

- Häufige Transferfunktion der geregelten Strecke:

$$H_{PT_1}(s) = \frac{K_S}{1 + sT_1}$$

Verstärkungsfaktor
Zeitkonstante

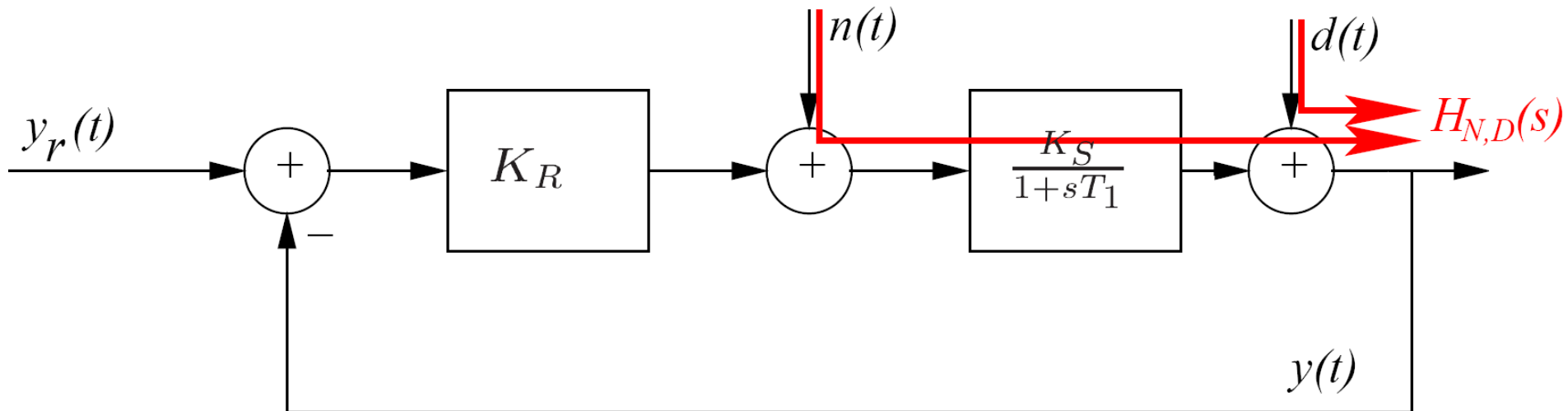
- Nur eine Polstelle mit negativem s : ($s_P = -1/T_1$)

➔ Stabiles Verhalten.

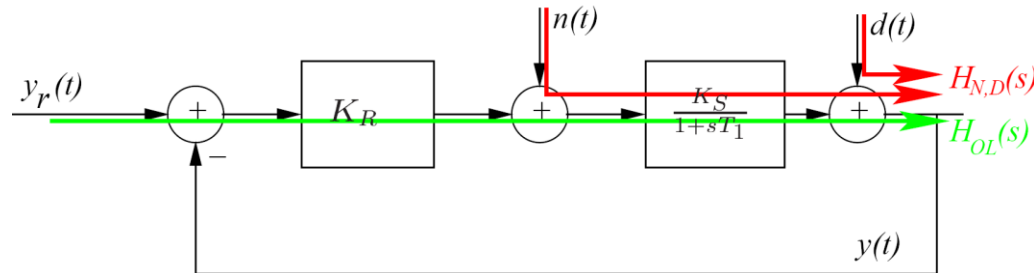
- Korrespondiert zu exponentiell abfallender Impulsantwort ($s(t) e^{-a t} \circ \bullet \frac{1}{s+a}$)
- Stationäres Verhalten für konstante Stellgröße $u(t)$:
Integral der Impulsantwort = K_S
➔ Endwert = $K_S u(t)$

Proportional-Regler für PT_1 - Strecke

- Einfachster Regler:
P-Regler mit Transferfunktion: $H_R = K_R$
- Gesucht:
 - Folgeverhalten $H_{CL}(s)$
 - Rückweisung von Störungen: $H_N(s), H_D(s)$



P-Regler: Folgeverhalten



- Open-loop Transferfunktion:

$$H_{OL} = H_R H_{PT_1} = \frac{K_S K_R}{1 + sT_1}$$

- Closed-loop durch Superposition:

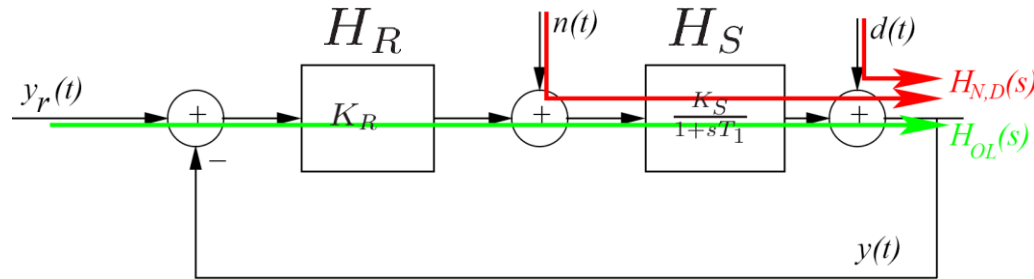
$$H_{CL} = \frac{H_{OL}}{1 + H_{OL}} = \frac{K_S K_R}{(1 + K_S K_R) + sT_1}$$

- Mit $s=0$ erhalten wir die asymptotische Ausgabe für konstante Referenz:

$$y_r(t) \frac{K_S K_R}{1 + K_S K_R}$$

- $H_{CL} \neq 1 \rightarrow$ Kein ideales Folgeverhalten
- Statischer Fehler wird beliebig klein, wenn $K_R \rightarrow \infty$

P-Regler: Rückweisung von Störungen der Stellgröße



- Transferfunktion für Störung $n(t)$ der Stellgröße $u(t)$:

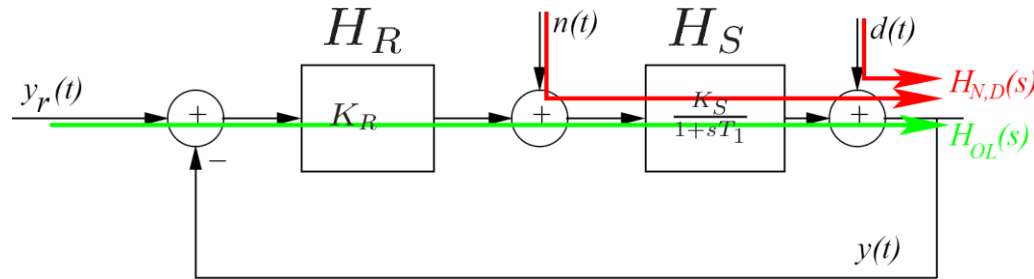
$$H_N = \frac{H_S}{1 + H_R H_S} = \frac{K_S}{1 + K_R K_S + sT_1}$$

- Für $s=0$ erhalten wir das asymptotische Verhalten für konstante Störung:

$$y(t) = n(t) \frac{K_S}{1 + K_R K_S}$$

- $H_N \neq 0 \rightarrow$ dauerhafter Fehler
- Wird beliebig klein, wenn $K_R \rightarrow \infty$

P-Regler: Rückweisung von Störungen der Regelgröße



- Transferfunktion für Störung $d(t)$ der Ausgabe $y(t)$:

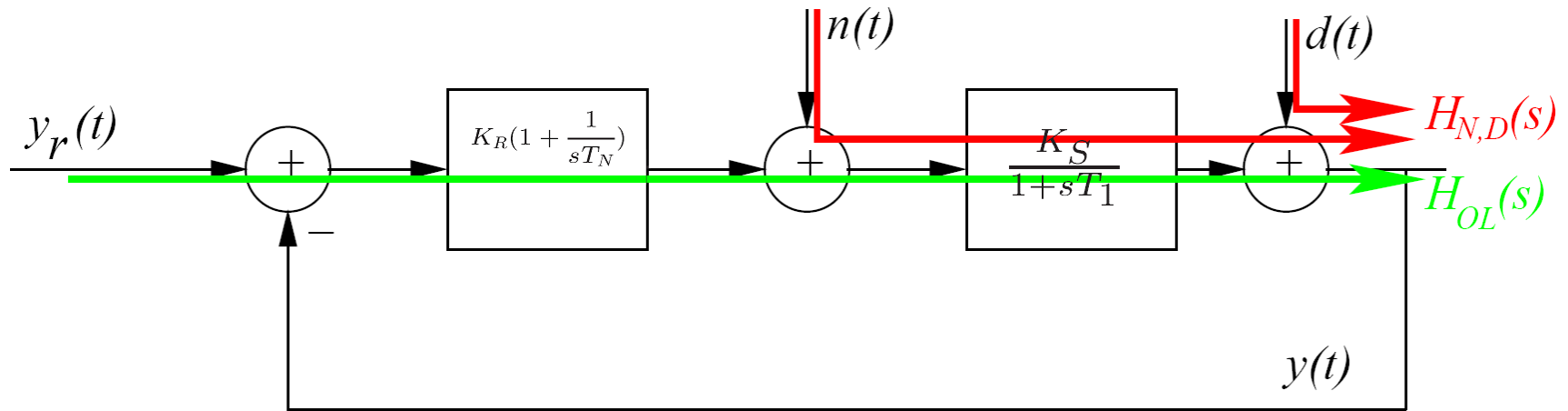
$$H_D = \frac{1}{1 + H_R H_S} = \frac{1}{1 + K_R K_S + sT_1}$$

- Für $s = 0$ erhalten wir das asymptotische Verhalten für konstante Störung:

$$y(t) = d(t) \frac{1}{1 + K_R K_S}$$

- $H_D \neq 0 \rightarrow$ dauerhafter Fehler
- Wird beliebig klein, wenn $K_R \rightarrow \infty$

Proportional-Integral-Regler für PT_1 -Strecke



- Transferfunktion: $H_R(s) = K_R \left(1 + \frac{1}{sT_N} \right)$
- Zwei Parameter: Verstärkung K_R und Integrationszeit T_N
- **Integrator** hat Stufenfunktion als Impulsantwort

$$s(t) \circ \text{---} \bullet \frac{1}{s}$$

PI-Regler: Tracking-Verhalten

- Transferfunktion von y_r nach y : $H_{CL} = \frac{H_{OL}}{1 + H_{OL}}$

$$\begin{aligned} H_{CL}(s) &= \frac{K_R K_S (1 + sT_N)}{sT_N(1 + sT_1) + K_R K_S (1 + sT_N)} \\ &= \frac{K_R K_S + sK_R K_S T_N}{K_R K_S + sT_N(K_R K_S + 1) + s^2 T_N T_1} \end{aligned}$$

- Für konstante Referenz ($s = 0$):

$$H_{CL}(0) = \frac{K_R K_S}{K_R K_S} = 1$$

- Kein Fehler mehr!

PI-Regler: Rückweisung von Störungen der Stellgröße

- Transferfunktion von n nach y : $H_N = \frac{H_S}{1 + H_R H_S}$

$$\begin{aligned} H_N(s) &= \frac{\frac{K_S}{1+sT_1} s T_N (1 + s T_1)}{s T_N (1 + s T_1) + K_R K_S (1 + s T_N)} \\ &= \frac{s K_S T_N}{K_R K_S + s T_N (K_R K_S + 1) + s^2 T_N T_1} \end{aligned}$$

- Asymptotisches Verhalten für $s = 0$:

$$H_N(0) = \frac{0}{K_R K_S} = 0$$

PI-Regler: Rückweisung von Störungen der Regelgröße

- Transferfunktion von d nach y : $H_D = \frac{1}{1 + H_R H_S}$

$$\begin{aligned} H_D(s) &= \frac{sT_N K_S (1 + sT_1)}{sT_N (1 + sT_1) + K_R K_S (1 + sT_N)} \\ &= \frac{s^2 K_S T_N T_1 + sT_N K_S}{K_R K_S + sT_N (K_R K_S + 1) + s^2 T_N T_1} \end{aligned}$$

- Asymptotisches Verhalten für $s = 0$:

$$H_D(0) = \frac{0}{K_R K_S} = 0$$

Problem: Totzeiten

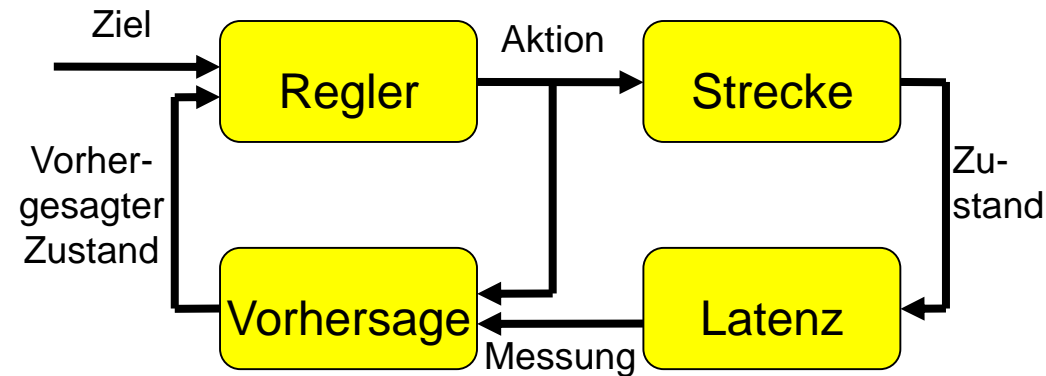
■ Problem:

- Latenz im Regelkreis 100...150 ms
- Exakt und langsam oder schnell und ungenau



■ Ansatz:

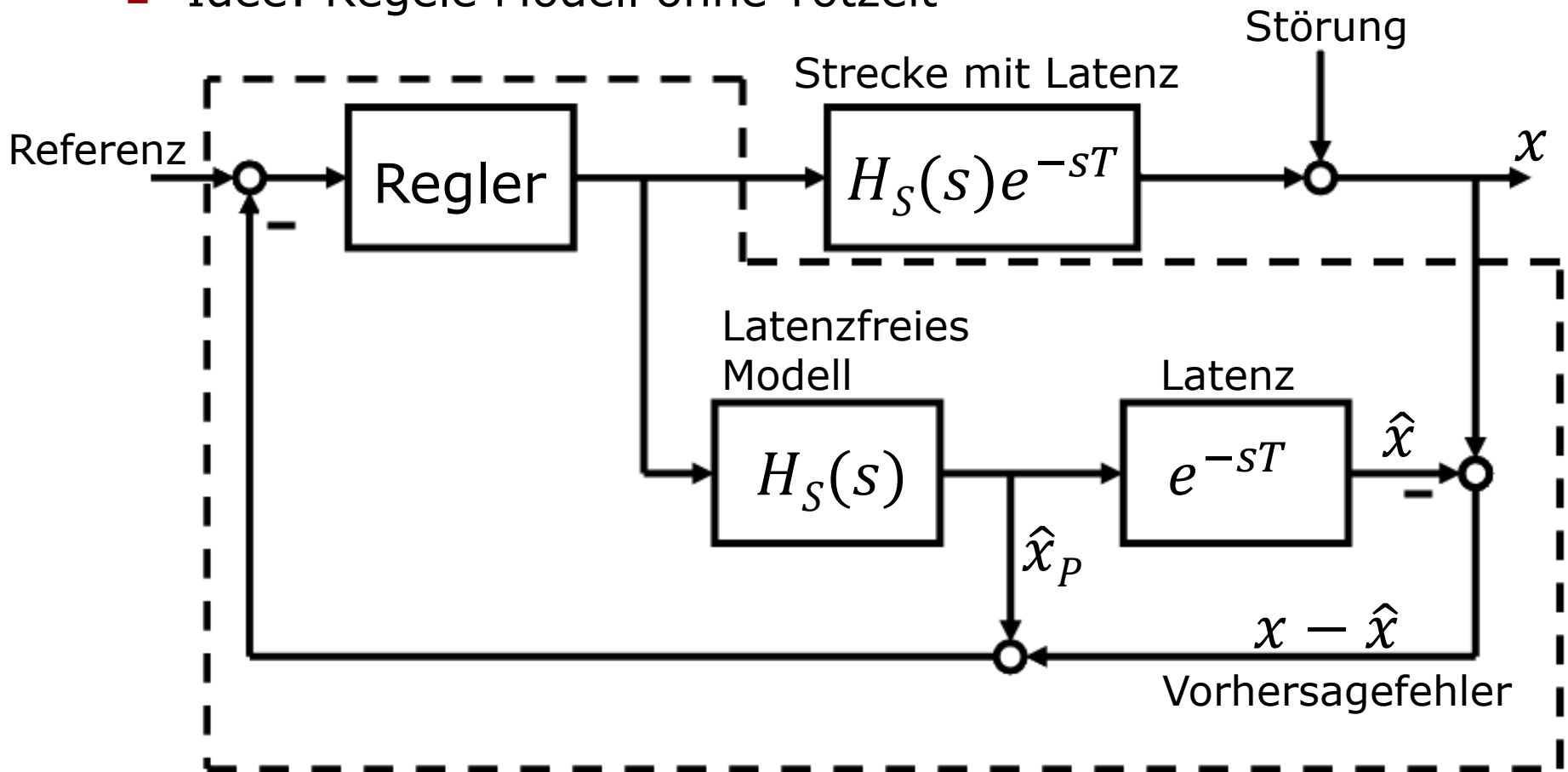
- Vorhersage des Bewegungszustands
- Für die Latenzzeit
- Neuronales Netz, trainiert mit aufgenommenen Daten
- Eingabe:
 - letzte Bewegungsmessungen
 - letzte Aktionen
- Verhaltenssteuerung, als ob keine Verzögerung



■ Ergebnis: schnell und genau

Smith Prediktor

- Idee: Regele Modell ohne Totzeit



- Bei gutem Modell $H_S(s)$ und bekannter Latenz kann Totzeit kompensiert werden

Grundlagen der Robotik

Verhaltenssteuerung

Prof. Sven Behnke



Autonome Mobile Roboter

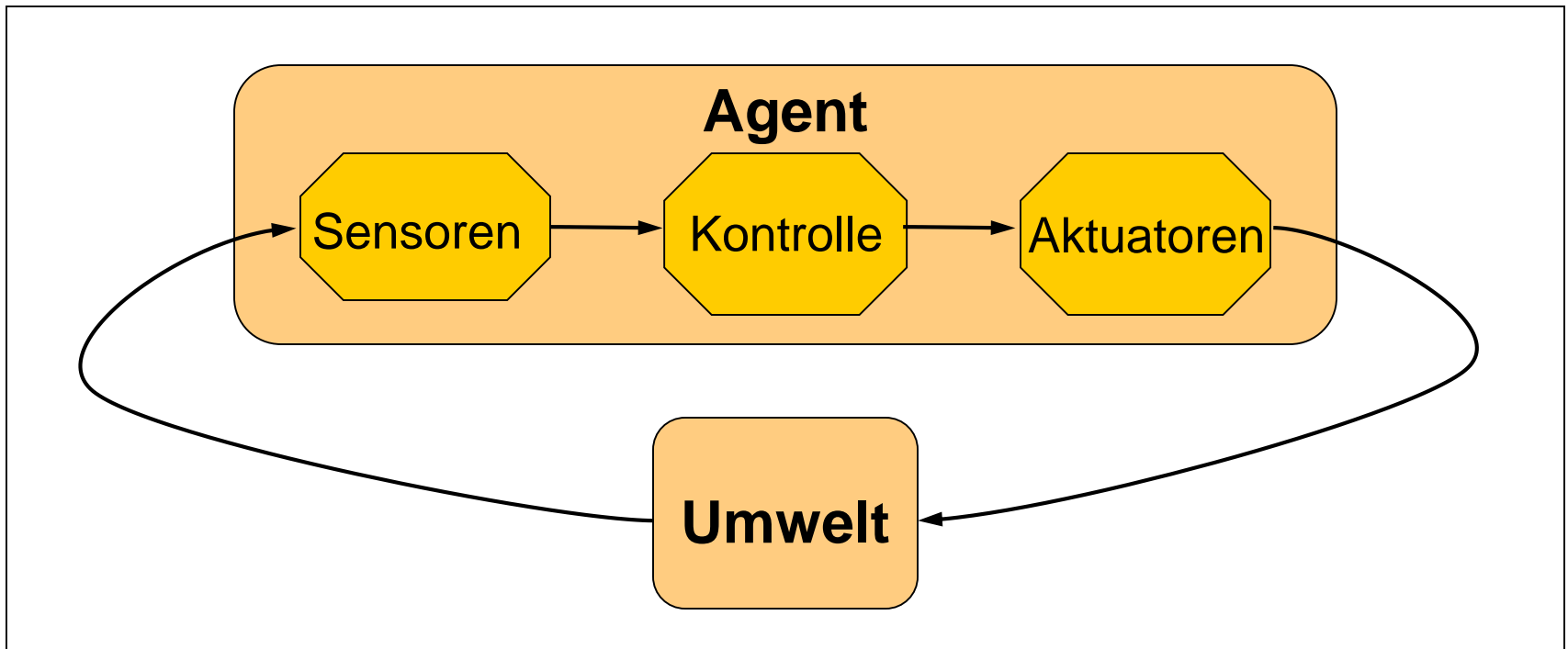


„Fungus Eater“ by Isabelle Follath
Masanao Toda 1962, Rolf Pfeifer 1994

- Vollständiger Agent
 - Autonomie
 - Selbsterhaltung
 - Körperlichkeit
 - Situiertheit
- Ökologische Nische

Teilprobleme

- Wahrnehmung der Umwelt
- Verhaltenssteuerung
- Beeinflussung der Umwelt



Architekturen zur Verhaltenssteuerung

■ Deliberativ

- Sense-plan-act
- Langsam, komplex

■ Reaktiv

- Sense-act
- Schnell, primitiv

■ Hybrid

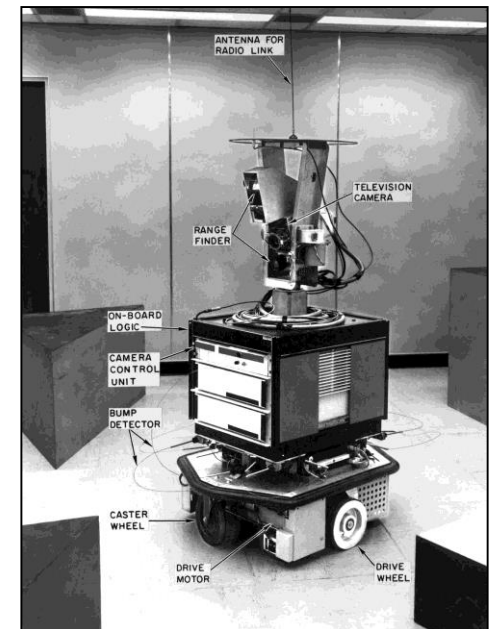
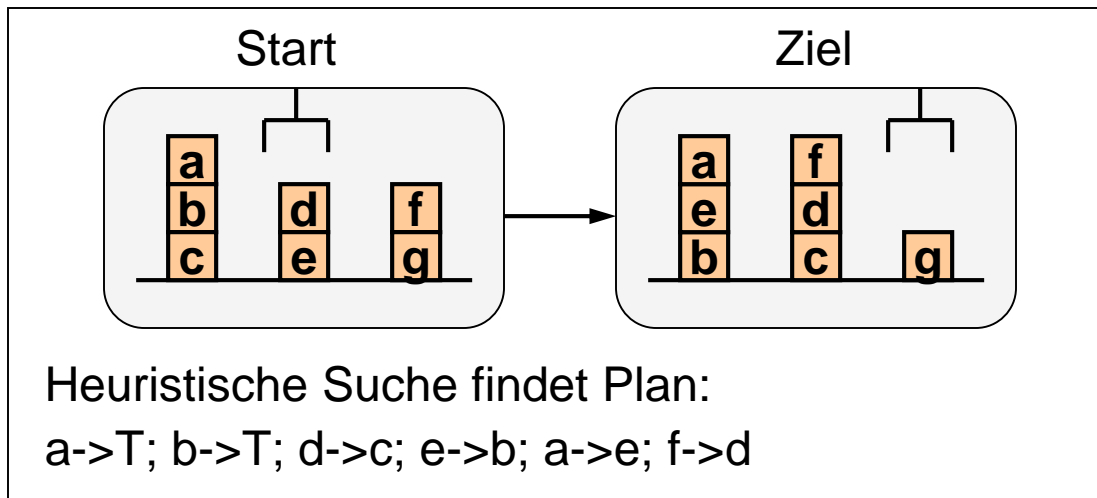
- Deliberative und reaktive Schicht
- Eventuell Zwischenschicht

■ Verhaltensbasiert

- Mehrere einfache Verhalten
- Aktivierung situationsabhängig

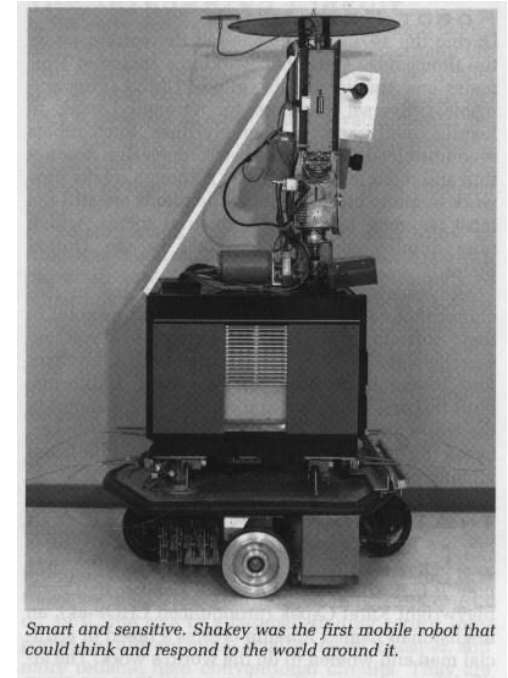
Deliberative Verhaltenssteuerung

- Erstellung eines kompletten Weltmodells
- Planen von Start zum Ziel
- Ausführung des Plans
- Beispiele: Blockswelt, Shakey

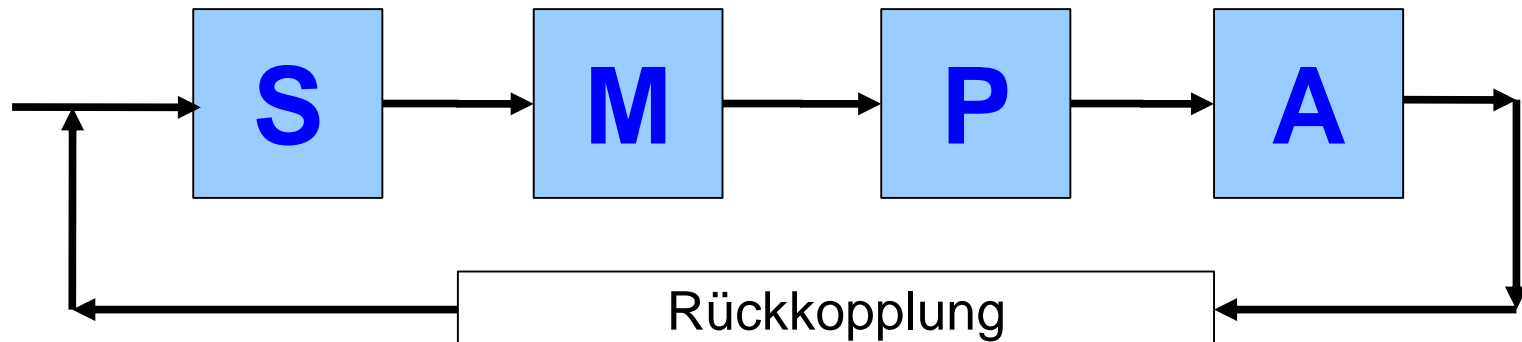


SMPA Architektur

- Steuerung in vier funktionale Blöcke unterteilt, die als Sequenz abgearbeitet werden
- Erstes Beispiel: Shakey, Stanford 1969 STRIPS-Planer in Block-Welt

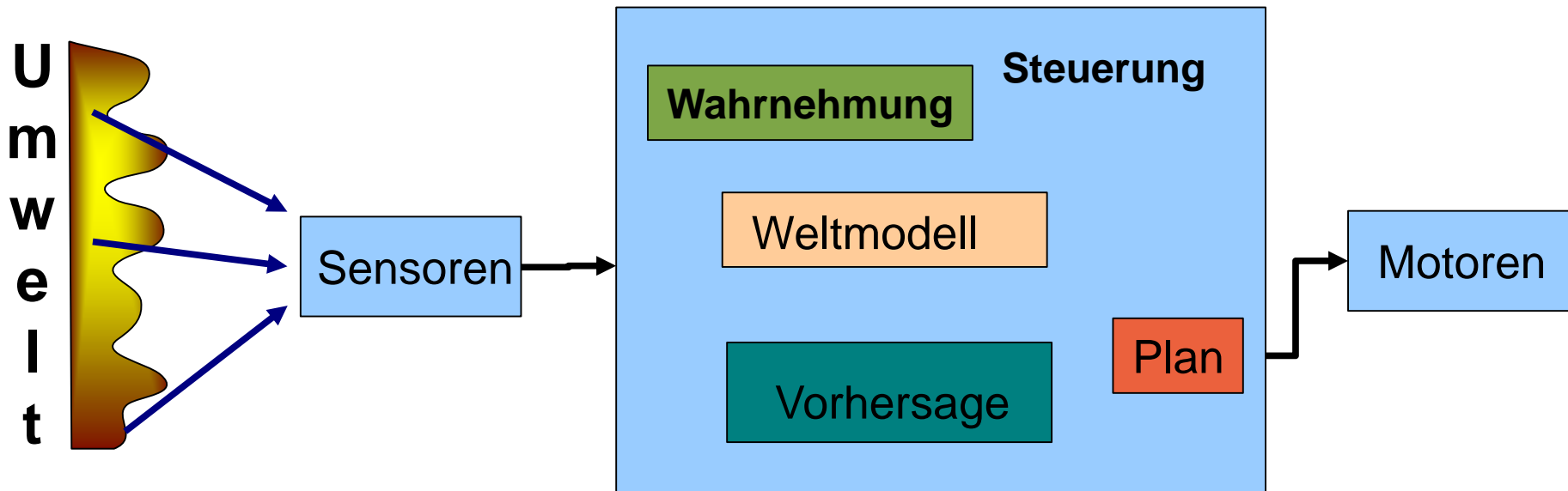


Sense – **M**odel – **P**lan – **A**ct



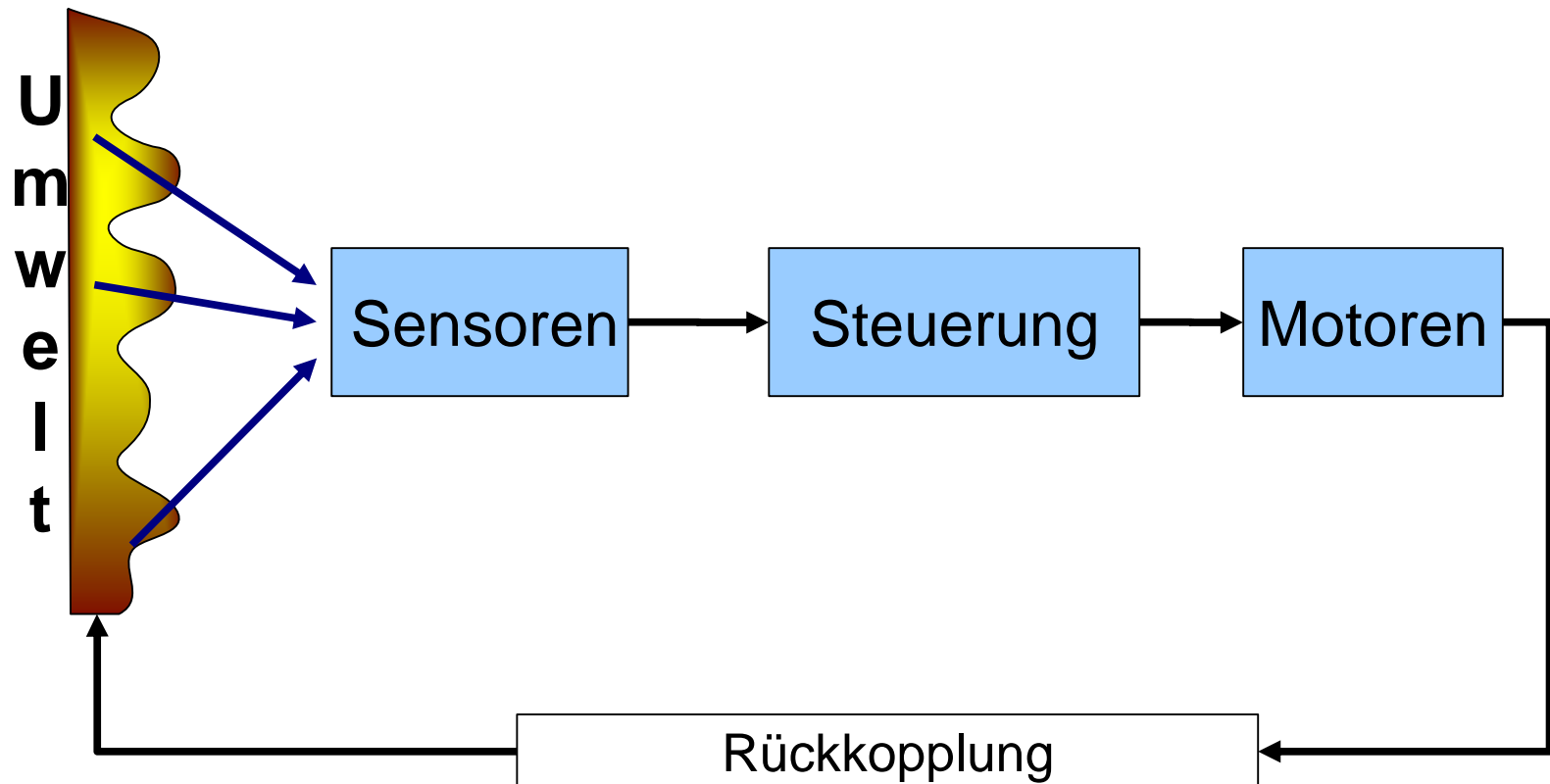
Verhaltensplanung

- Nutzt internes Modell von Umwelt und Roboter um die nächsten Aktionen zu bestimmen
- Zielgerichtet
- Plan = Aktionsfolge zur Erreichung des Ziels
- Vorhersage zukünftiger Zustände (Umwelt, Roboter) nötig



Reaktive Verhaltenssteuerung

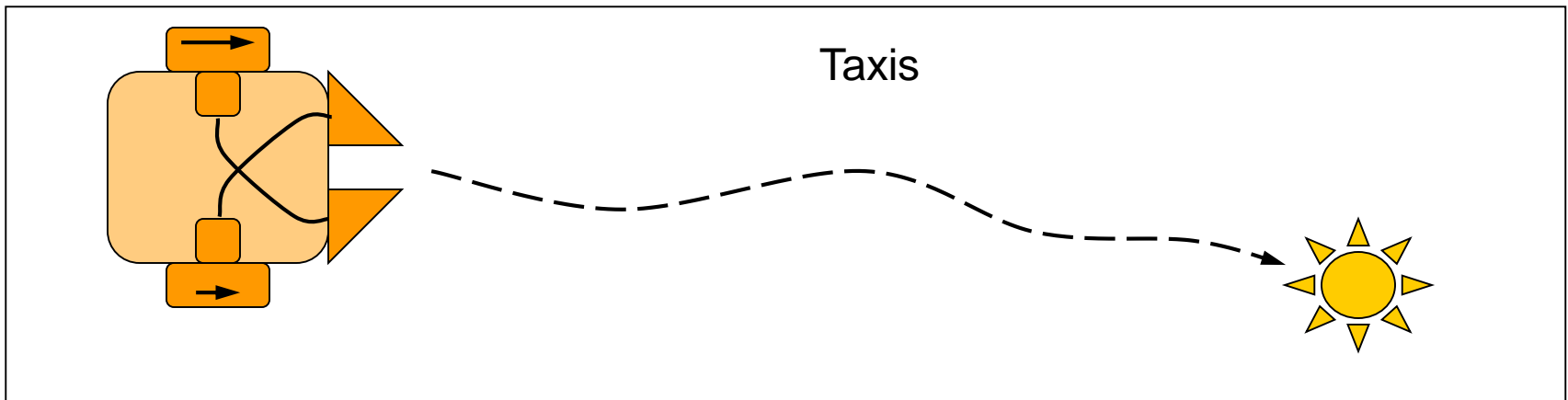
- Direkte Abbildung von Sensorwerten auf Motorwerte



Reaktive Verhaltenssteuerung

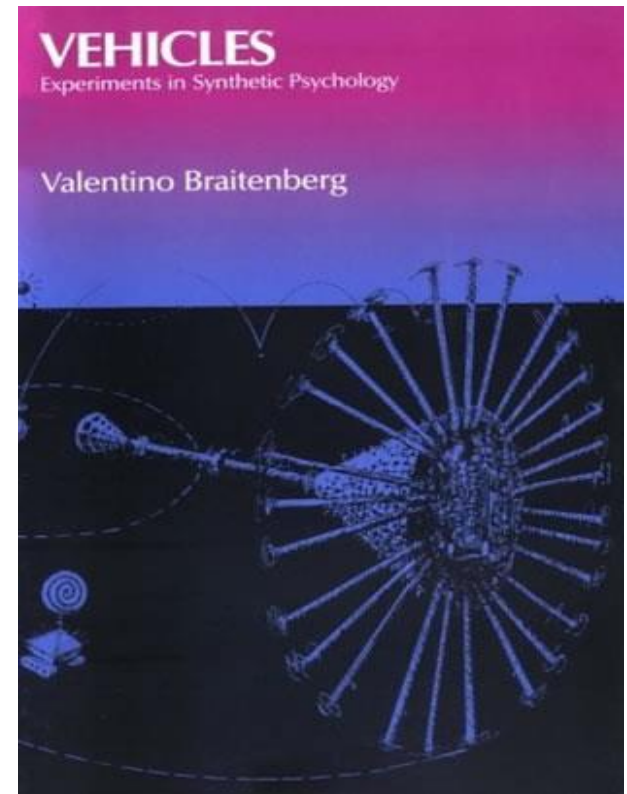
- Kein Weltmodell
- Kein Plan
- Direkte Kopplung von Sensoren und Aktuatoren
- Beispiel: Braitenberg-Vehikel

Valentino Braitenberg 1984



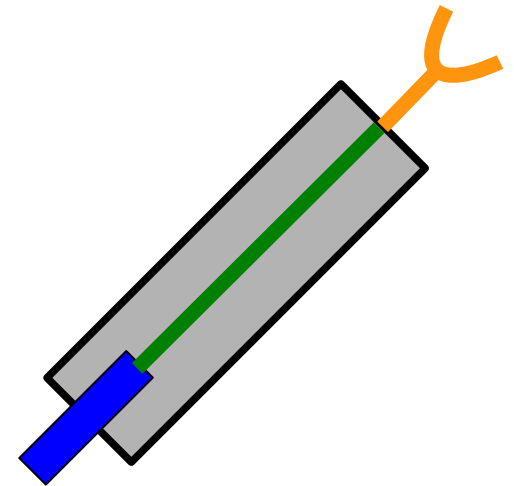
Braitenberg-Vehikel

- Valentino Braitenberg, 1984:
„Vehicles: Experiments in Synthetic Psychology“
 - Einfache „Roboter“
 - Rein reaktiv
 - Zeigen komplexes Verhalten



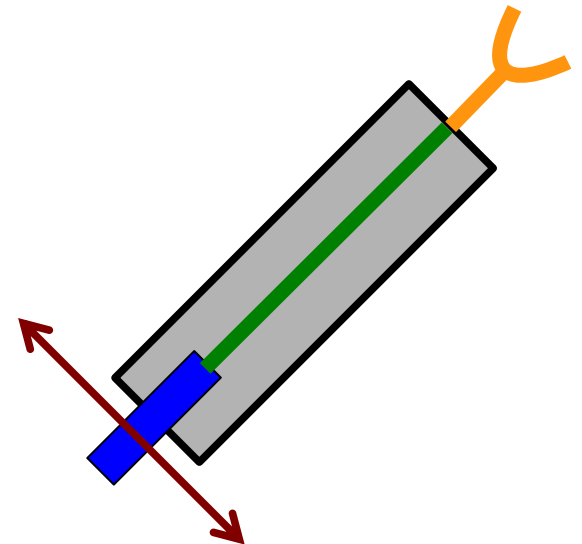
Typ 1 Braitenberg-Vehikel

- Das einfachste Braitenberg Vehikel ist vom Typ 1:
 - Vehikel 1 hat genau **einen Sensor** und **einen Motor**.
 - Die **Verbindung** dazwischen ist sehr einfach aufgebaut:
„**Je mehr** von dem, worauf der **Sensor** reagiert vorhanden ist, desto **schneller** bewegt sich der **Motor**“
-
- Der Wert den der Sensor aus der Umgebung aufnimmt kontrolliert die Aktivität des Motors.
 - Das Vehikel bewegt sich dadurch langsamer oder schneller in Abhängigkeit von der Umwelt.



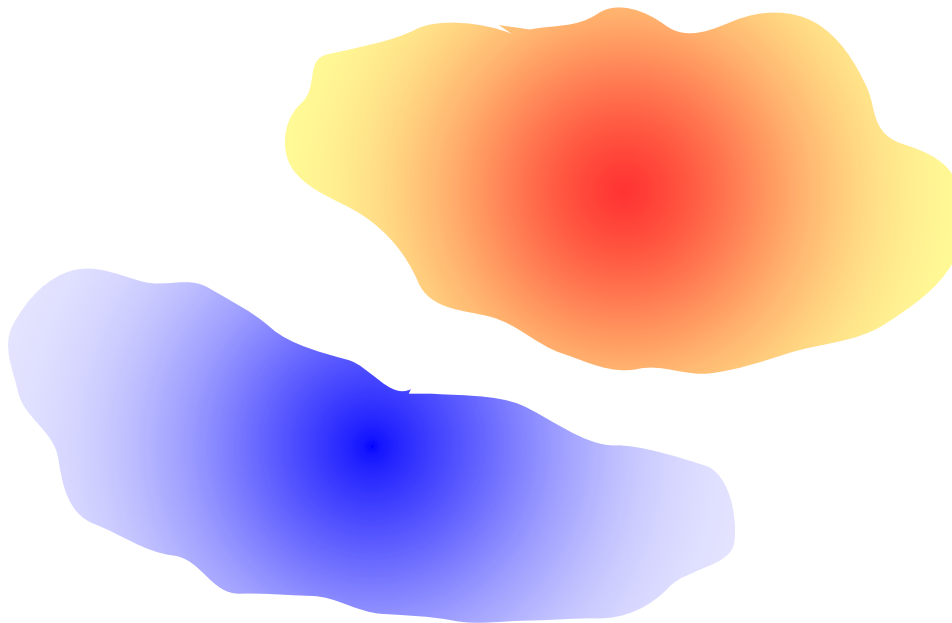
Typ 1 Braitenberg-Vehikel

- Immer nur geradeaus fahren wird auf die Dauer langweilig, selbst wenn verschiedene Geschwindigkeiten erlaubt sind.
- In einem realen System werden aber immer kleinere Störungen auftreten, z.B. durch die mechanische Konstruktion oder Unebenheiten im Untergrund. Dadurch wird das Vehikel leicht von der Geradeaus-Richtung abweichen können.
- Diese zusätzliche stochastische Komponente sorgt schon für neues und interessantes Verhalten.



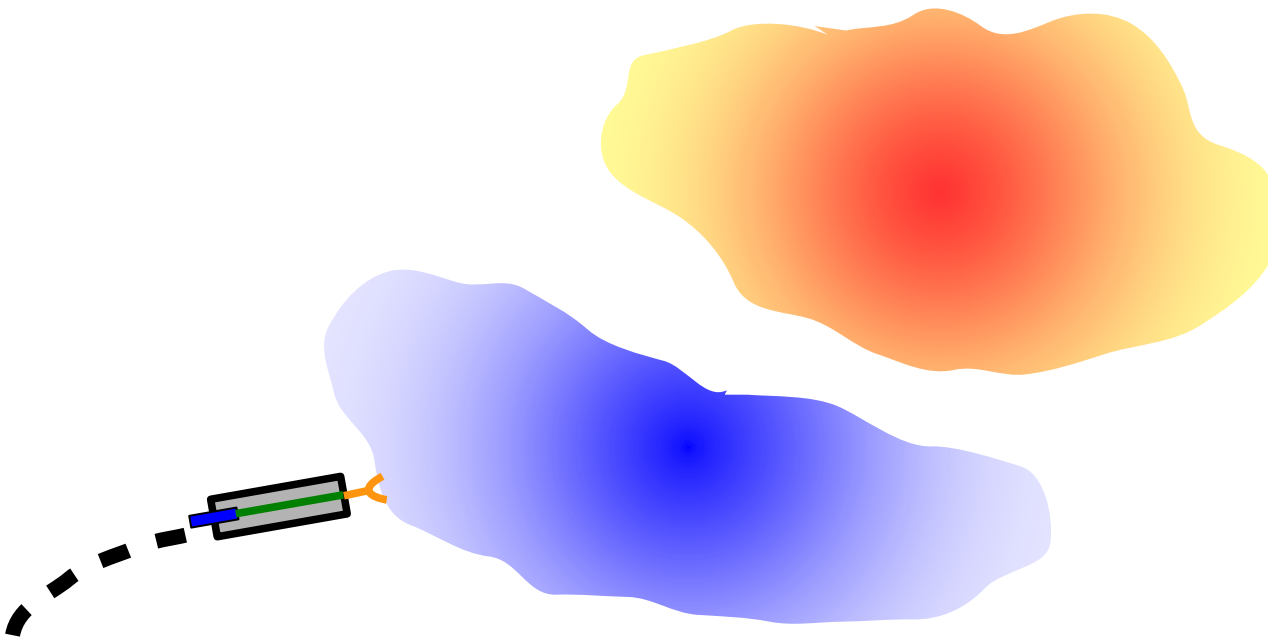
Typ 1 Braitenberg-Vehikel

- Wärme-Sensor: In warmen Gebieten fährt das Vehikel schneller, und in kalten Gebieten dann wieder langsamer. Dadurch bleibt es länger im Kalten.



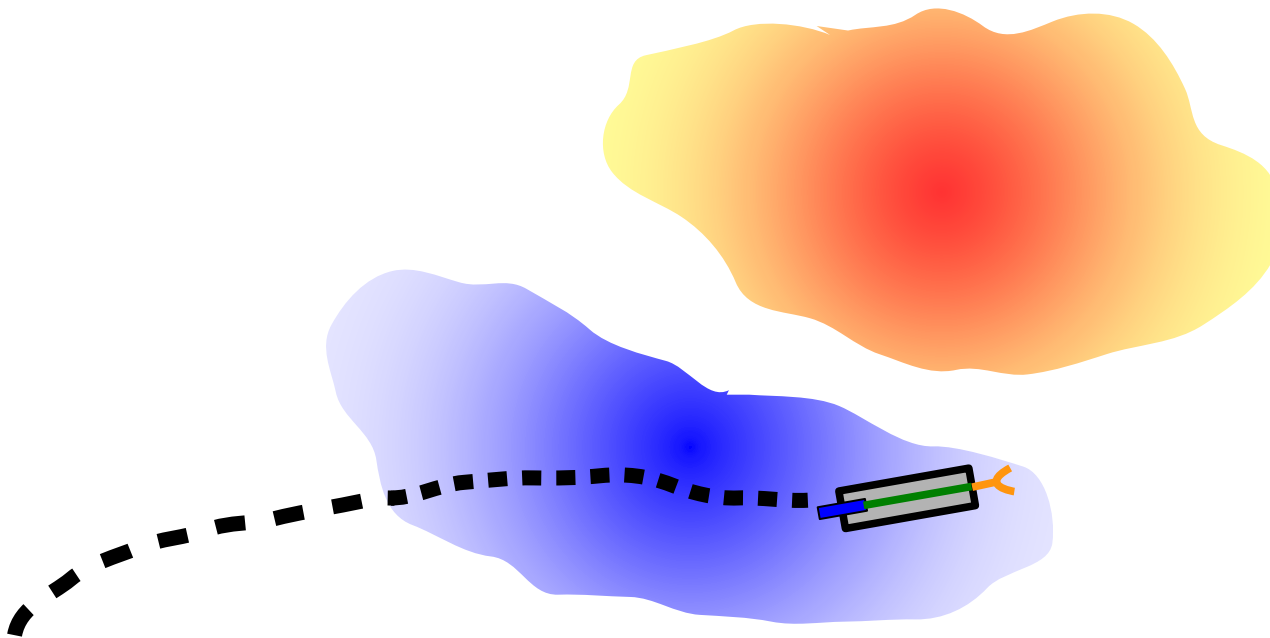
Typ 1 Braitenberg-Vehikel

- Wärme-Sensor: In warmen Gebieten fährt das Vehikel schneller, und in kalten Gebieten dann wieder langsamer. Dadurch bleibt es länger im Kalten.



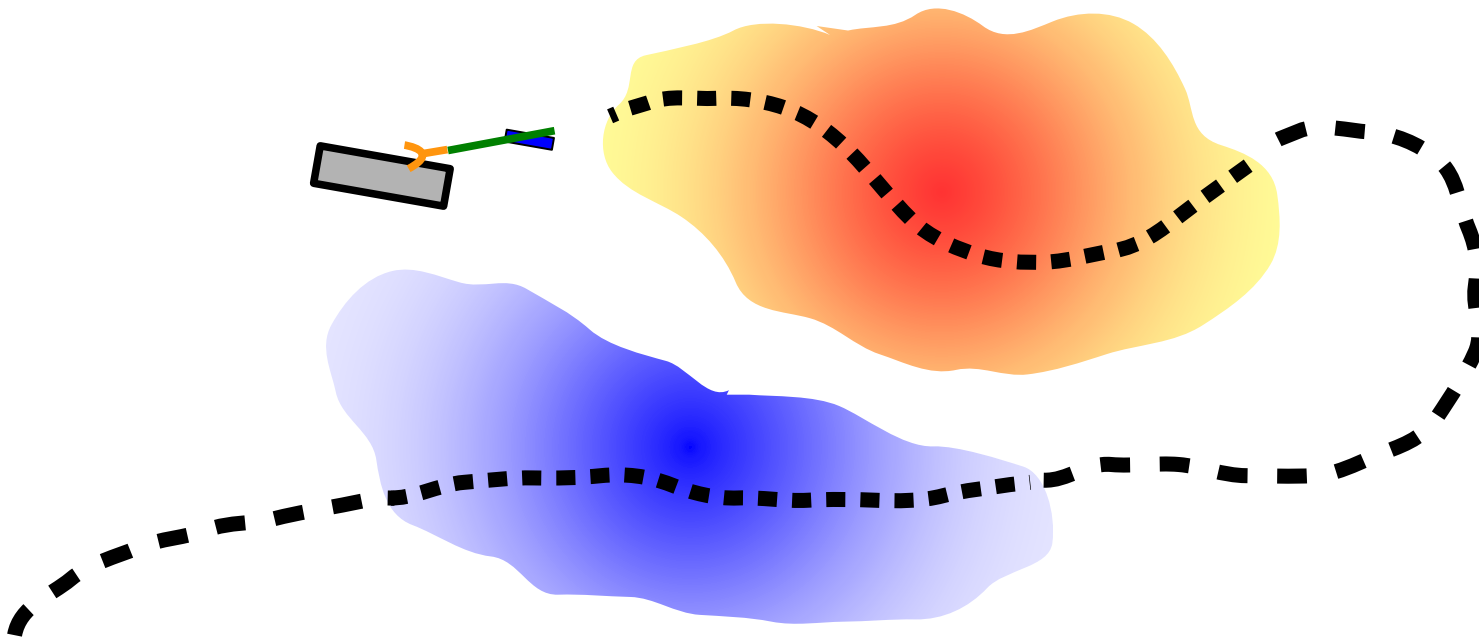
Typ 1 Braitenberg-Vehikel

- Wärme-Sensor: In warmen Gebieten fährt das Vehikel schneller, und in kalten Gebieten dann wieder langsamer. Dadurch bleibt es länger im Kalten.



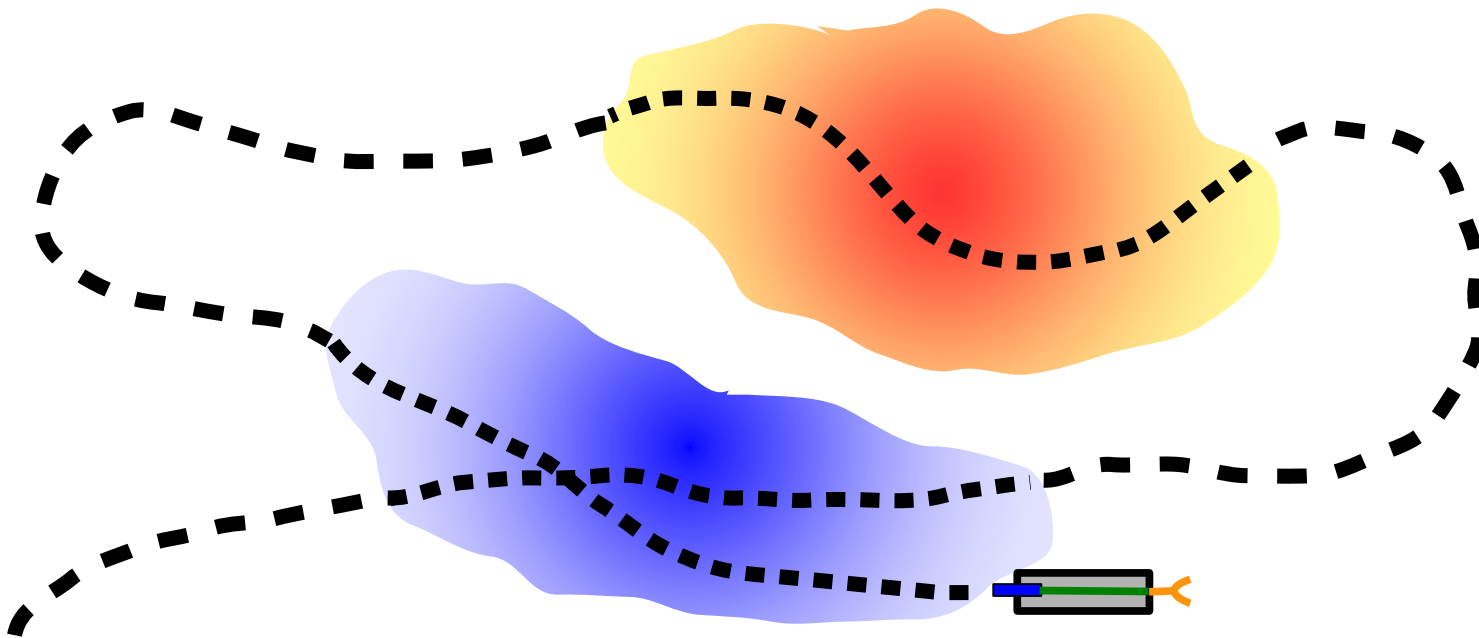
Typ 1 Braitenberg-Vehikel

- Wärme-Sensor: In warmen Gebieten fährt das Vehikel schneller, und in kalten Gebieten dann wieder langsamer. Dadurch bleibt es länger im Kalten.



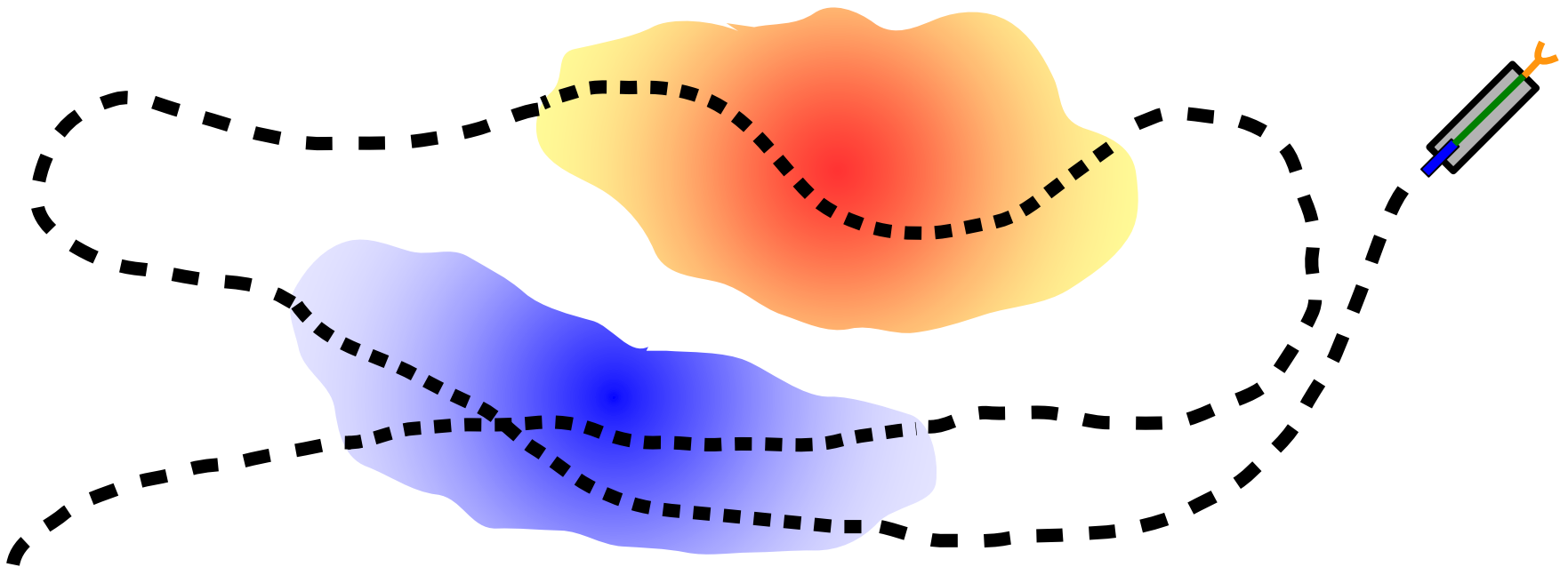
Typ 1 Braitenberg-Vehikel

- Wärme-Sensor: In warmen Gebieten fährt das Vehikel schneller, und in kalten Gebieten dann wieder langsamer. Dadurch bleibt es länger im Kalten.



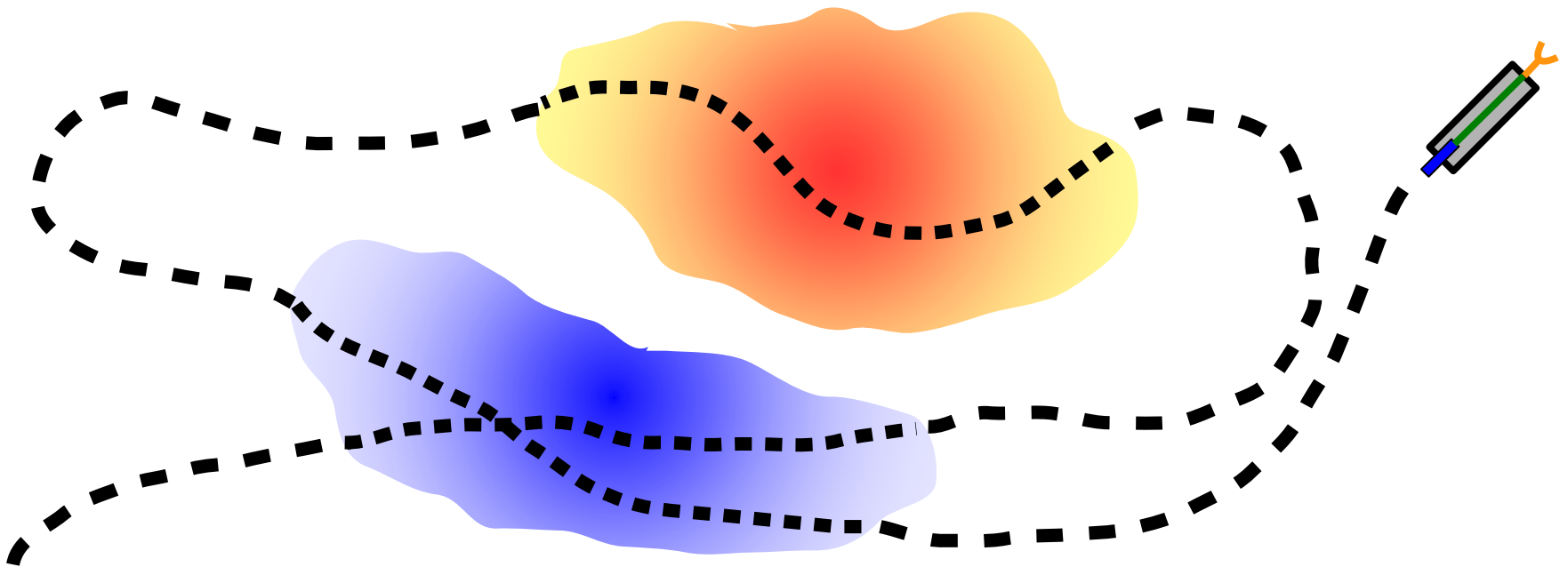
Typ 1 Braitenberg-Vehikel

- Wärme-Sensor: In warmen Gebieten fährt das Vehikel schneller, und in kalten Gebieten dann wieder langsamer. Dadurch bleibt es länger im Kalten.



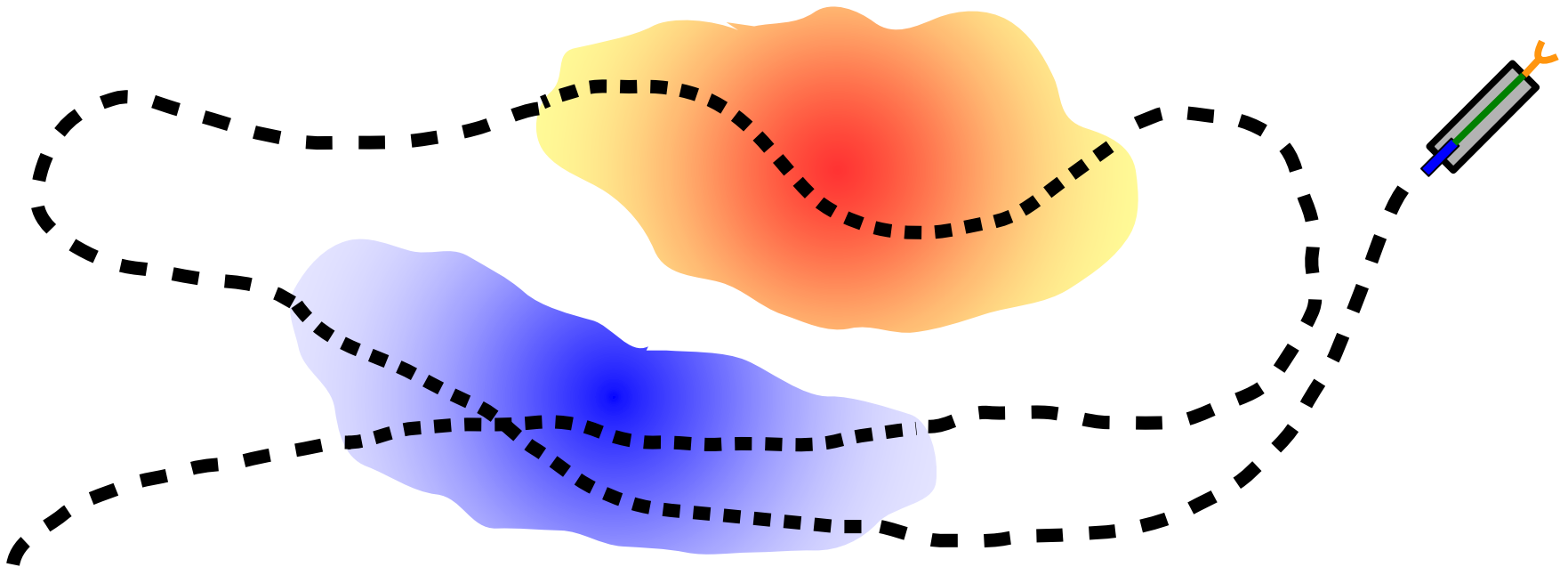
Typ 1 Braitenberg-Vehikel

- Wärme-Sensor: In warmen Gebieten fährt das Vehikel schneller, und in kalten Gebieten dann wieder langsamer. Dadurch bleibt es länger im Kalten.



Typ 1 Braitenberg-Vehikel

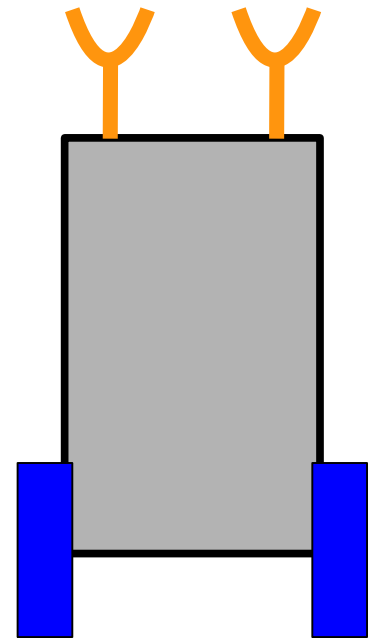
- Wärme-Sensor: In warmen Gebieten fährt das Vehikel schneller, und in kalten Gebieten dann wieder langsamer. Dadurch bleibt es länger im Kalten.
- Von „**Außen**“ sieht es so aus, als ob das Vehikel kalte Gebiete „**liebt**“, und warme Gebiete „**verabscheut**“.



Typ 2 Braitenberg-Vehikel

- Das nächste Braitenberg-Vehikel ist etwas komplizierter.
- „Vehikel 2 ist im Prinzip ähnlich zu Vehikel 1 nur hat es **zwei Sensoren**, einen auf jeder Seite vorne, und **zwei Motoren**, einen links, einen rechts (hinten).“

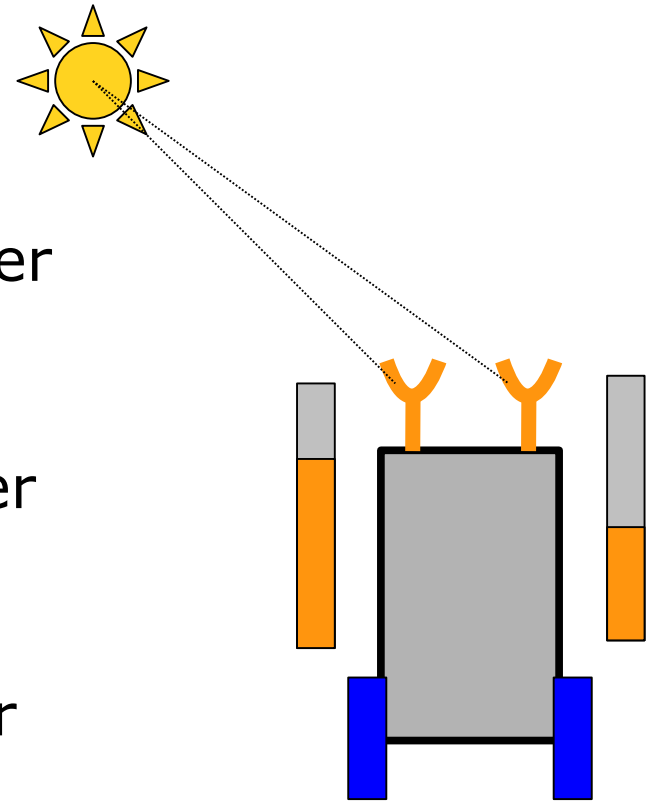
„You may think of it as being a descendant of Vehicle 1, through some incomplete process of biological reduplication: two of the earlier brand stuck together side by side. Again, the more the sensors are excited (+), the faster the motors run.“



Aus: V.Braitenberg, 1984: Vehicles: Experiments in Synthetic Psychology, Kapitel 2: Vehicle 2: Fear and Agression, Seite 6

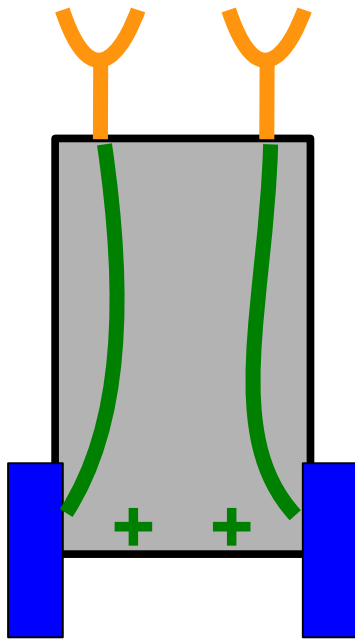
Typ 2 Braitenberg-Vehikel

- Nehmen wir an, der **Sensor** liefert einen Wert proportional zur Beleuchtung (Lichtsensoren).
- Nehmen wir weiter an, dass die Lichtquelle das Licht entsprechend der physikalischen Gesetze aussendet.
- Dann wird weniger Licht am **Sensor** ankommen, wenn der Abstand größer ist.
- Im Beispiel wird der rechte Sensor also weniger Licht bekommen als der linke Sensor.

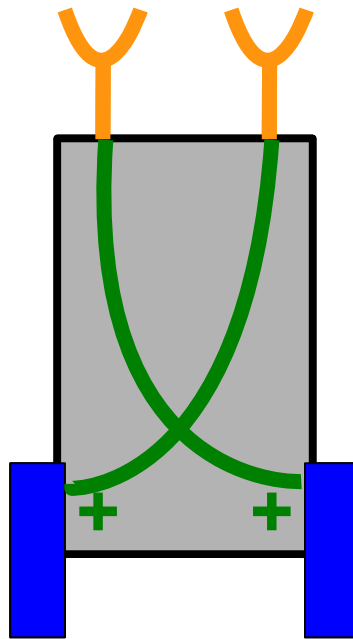


Typ 2 Braitenberg-Vehikel

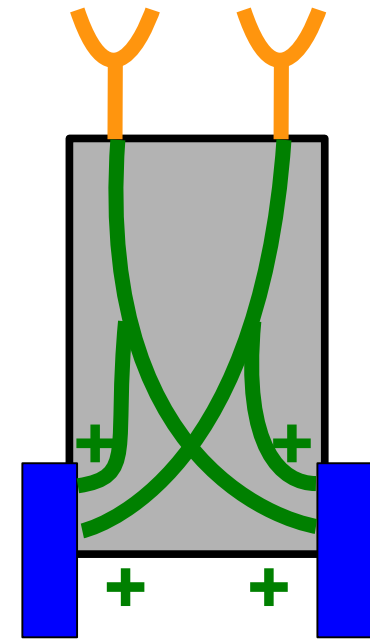
- Typ 2 Braitenberg-Vehikel haben **positive Verbindungen** **+** zwischen **Sensoren** und **Motoren**. Sie unterscheiden sich in der Art wie die Verbindungen laufen.



Typ 2a



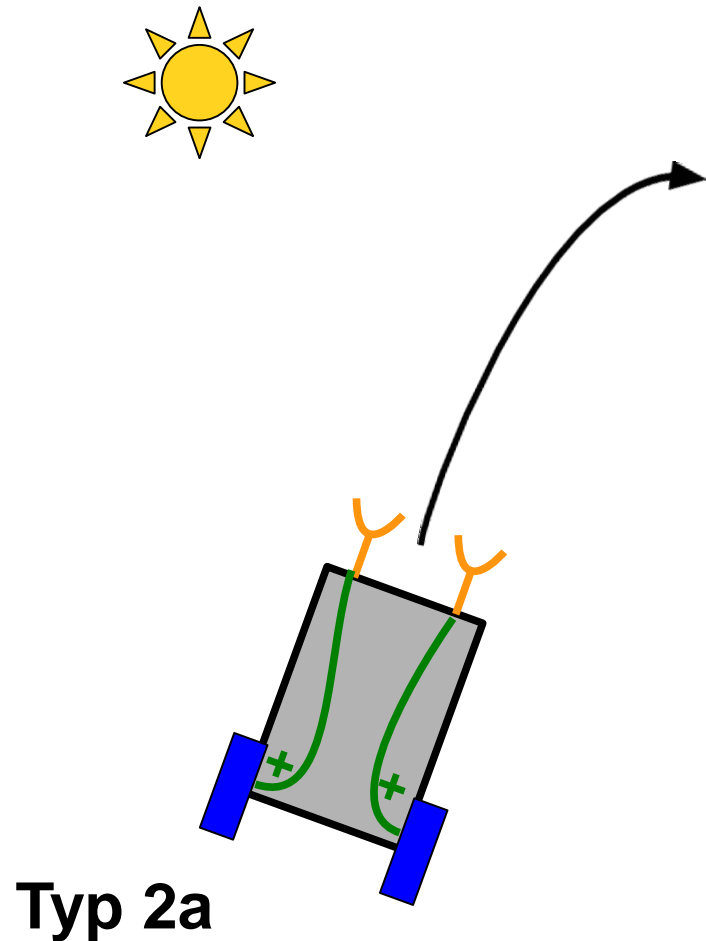
Typ 2b



Typ 2c

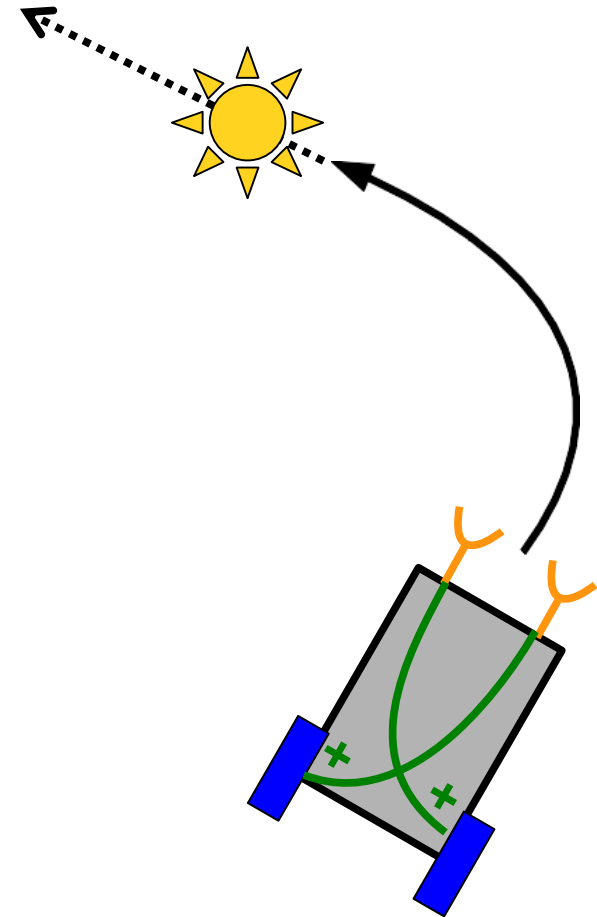
Typ 2a Braitenberg-Vehikel

- Typ 2a-Vehikel werden vom Licht wegfahren.
- Je weiter sie vom Licht weg sind, desto langsamer werden sie.
- Anhalten werden sie dann, wenn das Licht nicht mehr zu „sehen“ ist.



Typ 2b Braitenberg-Vehikel

- Typ 2b-Vehikel werden auf die Lichtquelle zu fahren, (fast) egal wo sie vorher standen.
- Sie werden dabei schneller.
- Es kann sein, dass sie dabei die Lichtquelle treffen, oder aber unter ihr hindurch fahren.

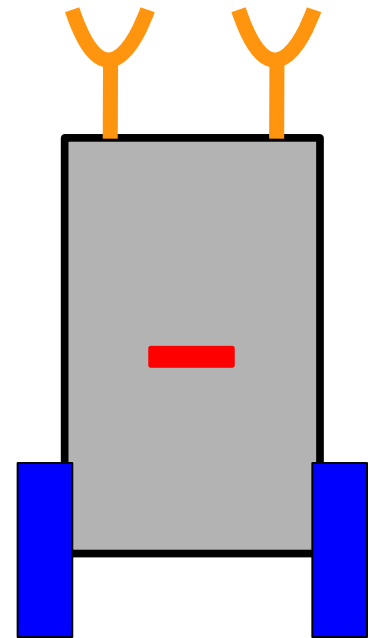


Typ 2b

Typ 3a, 3b Braitenberg-Vehikel

- Typ 3a und 3b Braitenberg Vehikel haben beinahe die gleiche Struktur wie Typ 2, sie haben **zwei Sensoren**, und **zwei Motoren**, aber eine veränderte Verschaltung dazwischen.

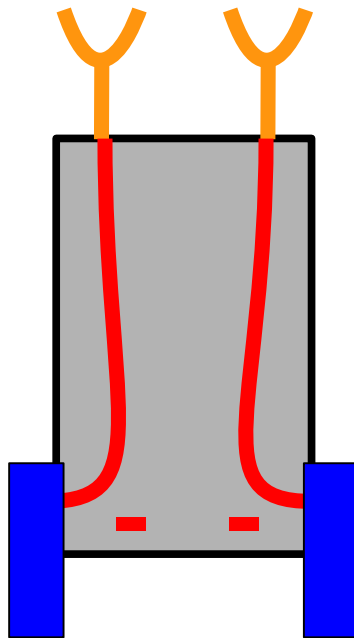
*„What comes to mind is to introduce some inhibition in the **connections** between the **sensors** and the **motors**, switching the sign of the influence from **positive** to **negative**. This will make the motor slow down when the corresponding sensor is activated.“*



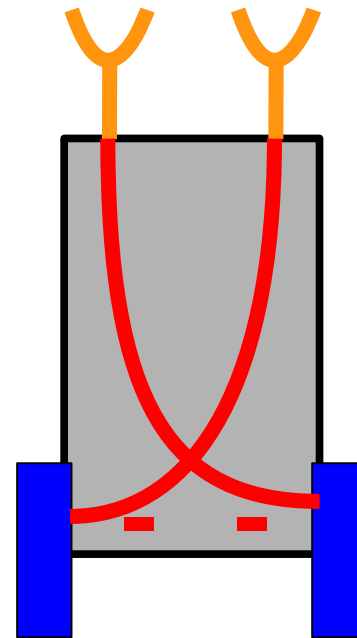
Aus: V.Braitenberg, 1984: Vehicles: Experiments in Synthetic Psychology
Kapitel 3: Vehicle 3: Love, Seite 10

Typ 3a, 3b Braitenberg-Vehikel

- Braitenberg Vehikel vom Typ 3a und 3b haben **negative** oder **hemmende Verbindungen** zwischen den **Sensoren** und den **Motoren**.



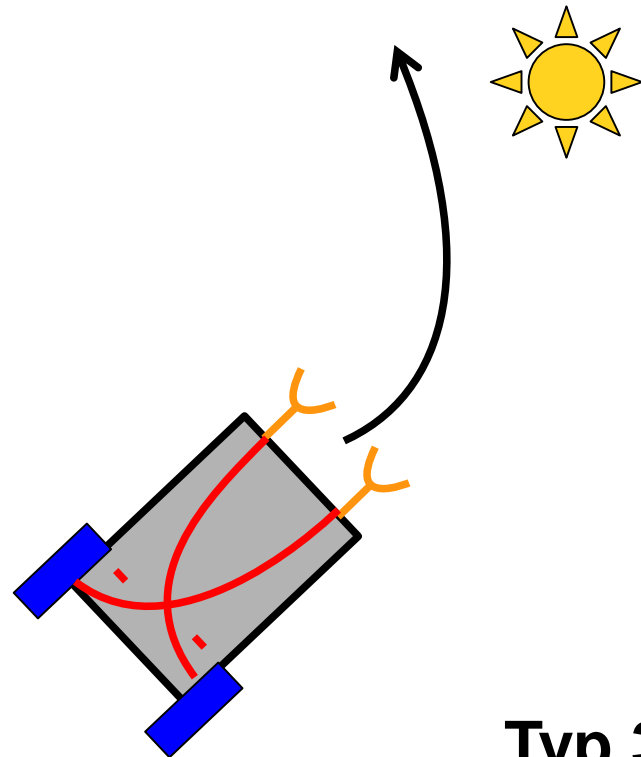
Typ 3a



Typ 3b

Typ 3b Braitenberg-Vehikel

- Typ 3b-Vehikel drehen sich vom Licht weg, fahren dann aber beinahe in „Zeitlupe“ daran vorbei.
- Sobald sie das Licht passiert haben und sich vom Licht abwenden, werden sie schneller und schneller, und können dabei den Bereich sogar völlig verlassen.

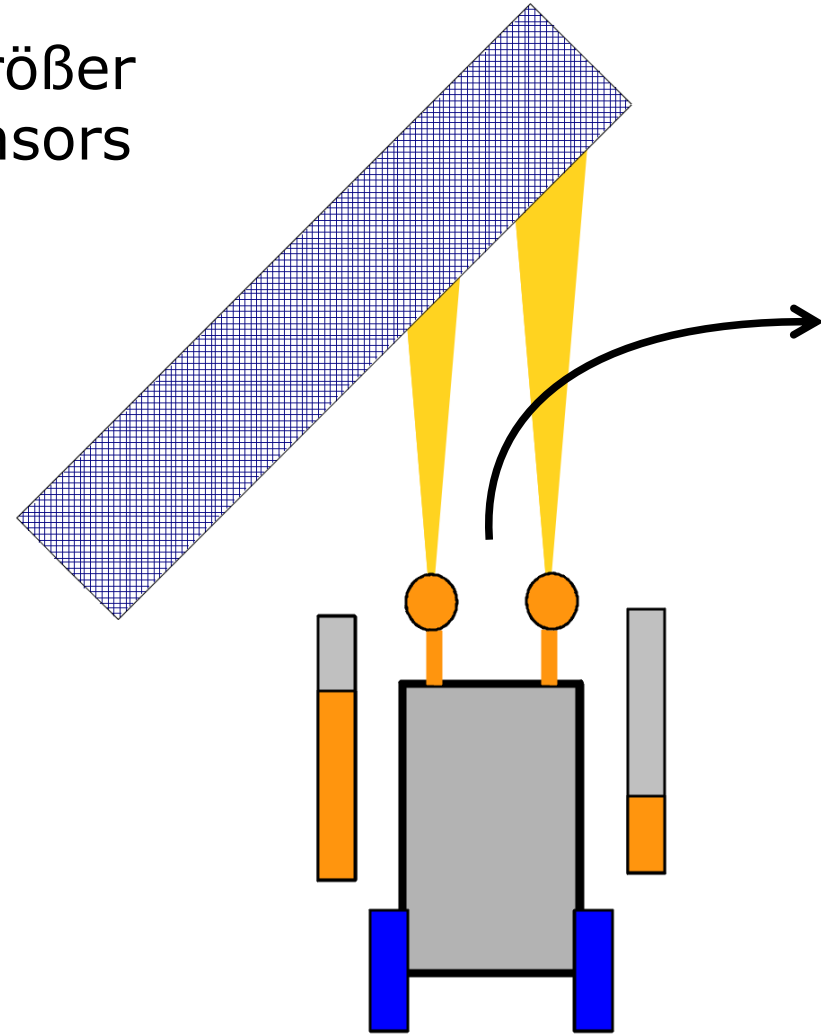
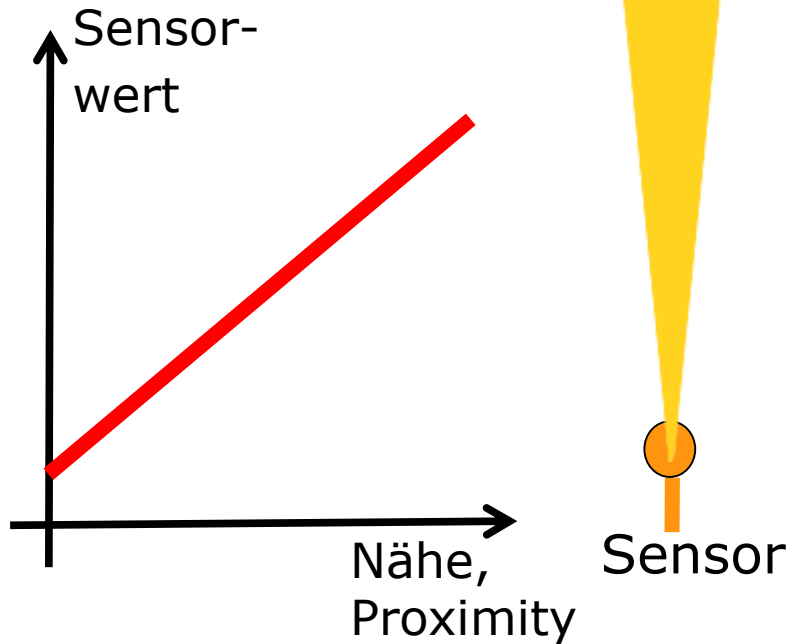


Typ 3b Braitenberg-Hindernisvermeidung

- Typ 3b Braitenberg-Vehikel sind die bekanntesten Braitenberg Vehikel; insbesondere in der Robotik sind viele Implementationen davon zu finden.
- Verändern wir die Sensormodalität von einem Lichtsensor zu einem (proximity-)Sensor der die Nähe zu einem Objekt misst, dann haben wir direkt eine Hindernisvermeidung gebaut.
- Achtung: Ein Proximity-Sensor ist KEIN Abstandssensor.
- Je näher ein Objekt ist, desto höher ist der Wert, den der Sensor ausgibt und desto mehr wird der Motor auf der gegenüberliegenden Seite gehemmt.

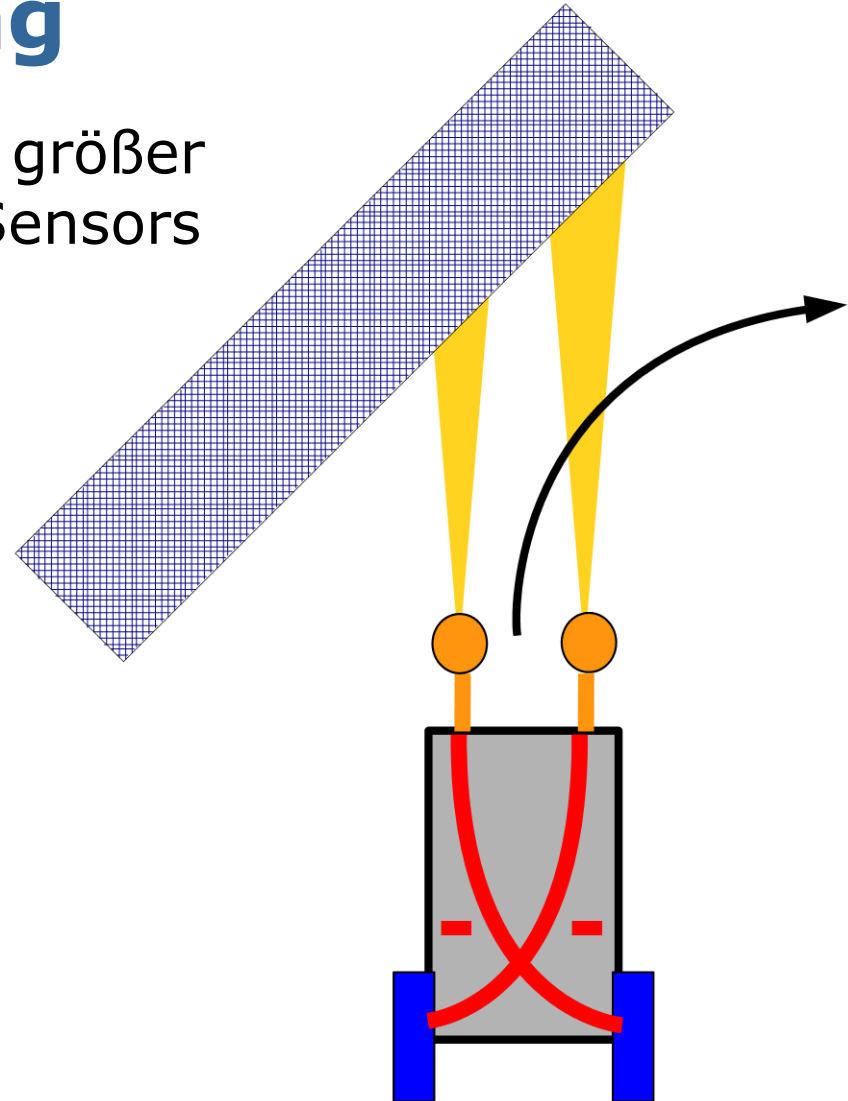
Typ 3b Braitenberg-Hindernisvermeidung

- Je näher ein Objekt ist, desto größer wird der Wert des Proximity-Sensors sein.



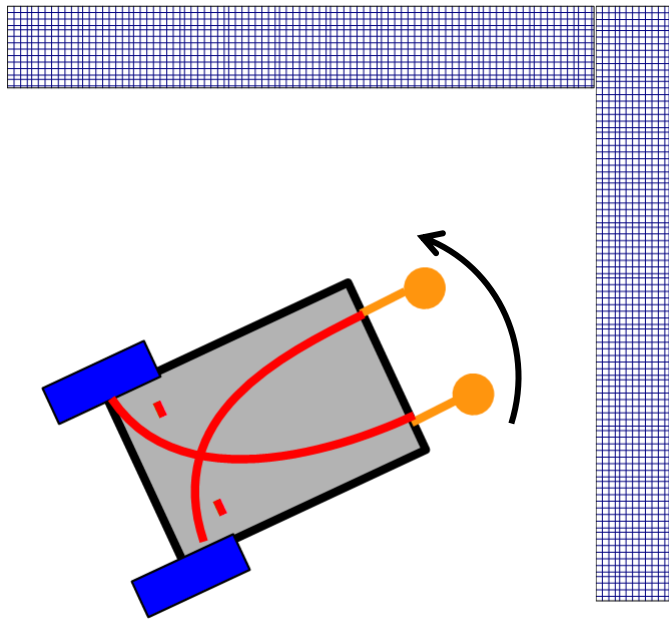
Typ 3b Braitenberg-Hindernisvermeidung

- Je näher ein Objekt ist, desto größer wird der Wert des Proximity-Sensors sein.
- Die **hemmende Verbindung** macht den Motor auf der anderen Seite langsamer, und dreht den Roboter dadurch vom Hindernis weg.
- Braitenberg Typ 3b Hindernis-vermeidung ist sehr beliebt weil sie so einfach zu verstehen und zu implementieren ist.

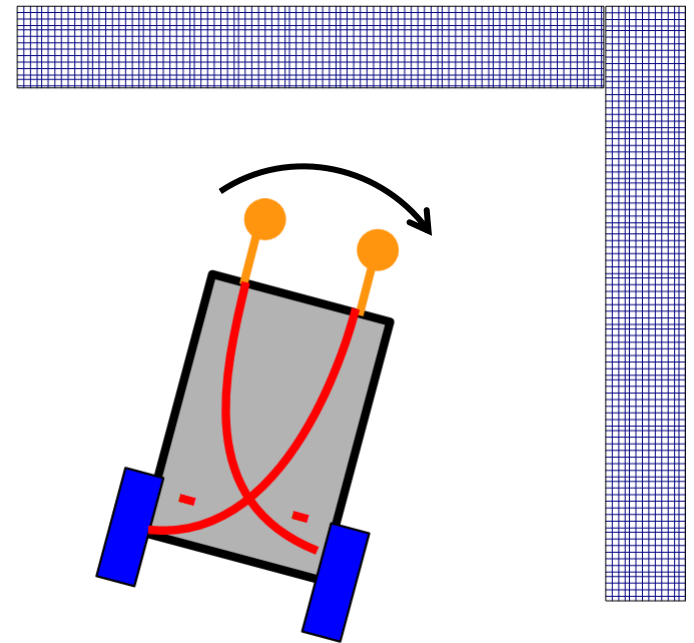


Typ 3b Braitenberg-Hindernisvermeidung

- Problematischer Fall
- Roboter kommt nicht aus der Ecke



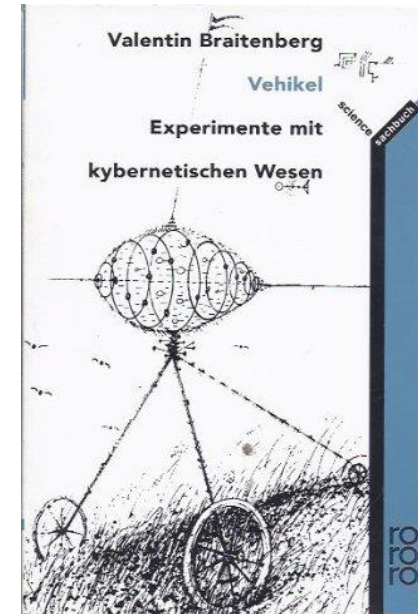
nach links drehen



nach rechts drehen

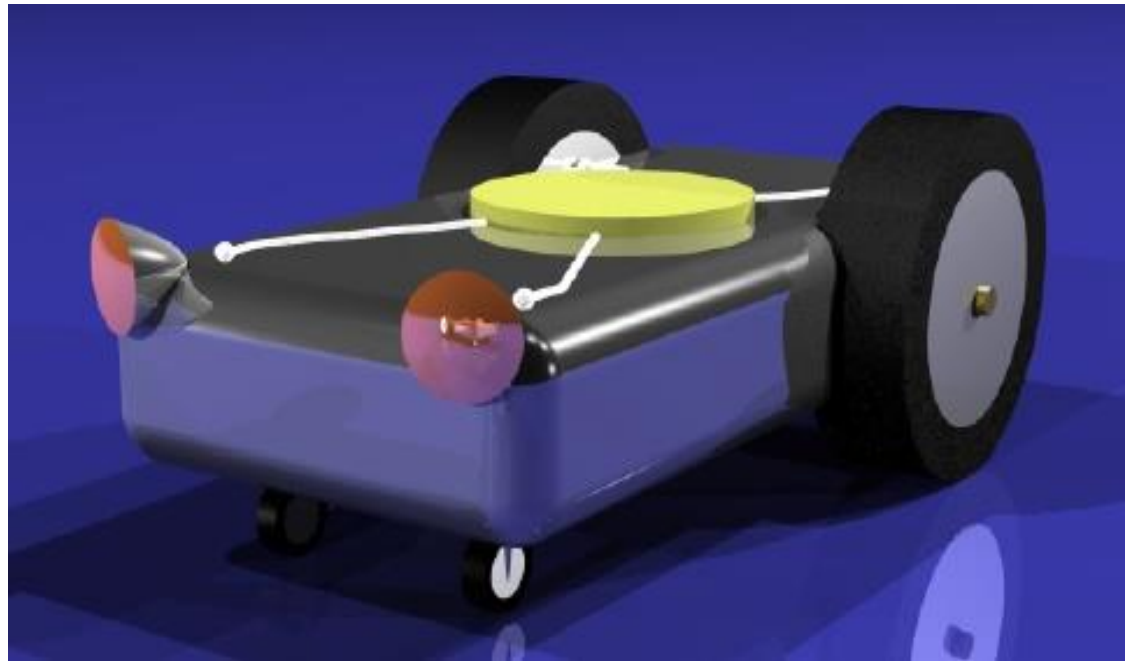
Weitere Braitenberg-Vehikel

- Typen 1, 2, 3, 4: Reaktive Kontrolle
- Typ 5: Interne Zustände, Ketten logischer Elemente.
- Typ 6: Entwurf von Typ 5 Strukturen durch Evolution.
- Typ 7: Lernen der internen Struktur (Mnemotrix).
- Typ 8: Visuelles System und Computer Vision
- Typen 9, 10, 11, 12, 13, 14:
Höhere kognitive Funktionen (Shapes, Getting Ideas, Rules and Regularities, Trains of Thought, Foresight, Egotism and Optimism)



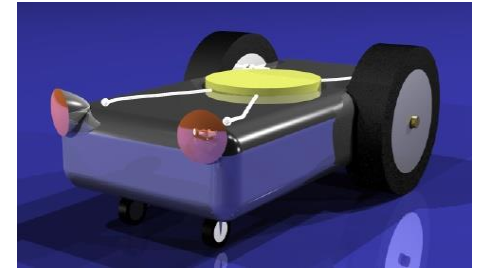
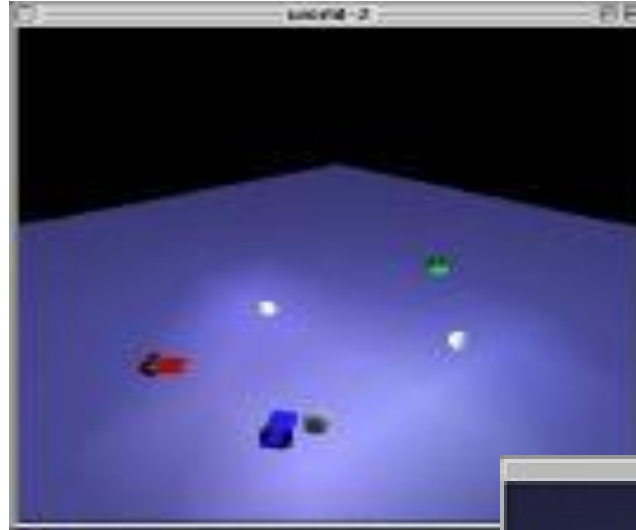
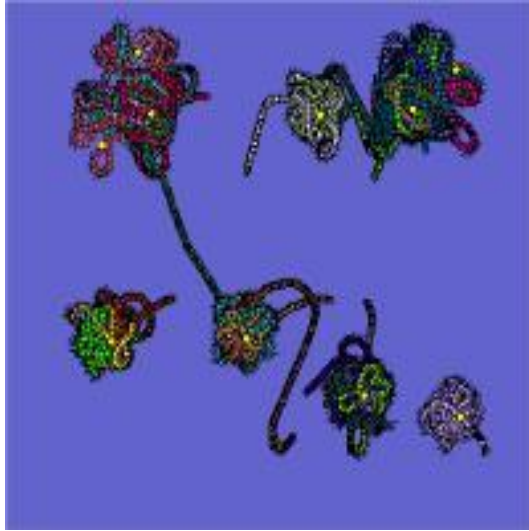
Braitenberg-Vehikel, Implementation

- Seit der Veröffentlichung des Buches durch Valentino Braitenberg 1984 hat es eine Vielzahl von Implementationen zu diesem Ansatz gegeben; in Simulationen und an echten, realen Robotersystemen.



From: <http://people.cs.uchicago.edu/~wiseman/vehicles/>

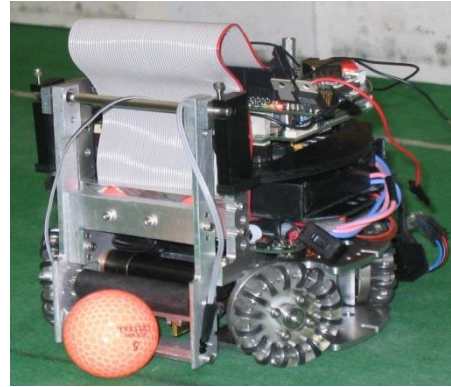
Braitenberg-Vehikel, Implementation



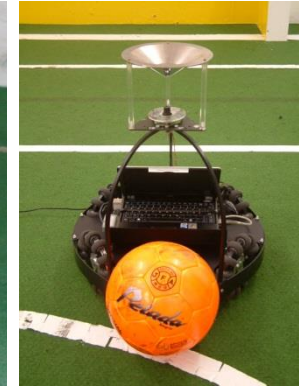
From: <http://people.cs.uchicago.edu/~wiseman/vehicles/>

Omnidirektionale Fahrwerke

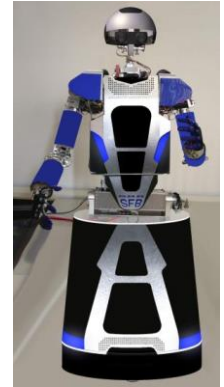
- Geschwindigkeit (x, y, θ) verteilt auf drei oder mehr Räder
- Gute Manövrierbarkeit
- Vorteile in
 - Beengten Situationen
 - Dynamischen Umgebungen



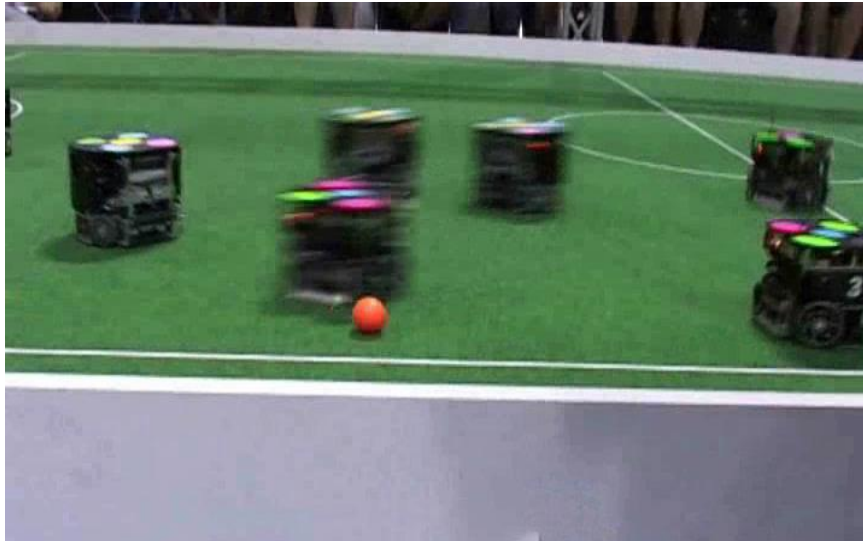
Cornell Big Red



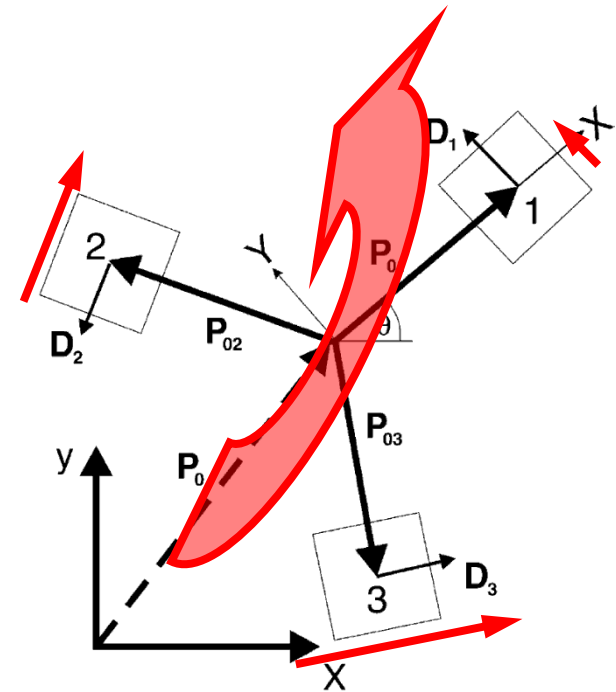
FU-Fighters



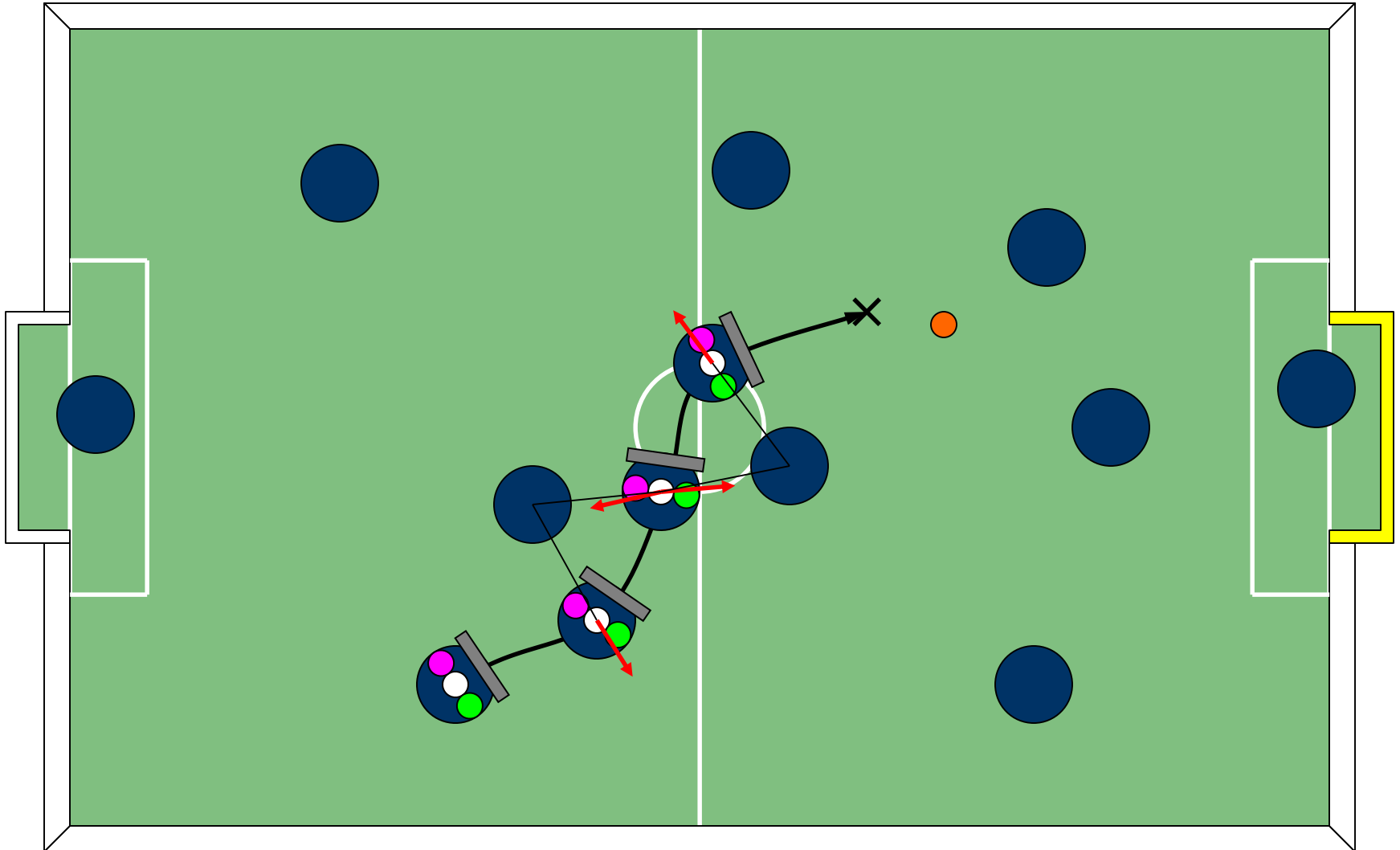
Armar III



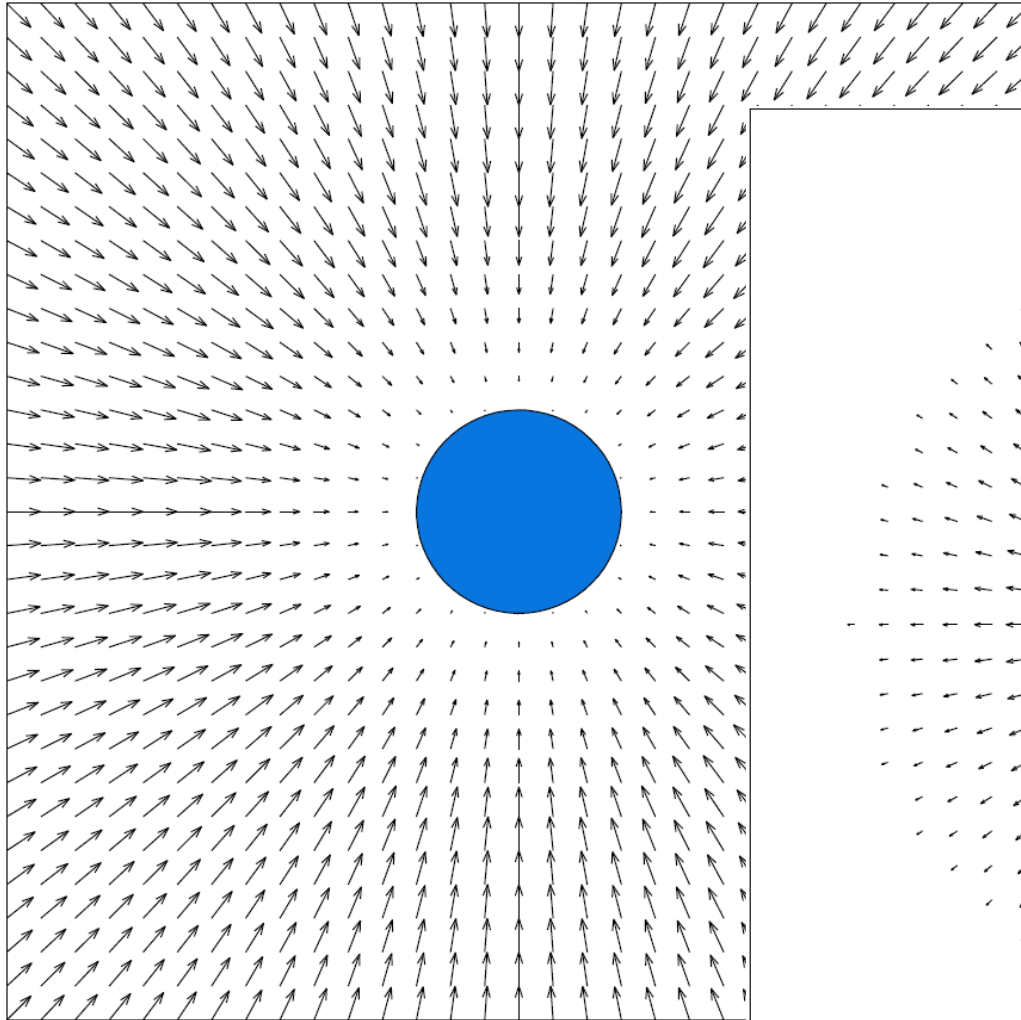
RoboCup
2005



Reaktive Hindernisvermeidung

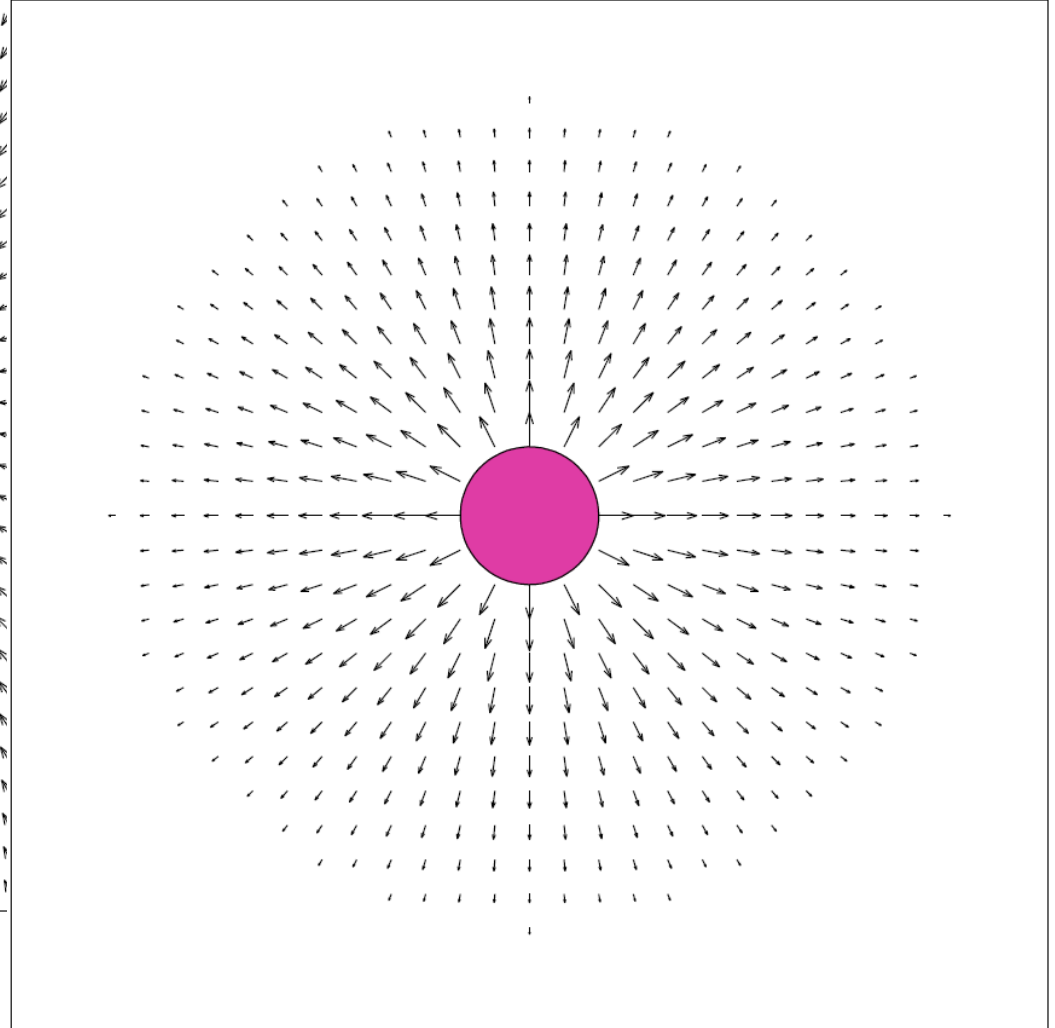


Potentialfelder

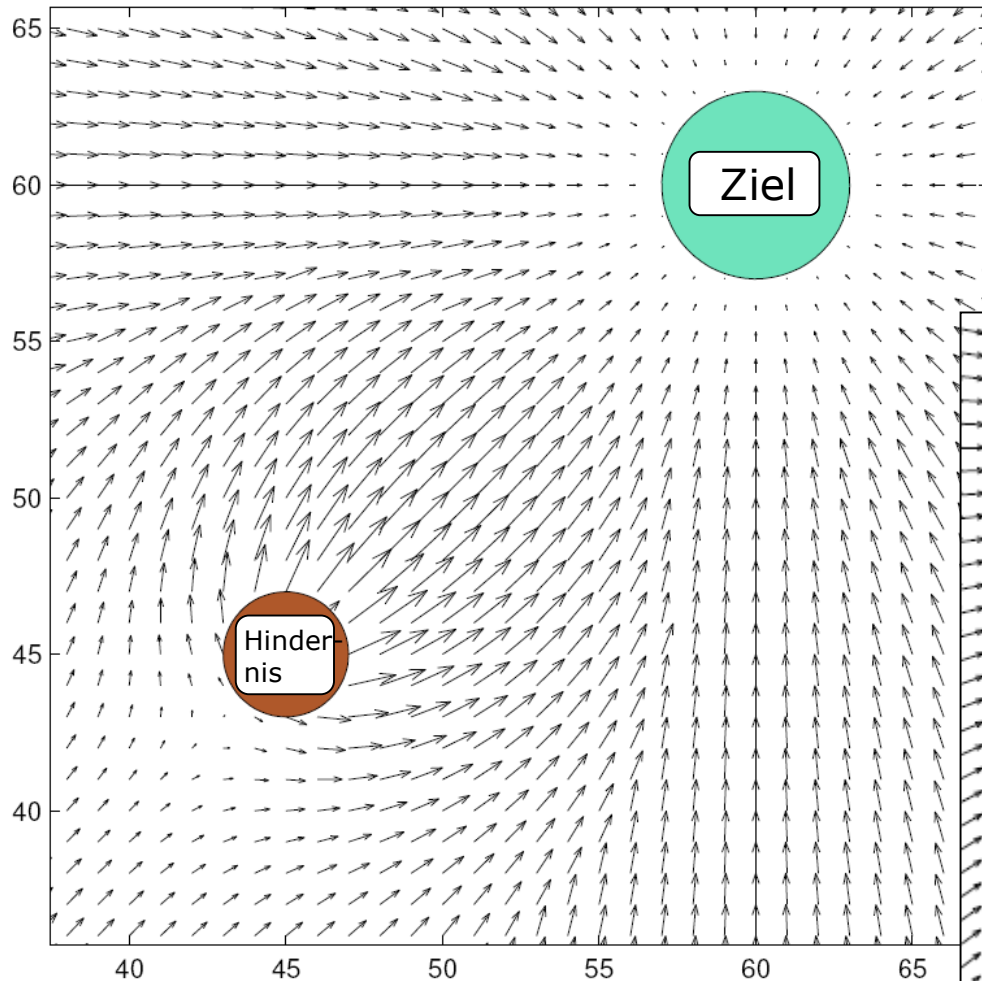


anziehend

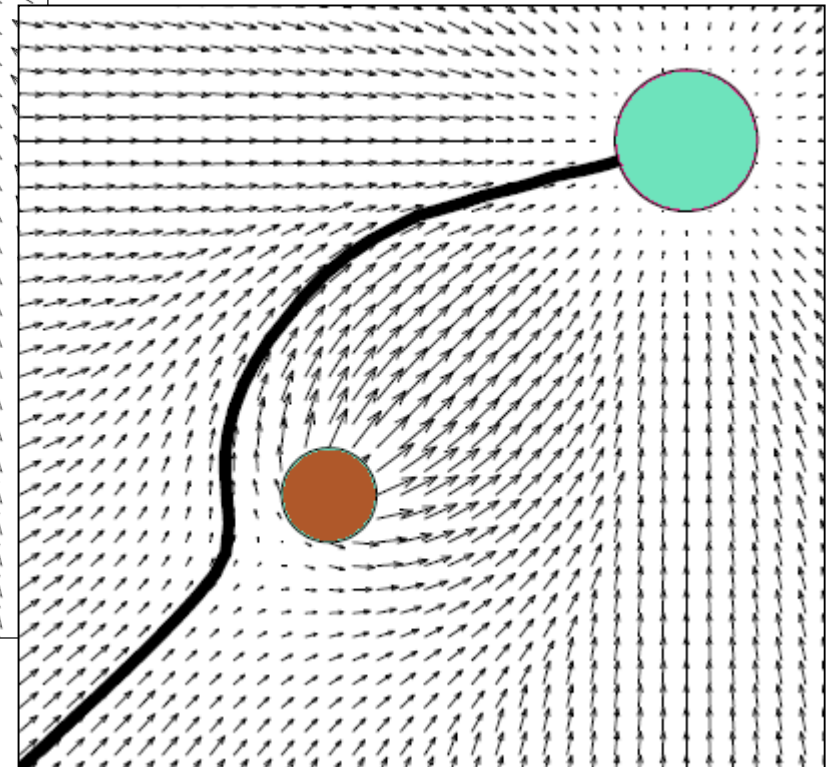
abstoßend



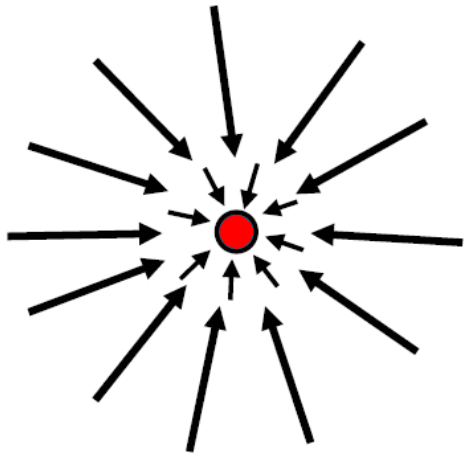
Kombinierte Potentialfelder



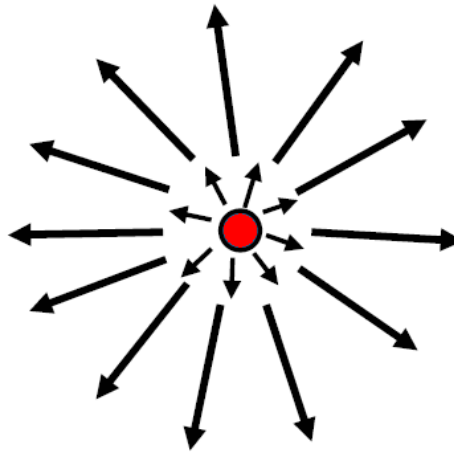
- Additive Kombination
- Bewegung in Pfeilrichtung
- Zum Ziel unter Vermeidung von Hindernissen



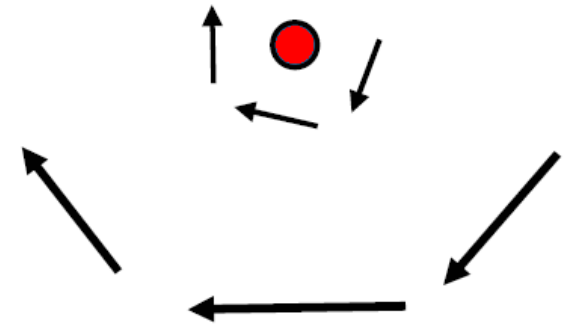
Potentialfeld-Typen



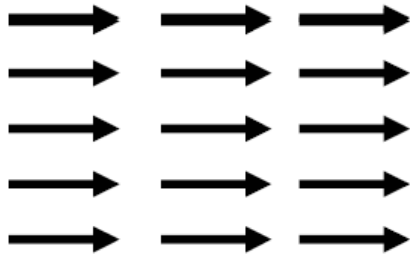
anziehend



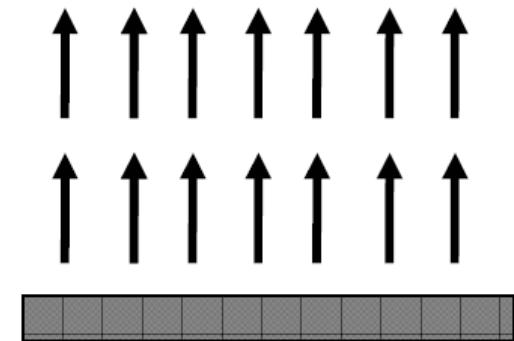
abstoßend



tangential



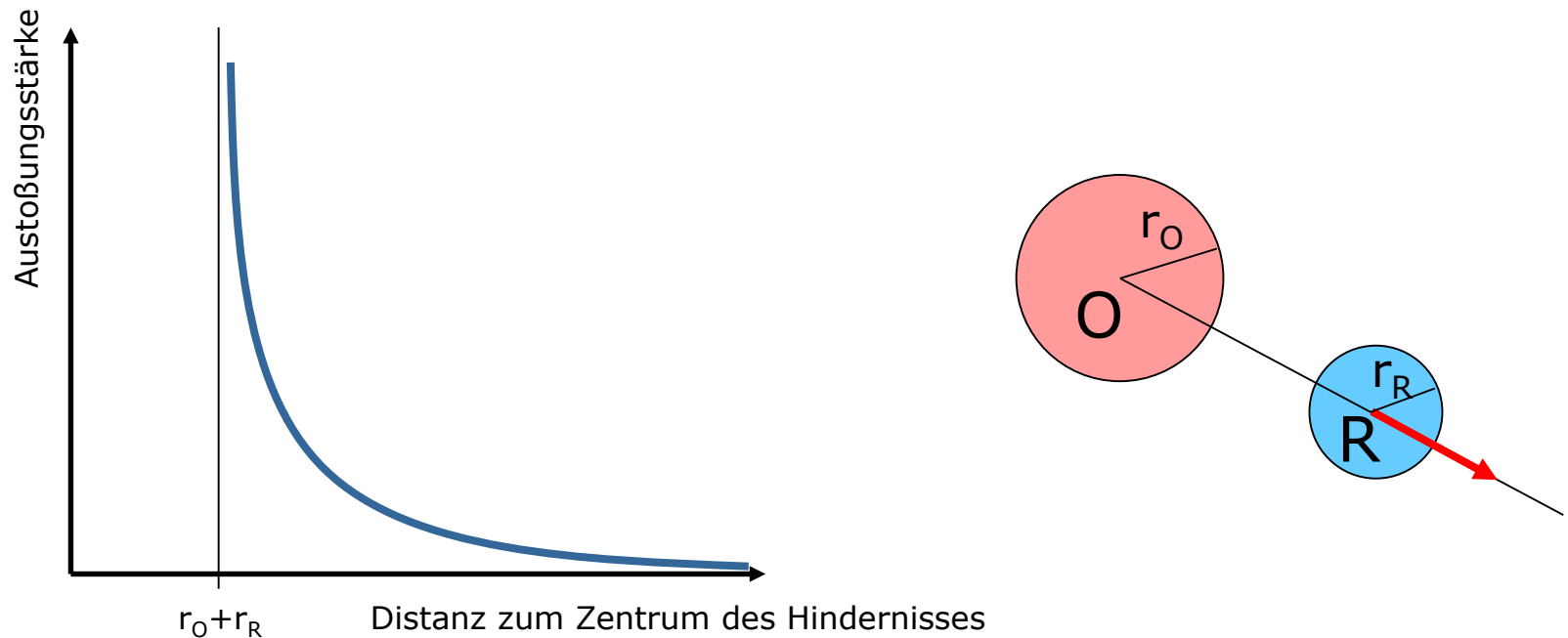
uniform



Normal zur Wand

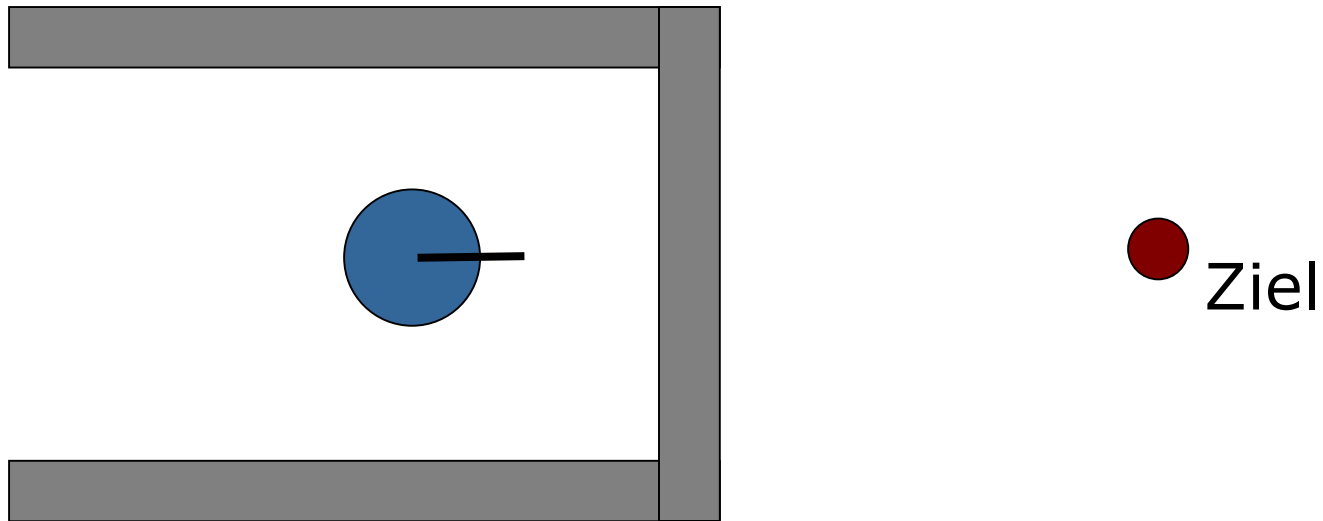
Beispiel: Abstoßendes Potential

- Richtung: Ausgehend vom Zentrum des Hindernisses
- Stärke: Zunehmend mit Nähe,
z.B. $1/(\text{dist}(O, R) - (r_O + r_R))$



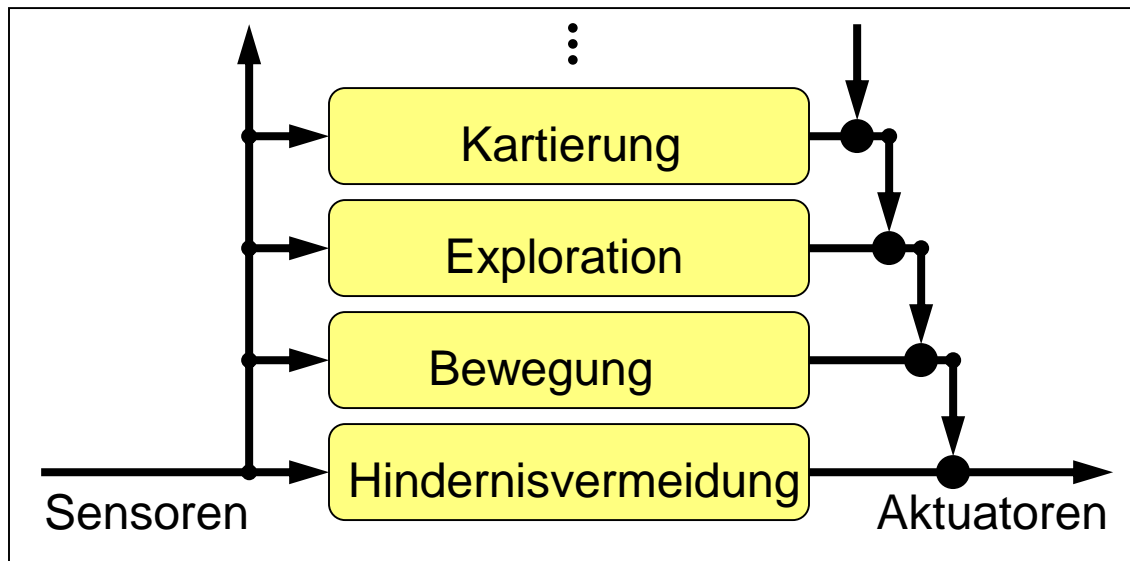
Problem: Lokale Minima

- Anziehende und abstoßende Potentiale löschen sich aus
- Roboter findet nicht heraus
- Typische Situation:



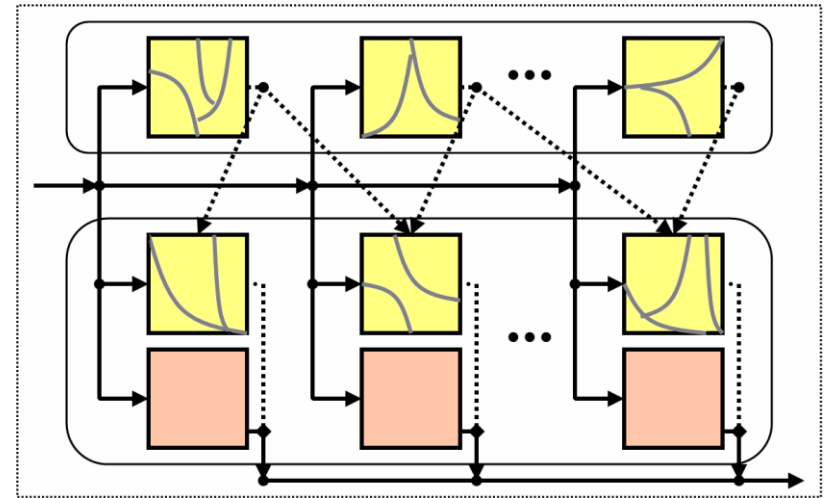
Subsumptionsarchitektur

- Verhaltensbasiert, endliche Automaten, Nachrichten
- Kompetenzschichten
- Zunehmende Komplexität
- Subsumption: Überstimmen tieferer Schichten
- Inkrementelle Vorgehensweise



Dual Dynamics

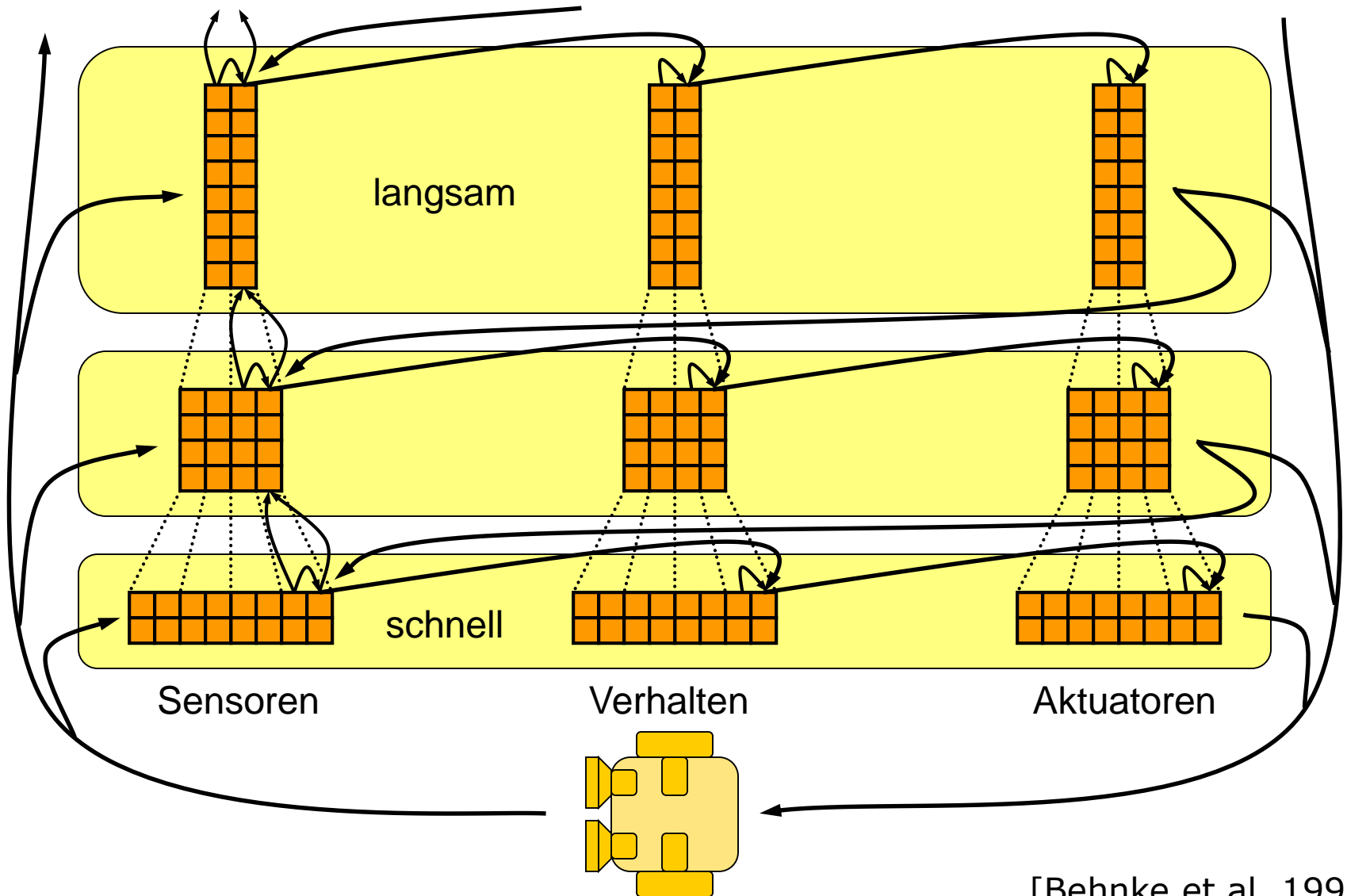
- Verhaltensbasiert
- Dynamische Systeme
- Zwei Verhaltensarten
 - elementar
 - komplex



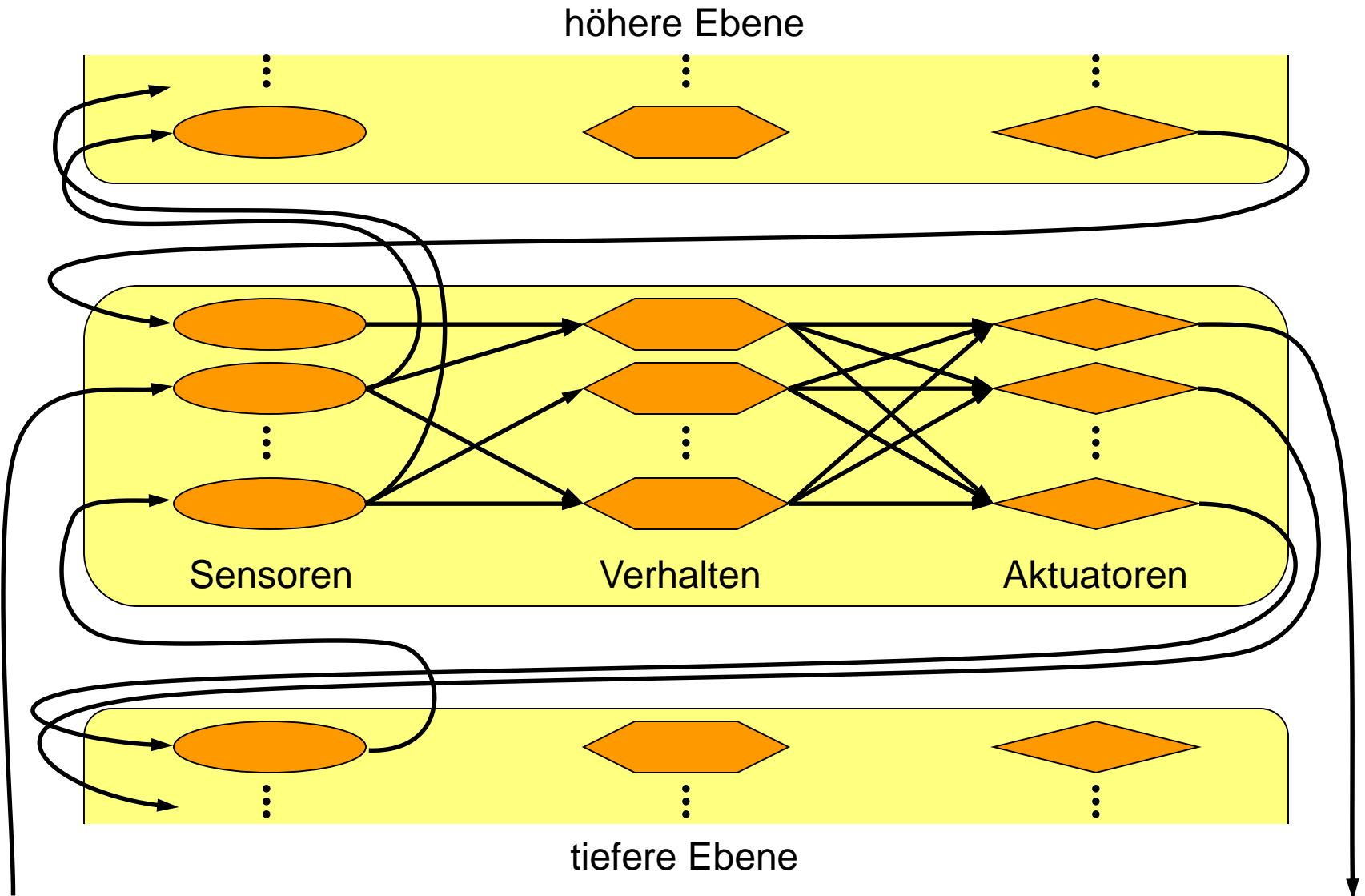
Herbert Jaeger 1995

- Elementare Verhalten haben zwei Module:
 - Aktivierungsdynamik: Soll ich jetzt etwas tun?
 - Zieldynamik: Was soll ich tun?
- Keine Zieldynamik bei komplexen Verhalten
- Bifurkationen, Modi, Multifunktionalität

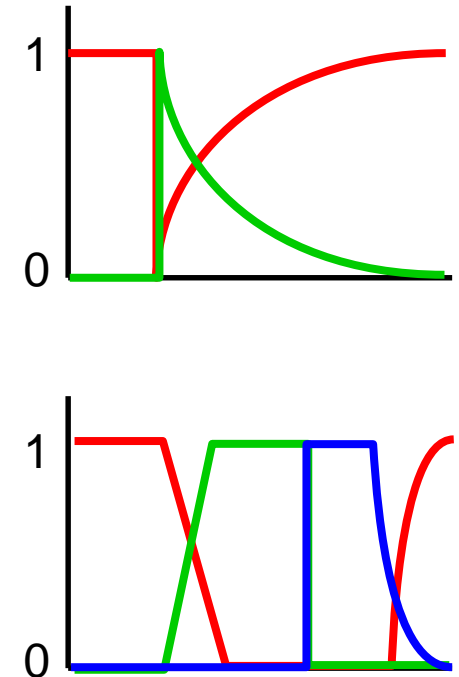
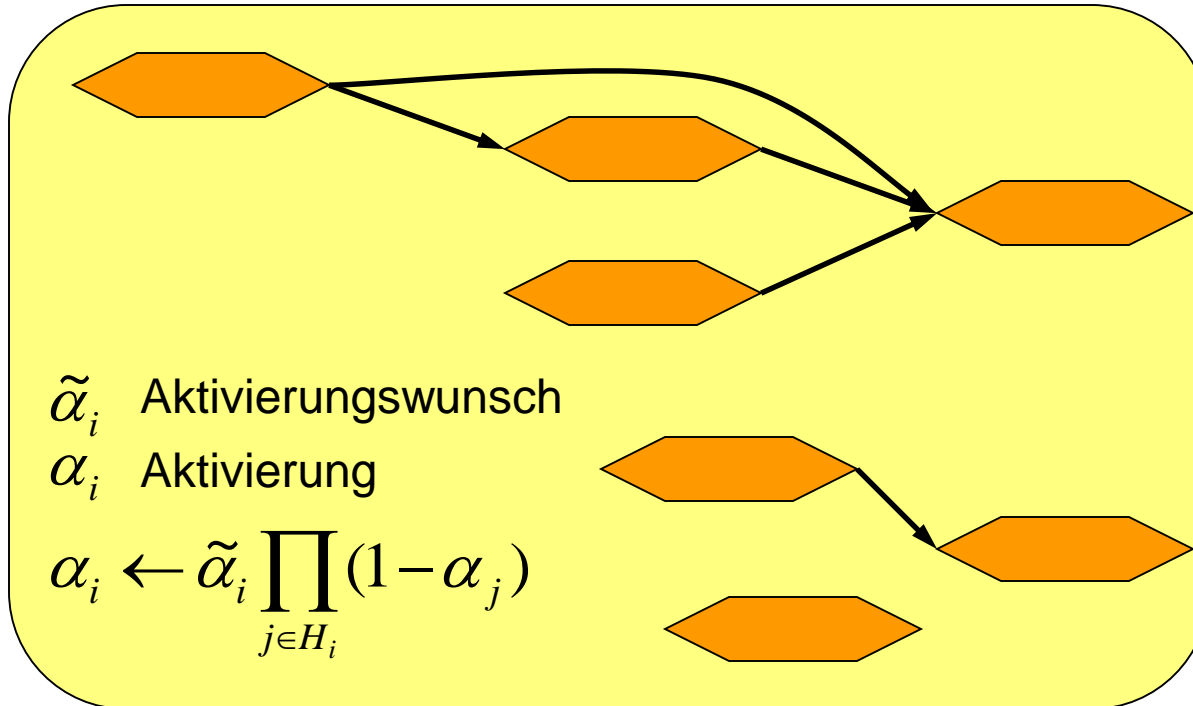
Hierarchie reaktiver Verhalten



Aufbau einer Ebene

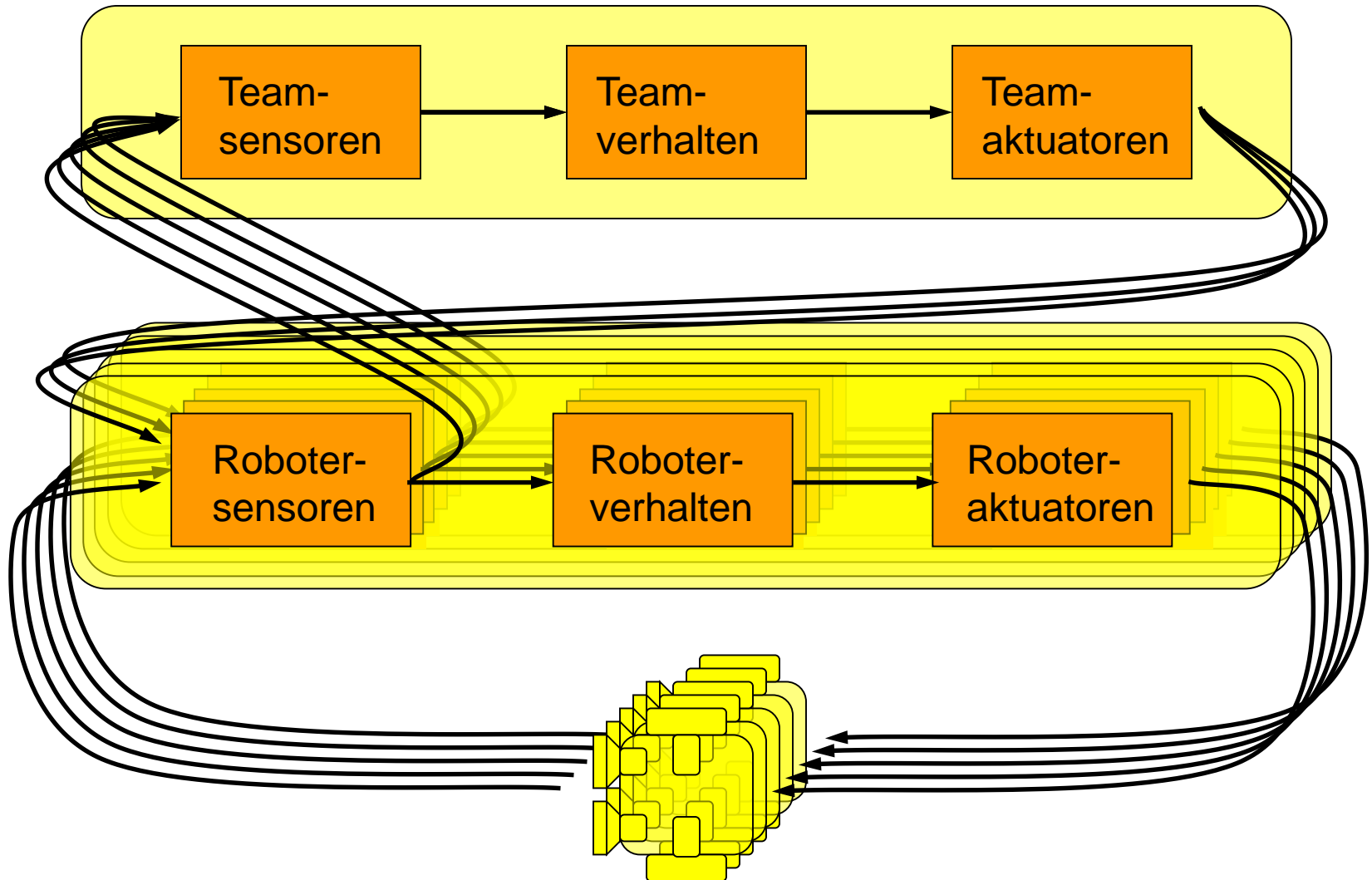


Hemmung von Verhalten

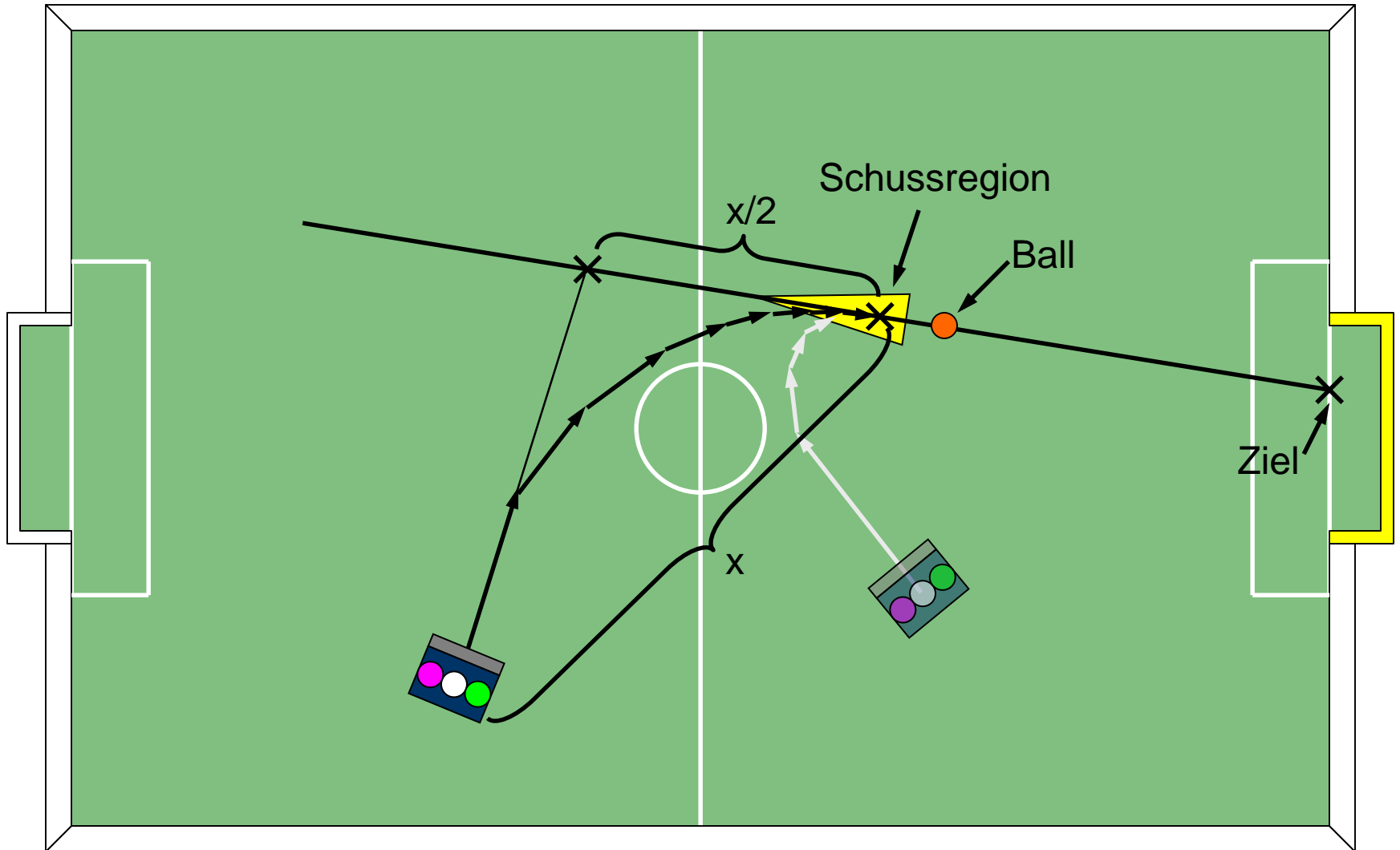


- Mehrere Verhalten können gleichzeitig aktiv sein
- Gerichteter azyklischer Hemmgraph
- Multiplikative Hemmung
- Aktuatordynamik: Gewichtetes Mittel der Änderungswünsche

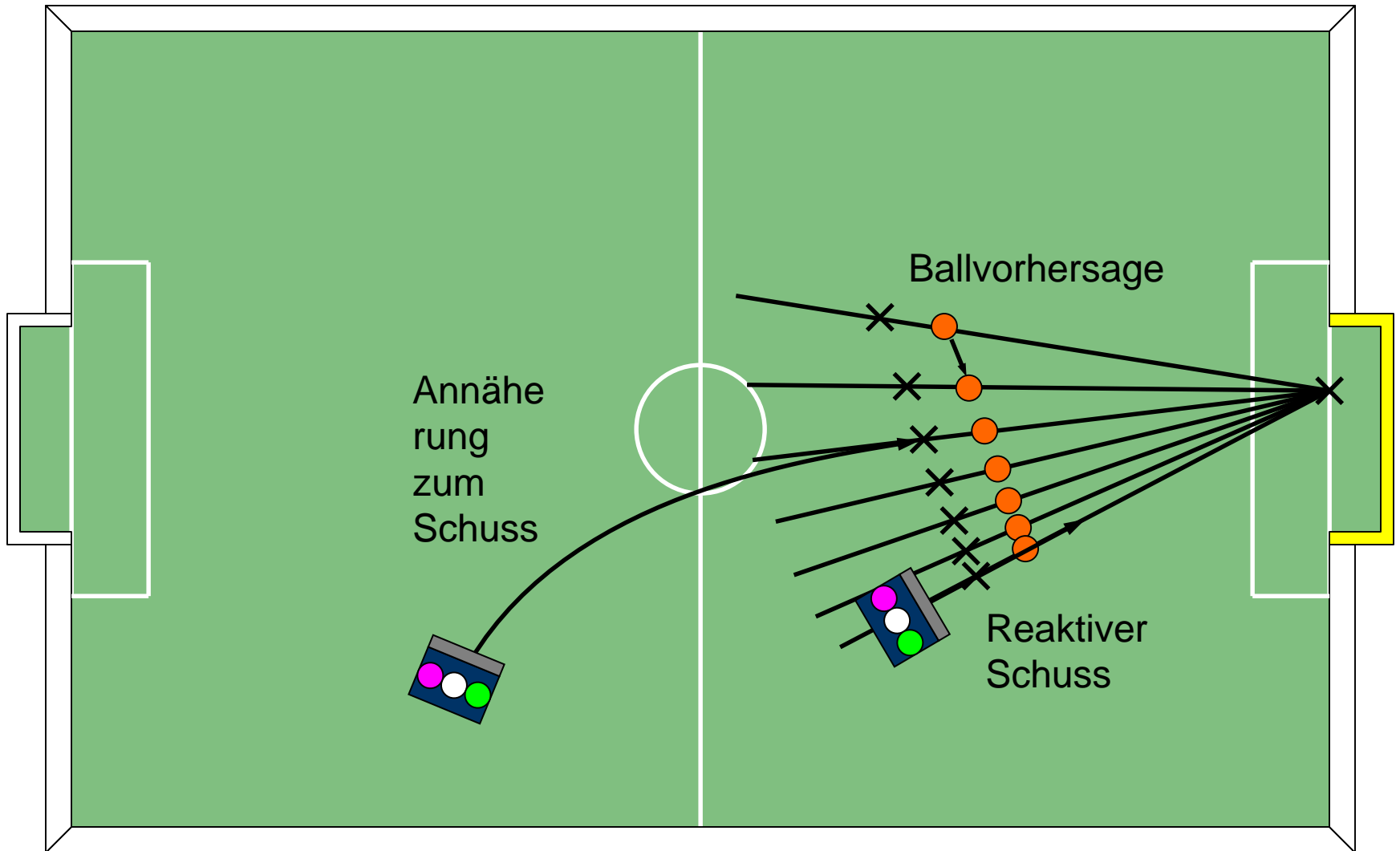
Team-Ebenen



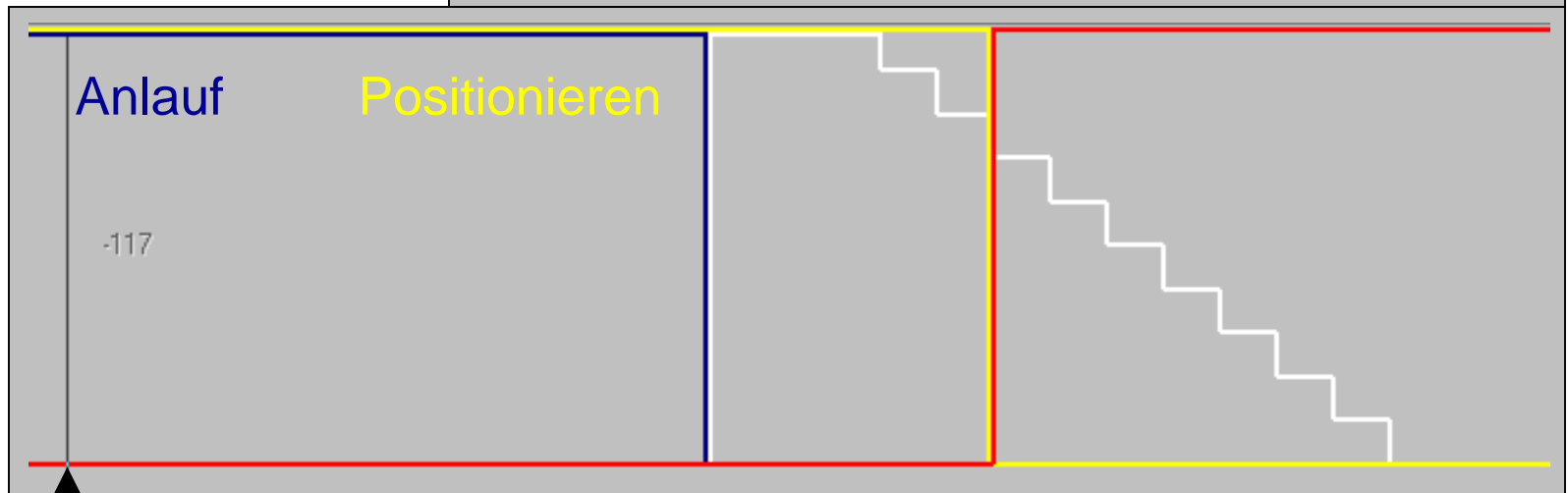
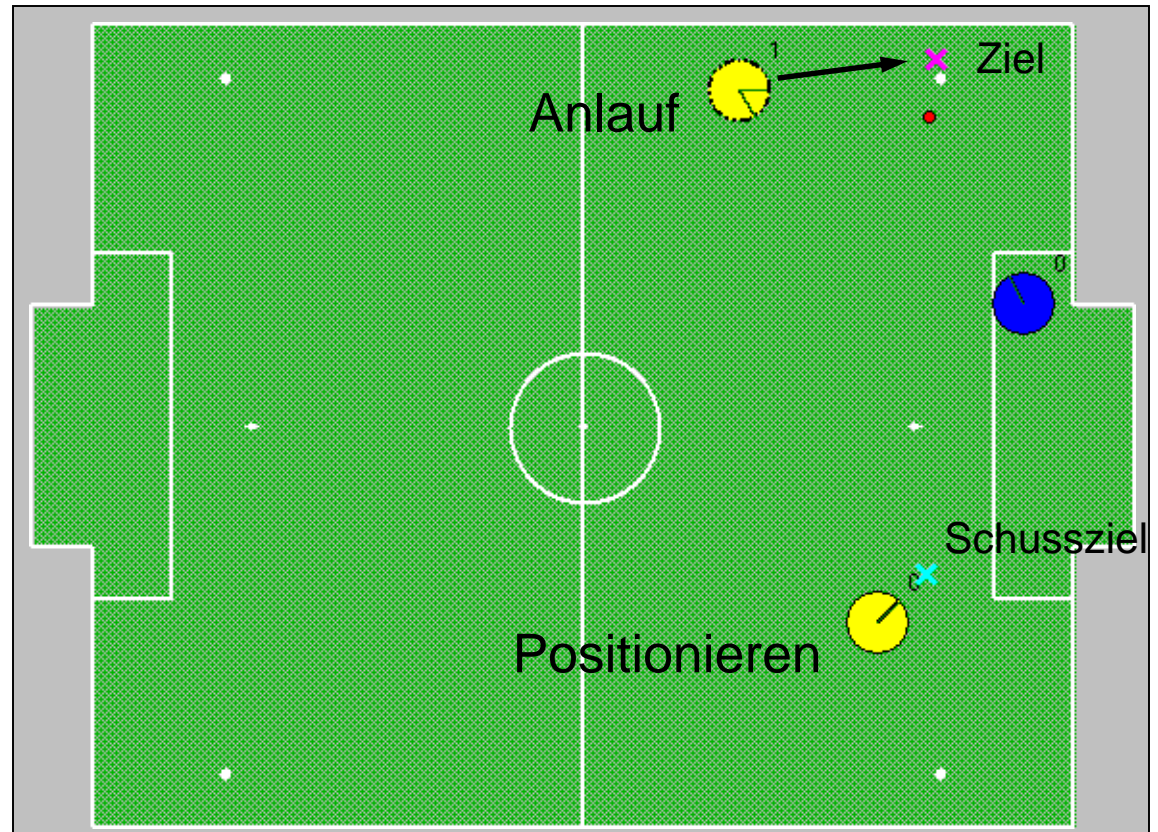
Annäherung zum Schuss



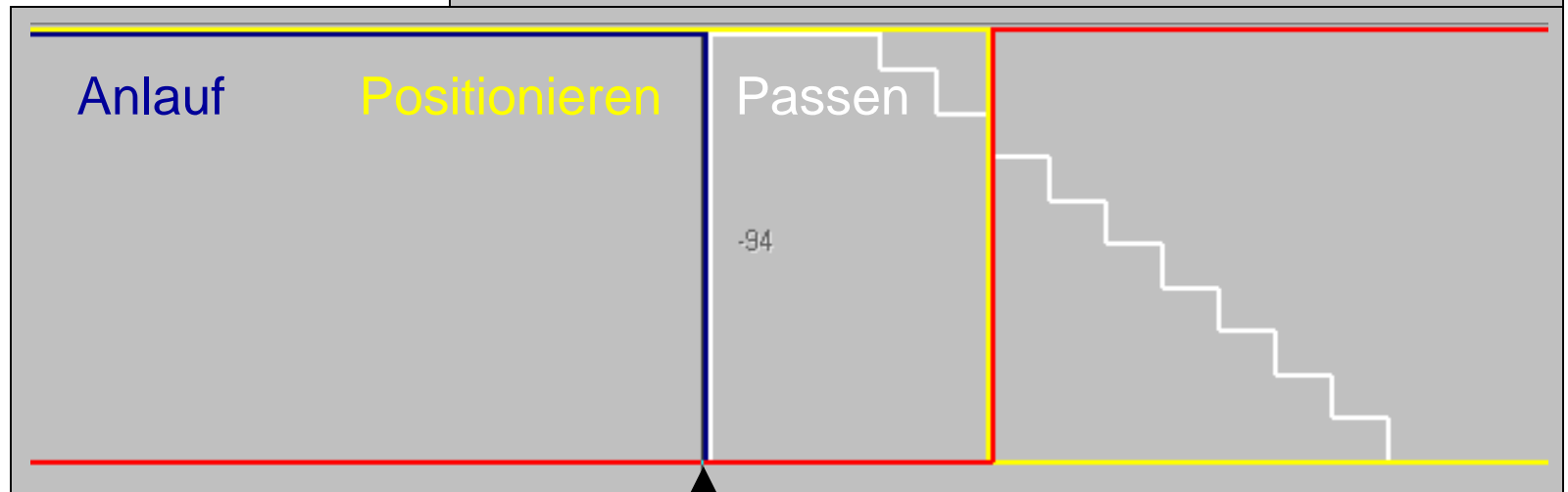
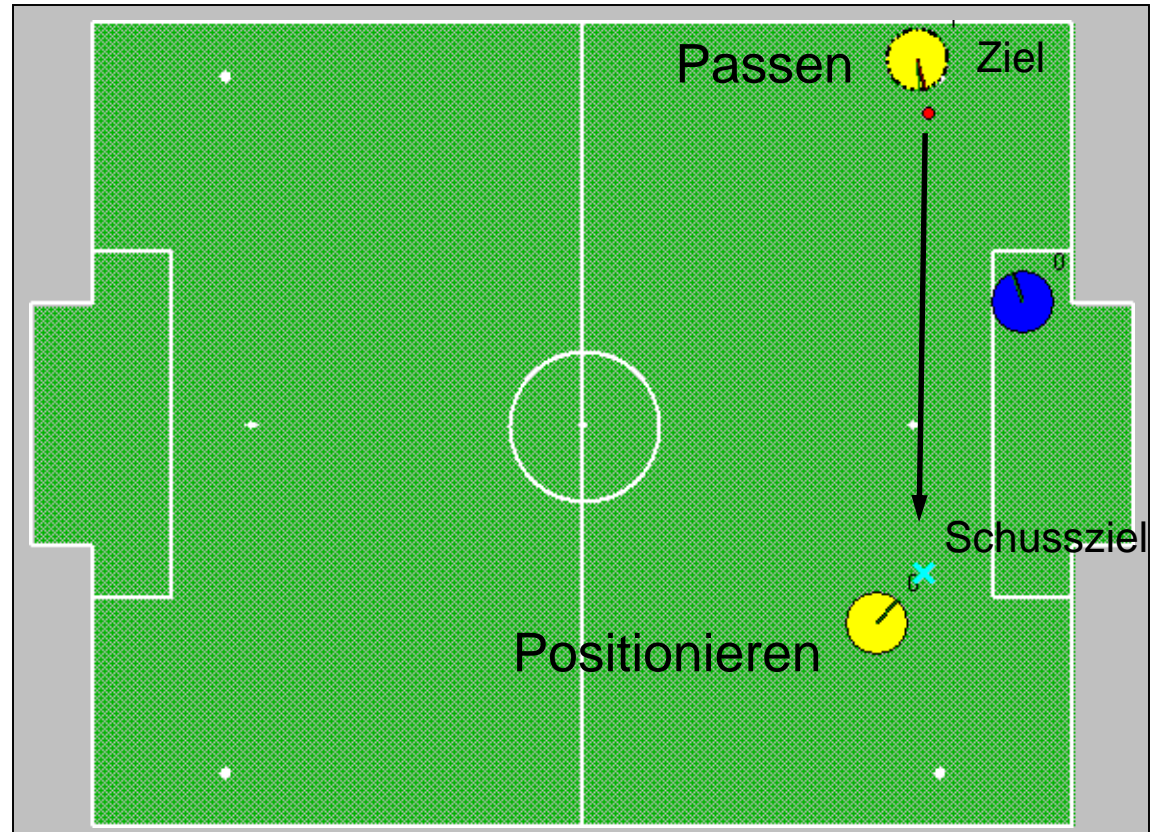
Schuss eines rollenden Balls



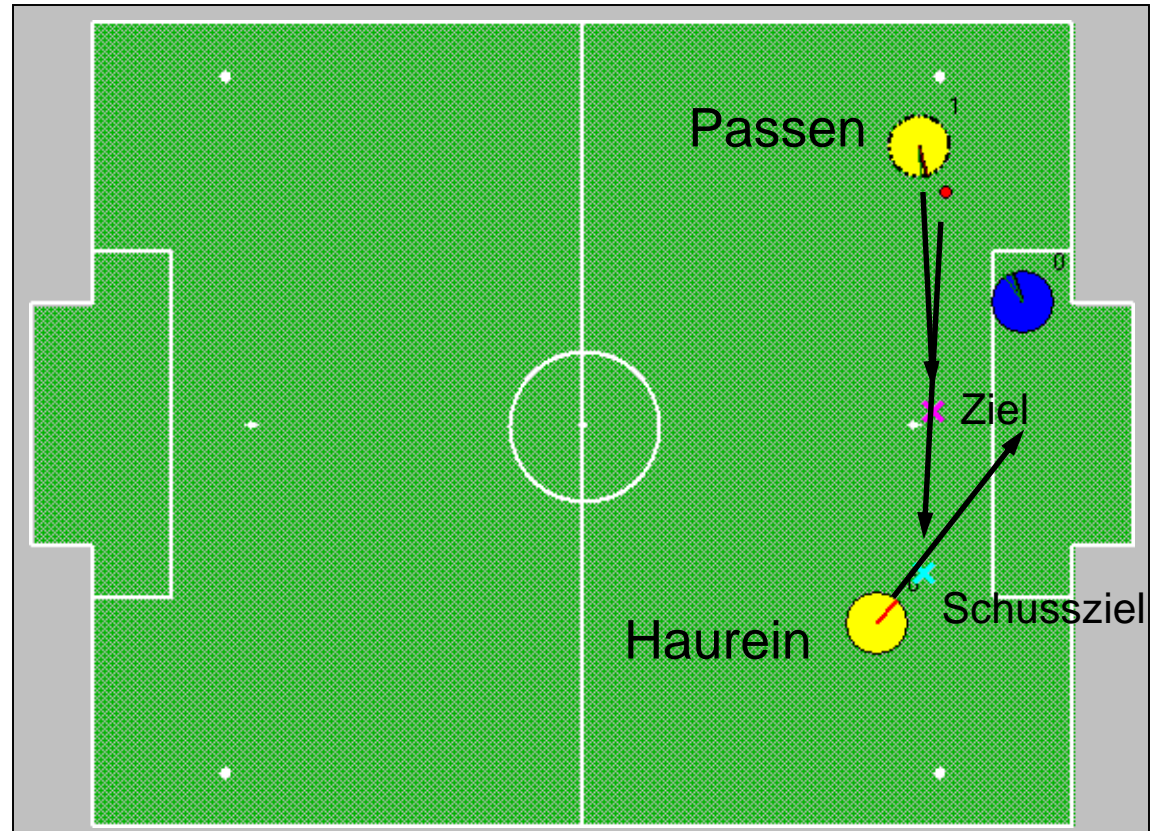
Passen



Passen



Passen



Anlauf

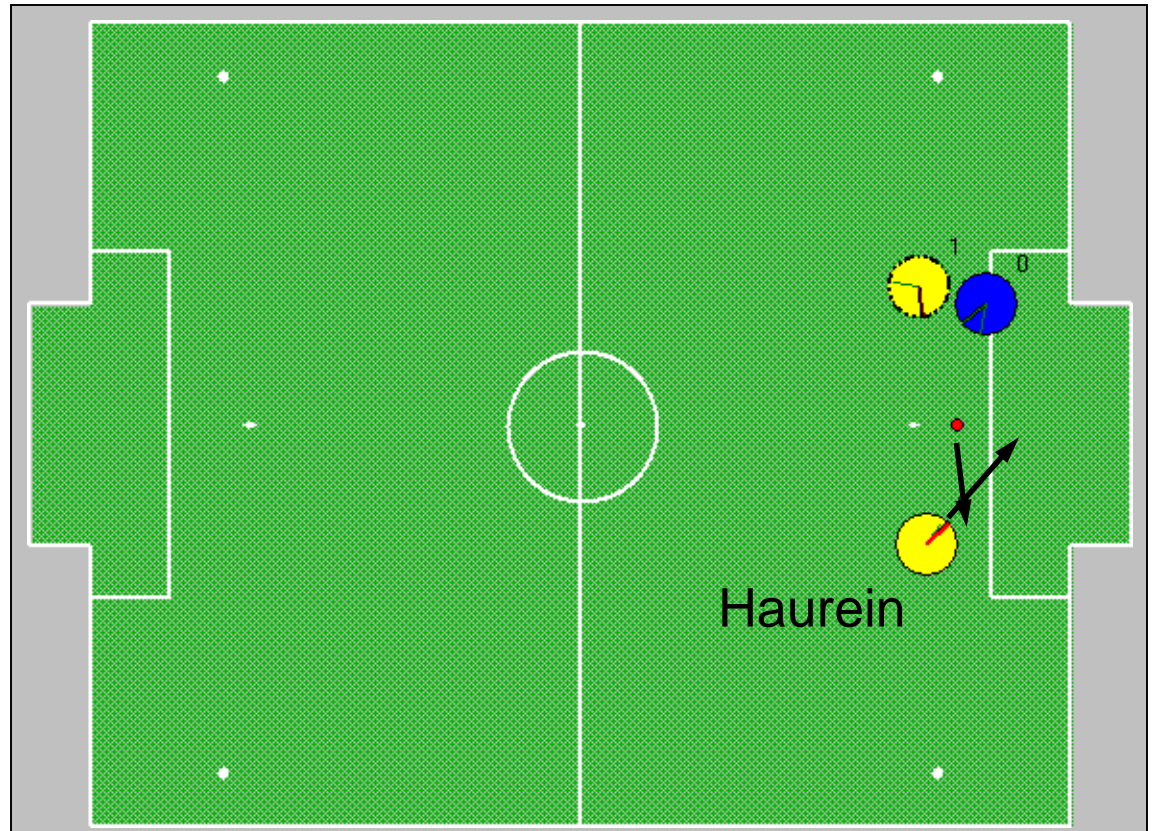
Positionieren

Passen

Haurein

-84

Passen



Anlauf

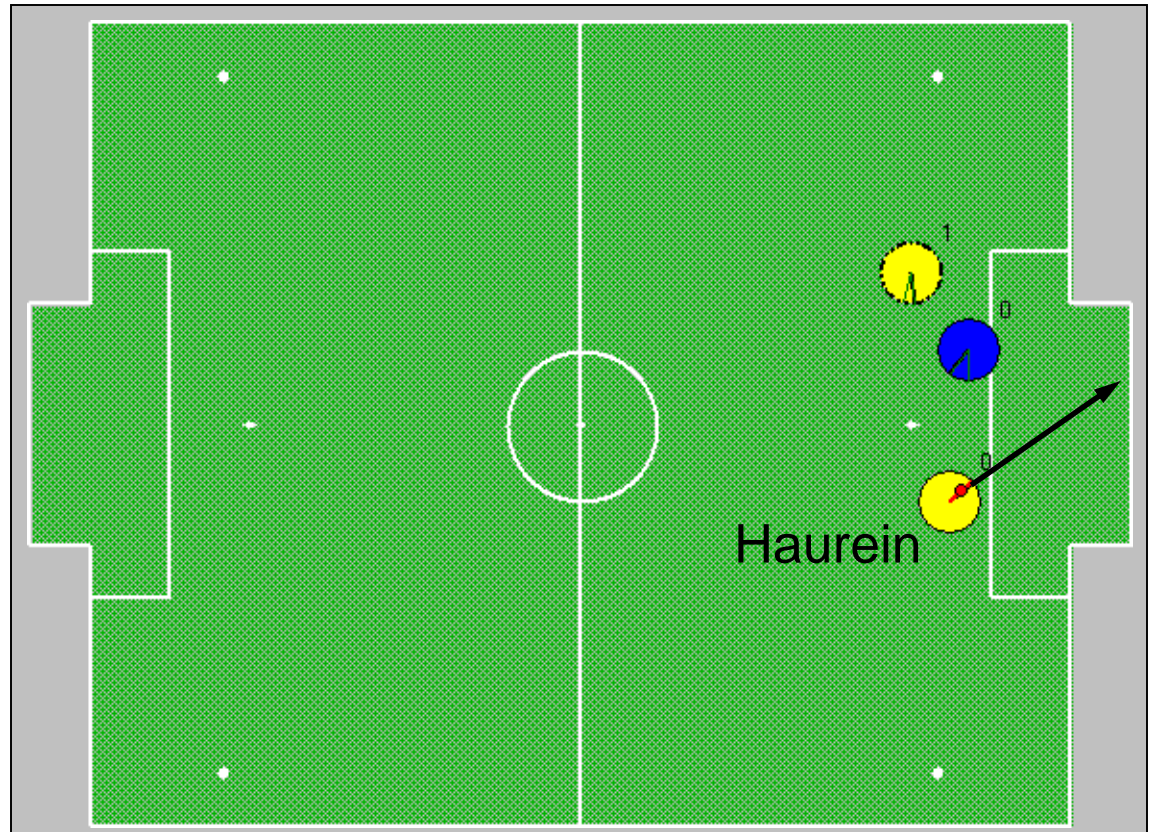
Positionieren

Passen

Haurein

-74

Passen



Anlauf

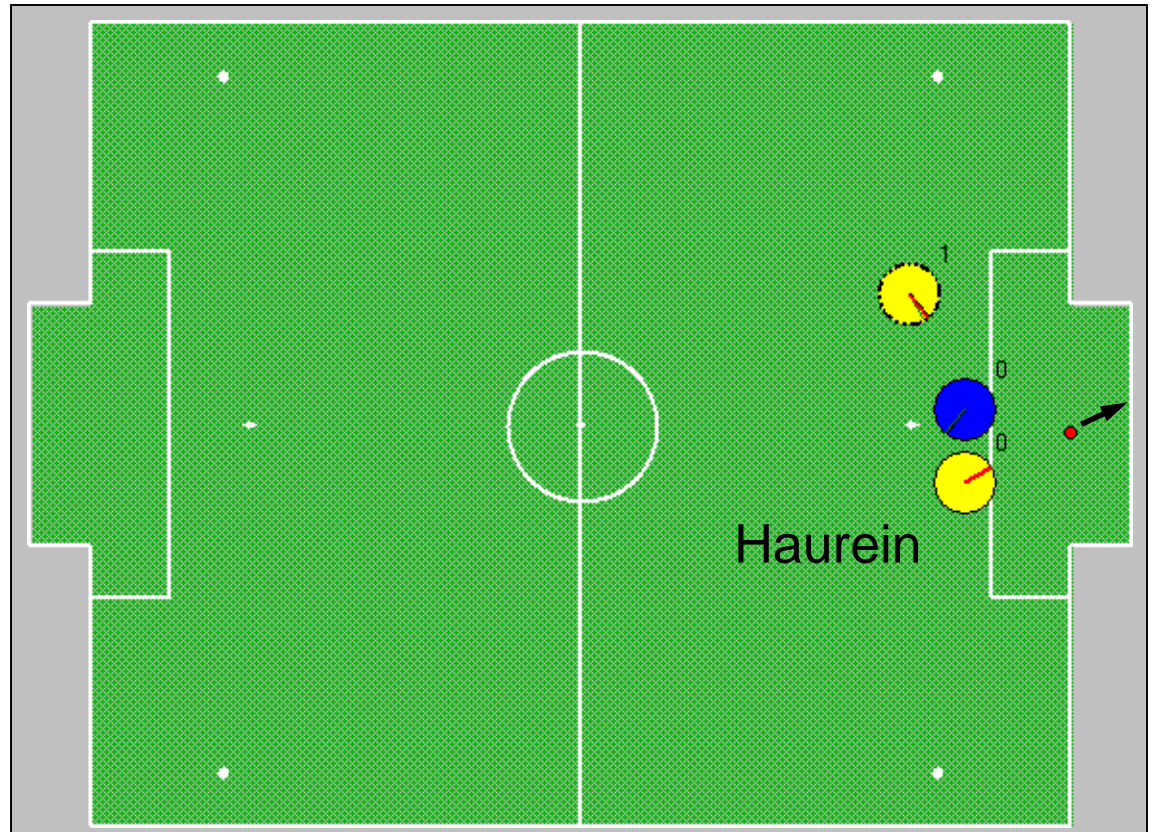
Positionieren

Passen

Haurein

-70

Passen



Anlauf

Positionieren

Passen

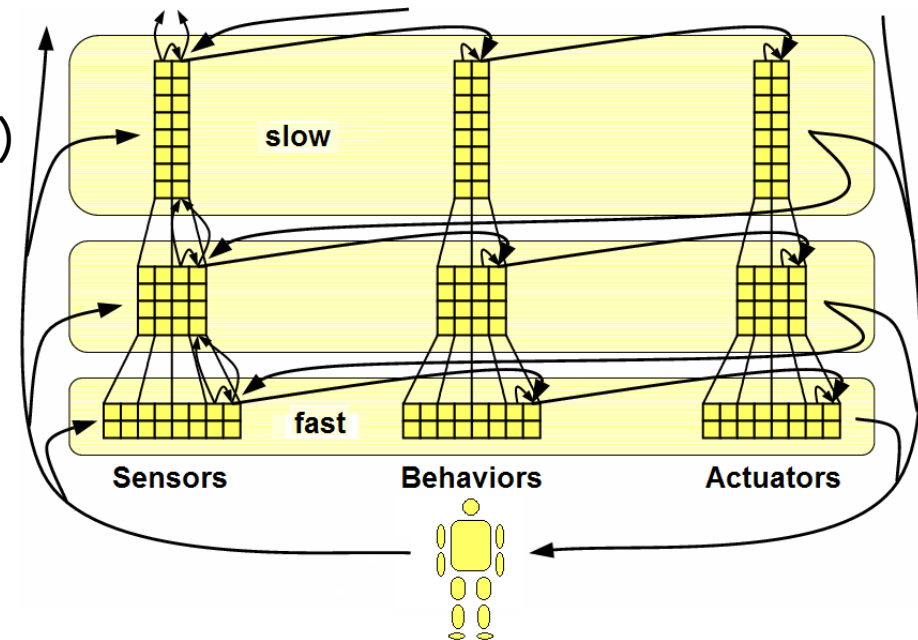
Haurein

-65

Hierarchisch-Reaktive Verhaltenssteuerung für Humanoide Roboter

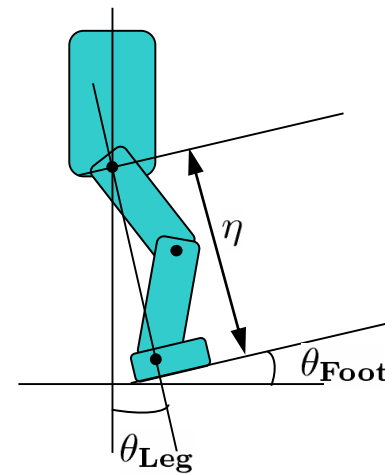
■ Hierarchisch, reaktiv

- Zeithierarchie
(kHz, 83 Hz, 41.5 Hz, 20.75 Hz)
- Agentenhierarchie
(Einzelgelenk, Körperteil, Roboter, Team)
- Komplexitätsreduktion durch Interaktionsbeschränkungen



■ Kinematische Steuerung von Körperteilen:

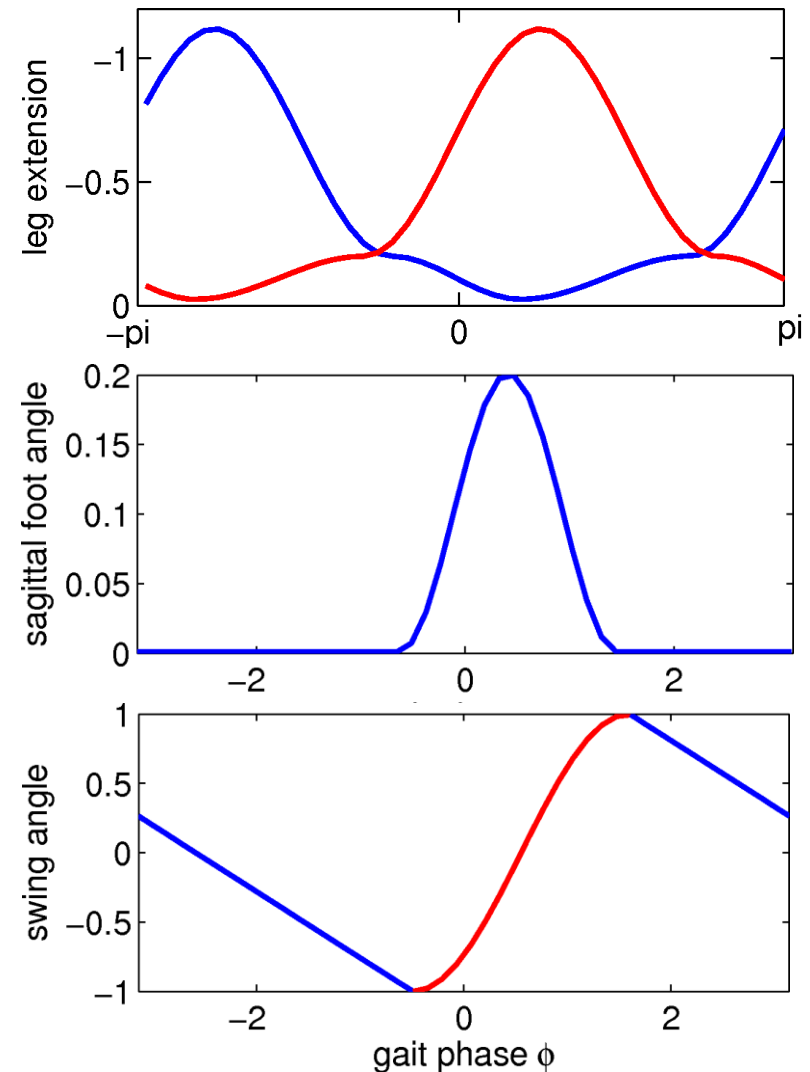
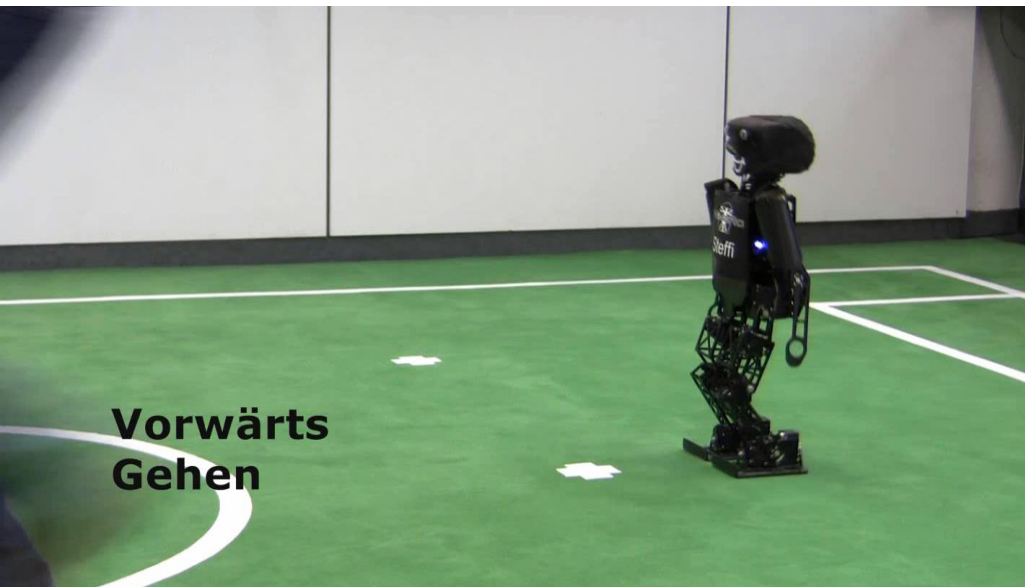
- Beinwinkel
- Fußwinkel
- Beinlänge



[Behnke, Stückler: IJHR'08]

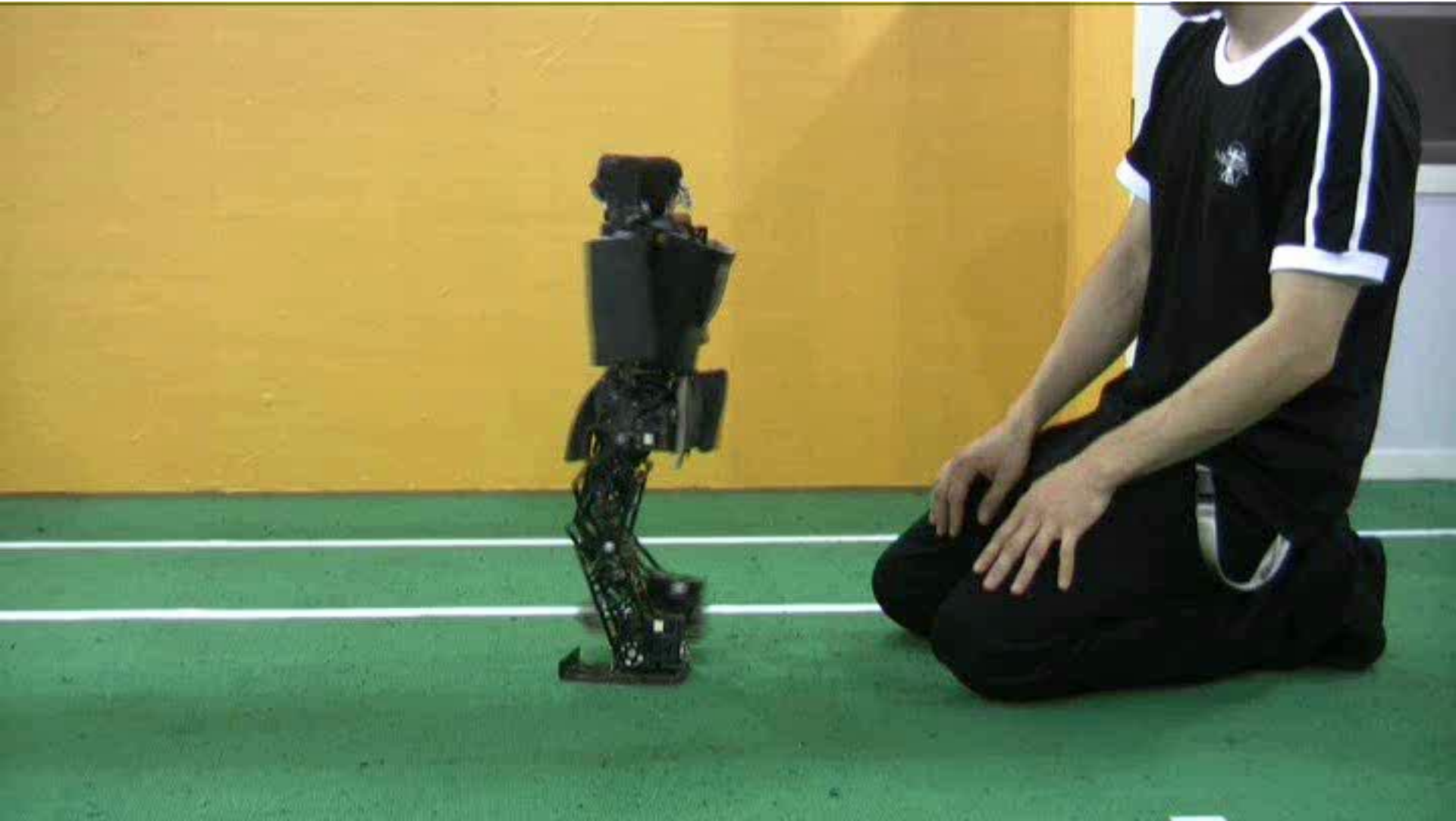
Omnidirektionales Gehen

- Kombination von:
 - Vorwärts/rückwärts Gehen
 - Seitlichem Gehen
 - Drehen auf der Stelle
- Hauptbestandteile:
 - Gewichtsverlagerung
 - Beinverkürzung
 - Bewegung in Laufrichtung



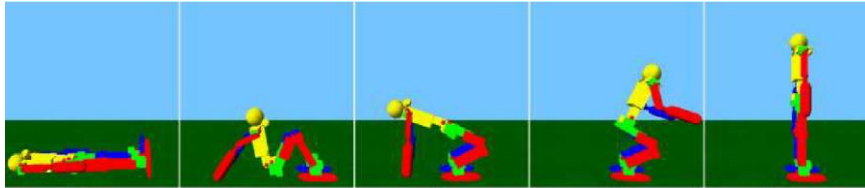
[Behnke: ICRA'06]

Stabilisierende Reflexe

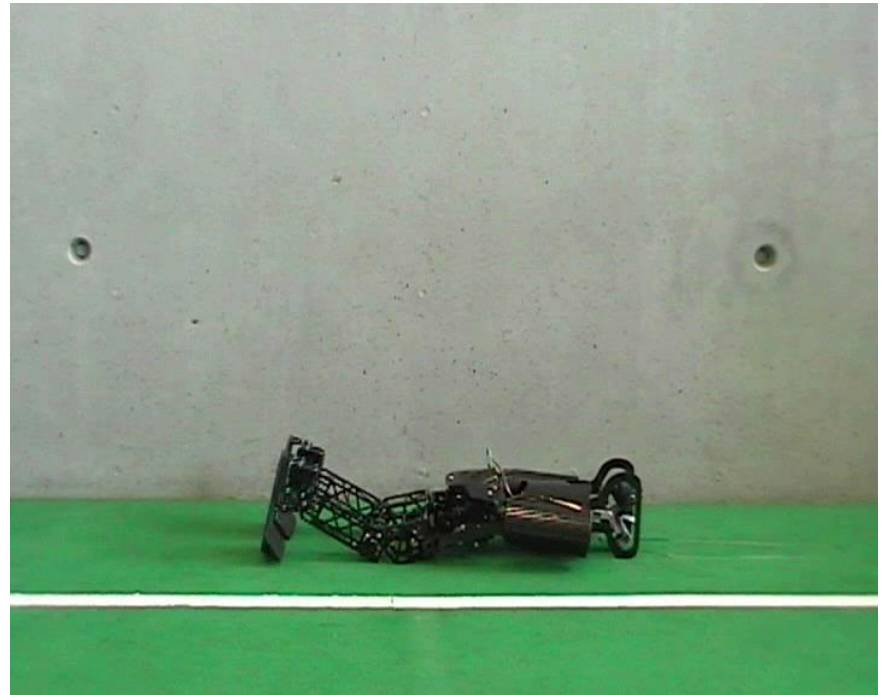
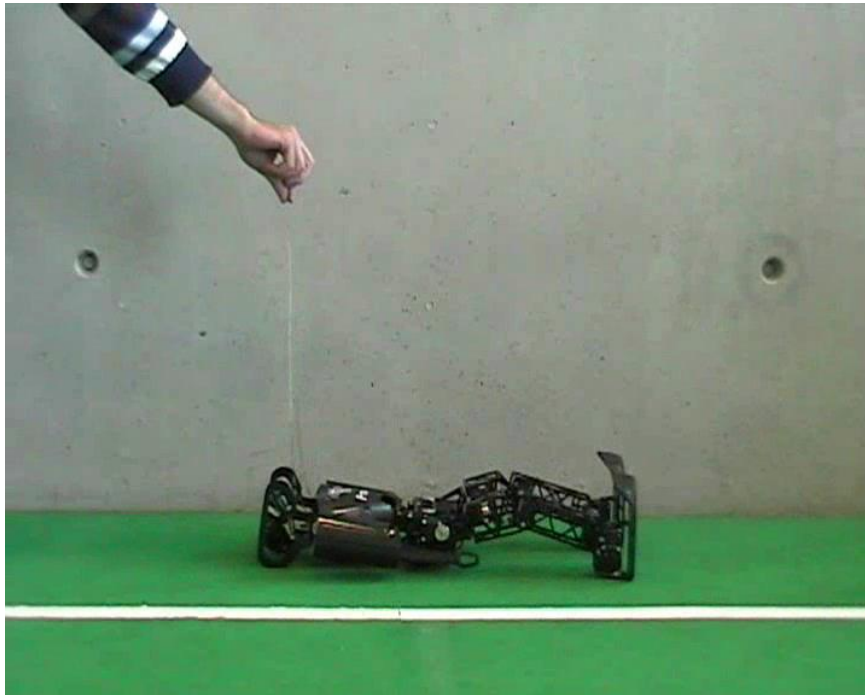
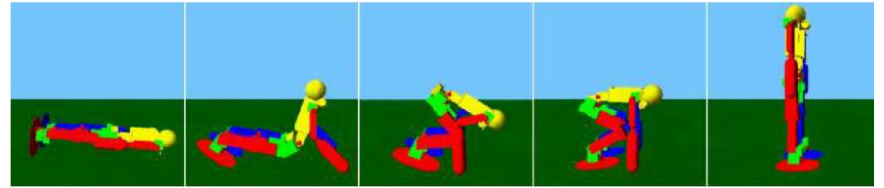


Aufstehen

Rückenlage



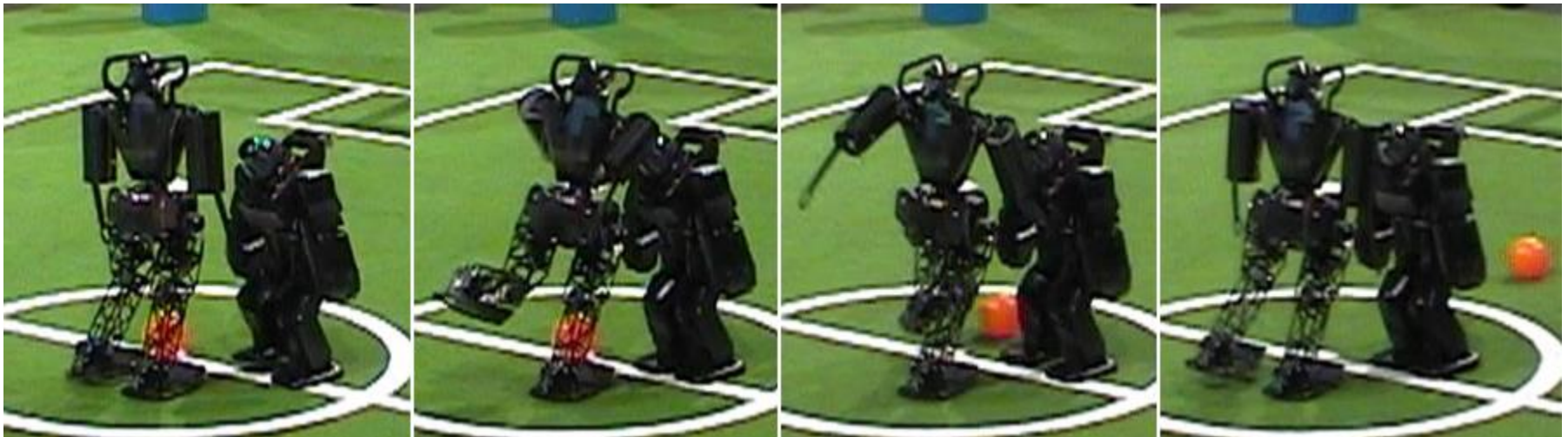
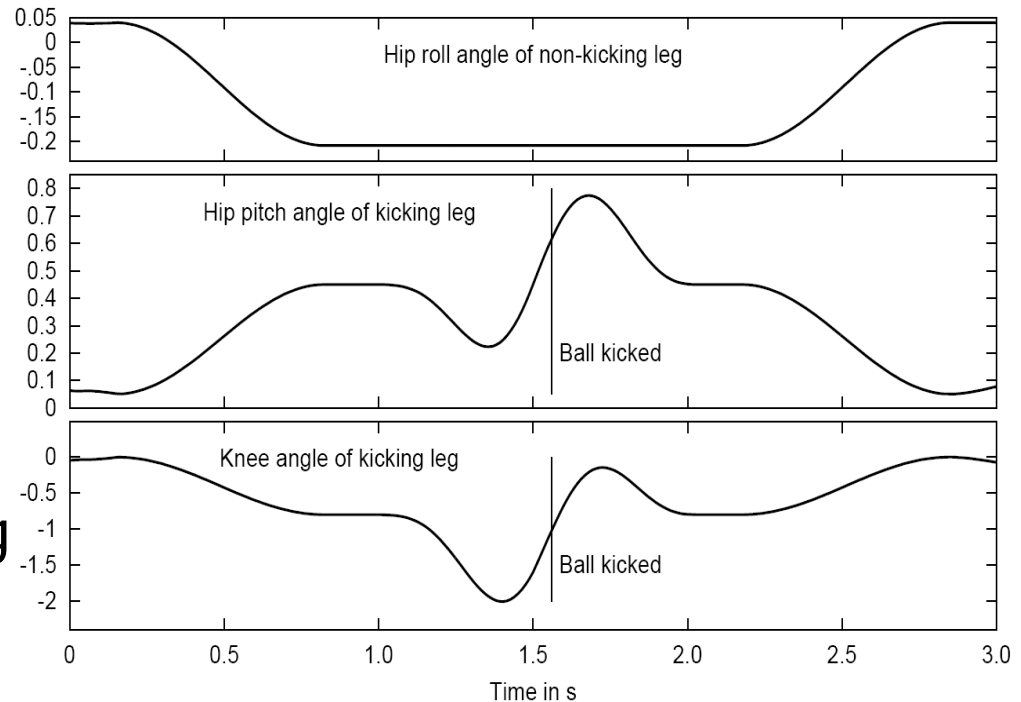
Bauchlage



[Stückler, Schwenk, Behnke: IAS-9, 2006]

Parametrisierbarer Schuss

- Gewichtsverlagerung
- Ausholen
- Schneller Schwung nach vorn
- Abbremsen
- Zurück in Stand
- Schussstärke, -richtung und Ballposition parametrisierbar

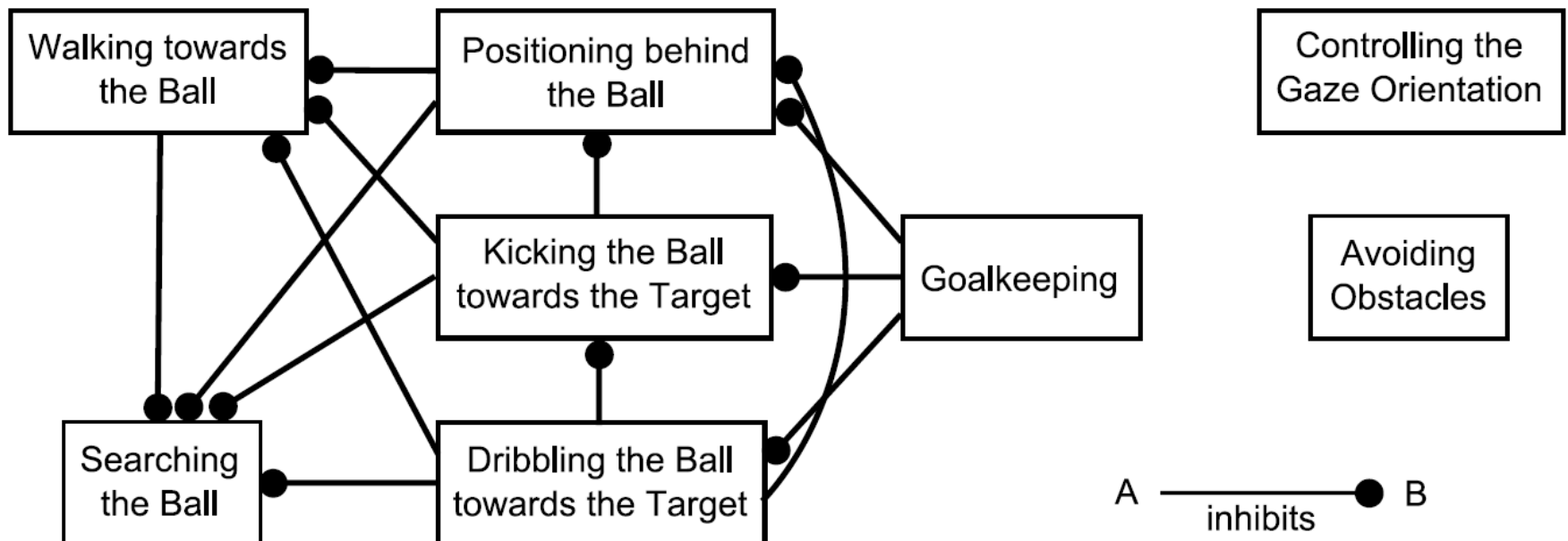


Torwartbewegung zur Seite

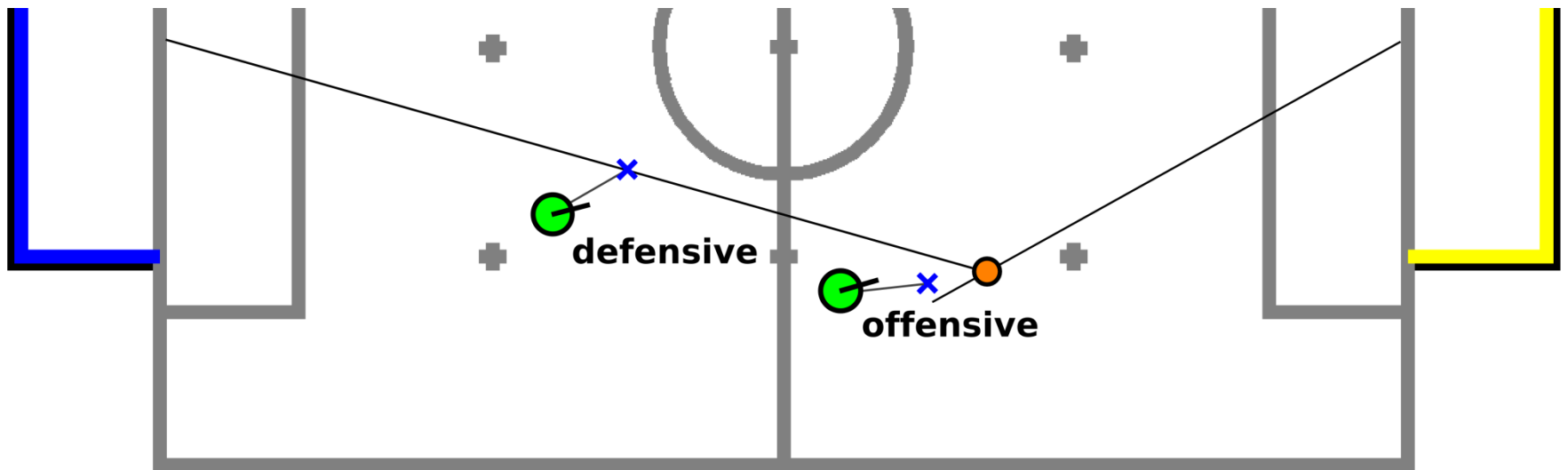


[Missura, Wilken, Behnke: RoboCup'10]

Fußballverhalten



Positionierung der Spieler



Verhaltenshierarchie

■ Taktik und Teamverhalten

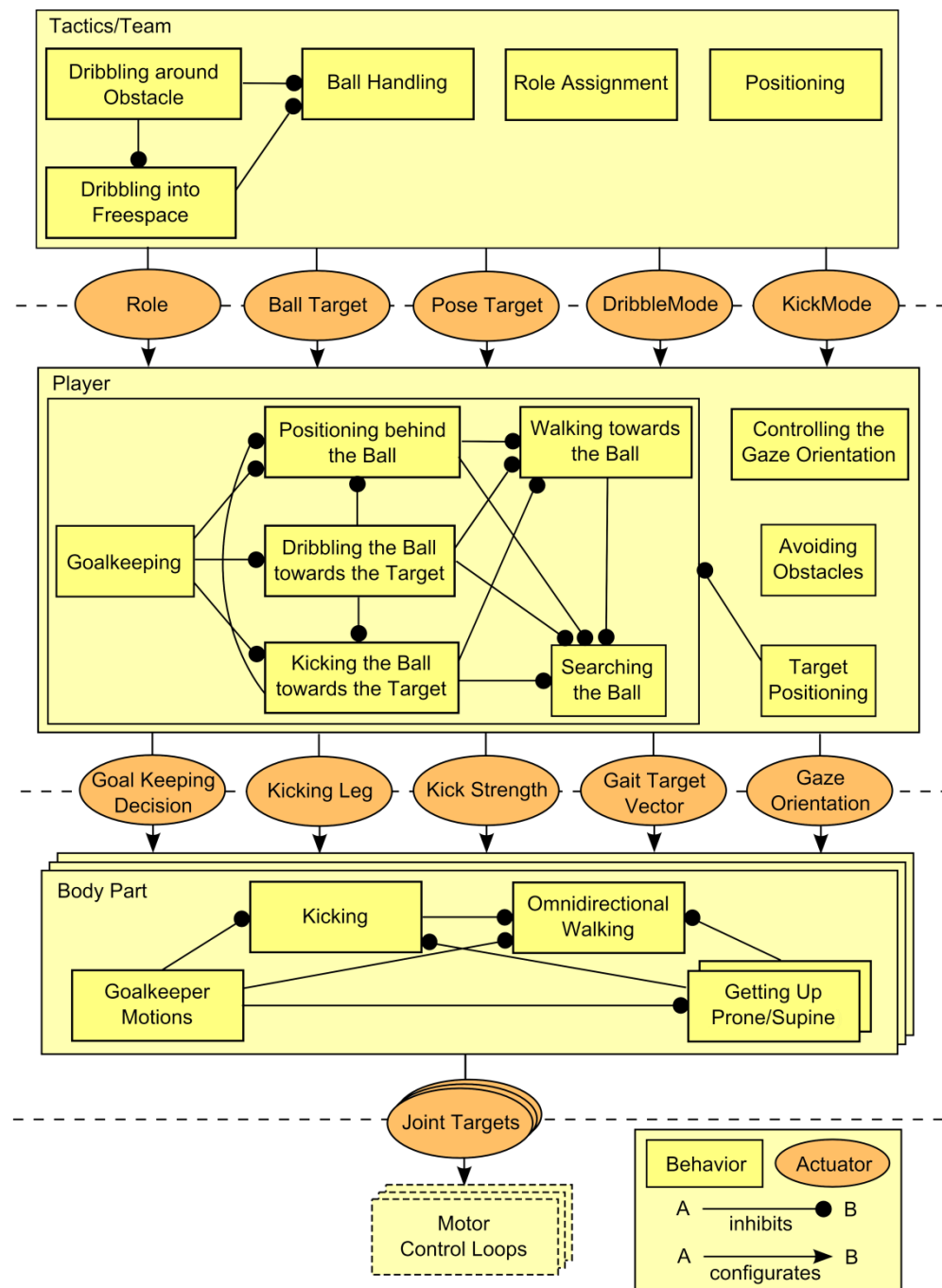
- Rollenzuweisung
- Positionierung auf dem Feld
- Ball bewegen
- Um Hindernisse Dribbeln
- In den Freiraum Dribbeln

■ Fußballverhalten

- Ballsuche
- Zum Ball laufen
- Hinter dem Ball positionieren
- Schuss in Richtung Ballziel
- Dribbling in Richtung Ballziel
- Hindernisvermeidung
- Aktive Kameraausrichtung
- Torwartverhalten

■ Grundlegende Fähigkeiten

- Omnidirektionales Gehen
- Schuss
- Aufstehen
- Torwartbewegungen



RoboCup 2008 KidSize-Finale



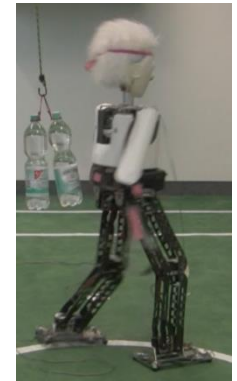
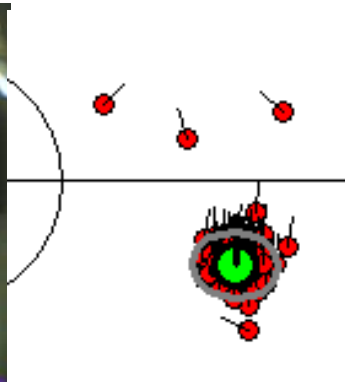
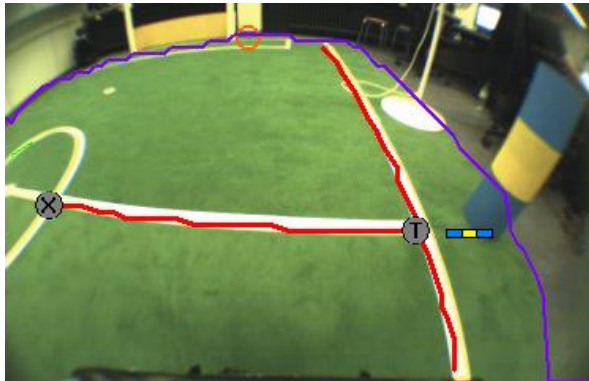
Humanoide Fußballroboter

- Größe: 90-114 cm; Gewicht: 6-8 kg; DoF: 13-20



Unser Team NimbRo hat die RoboCup Humanoid TeenSize Wettbewerbe 5x hintereinander gewonnen (2009-2013).

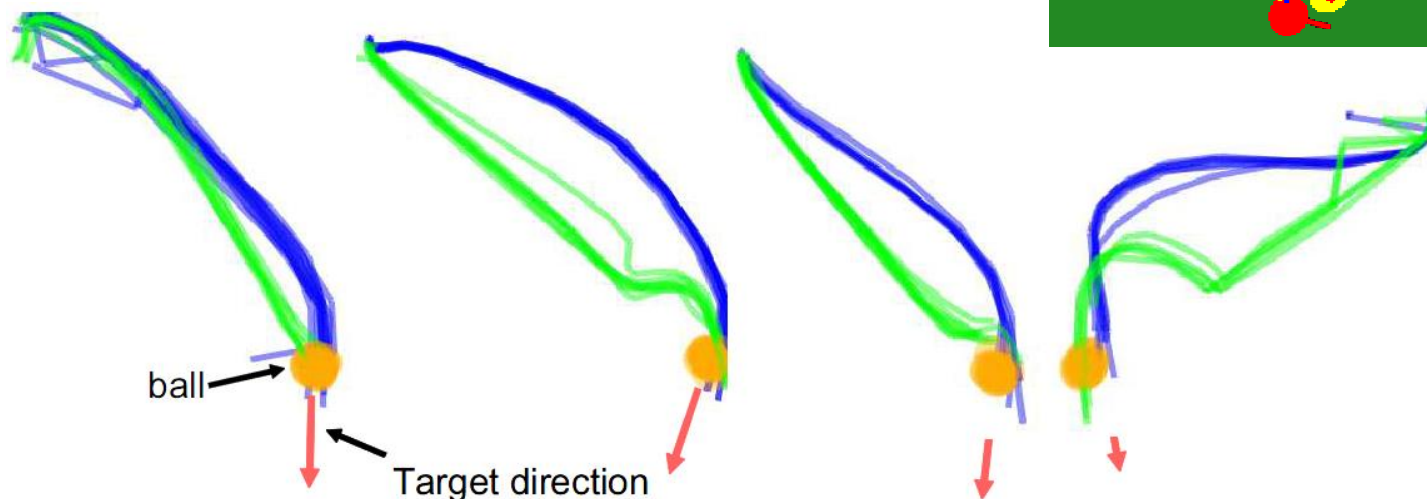
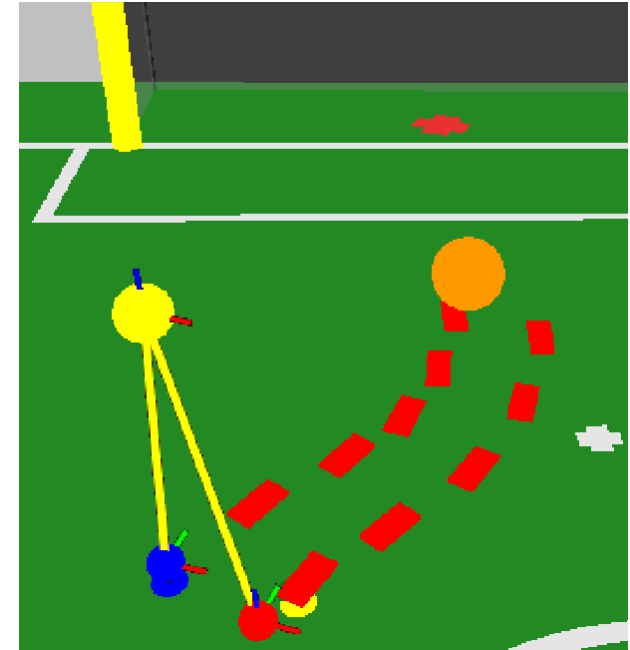
- Probabilistische Lokalisierung, Gangstabilisierung



[Missura]

Planung einzelner Schritte für Fußballroboter

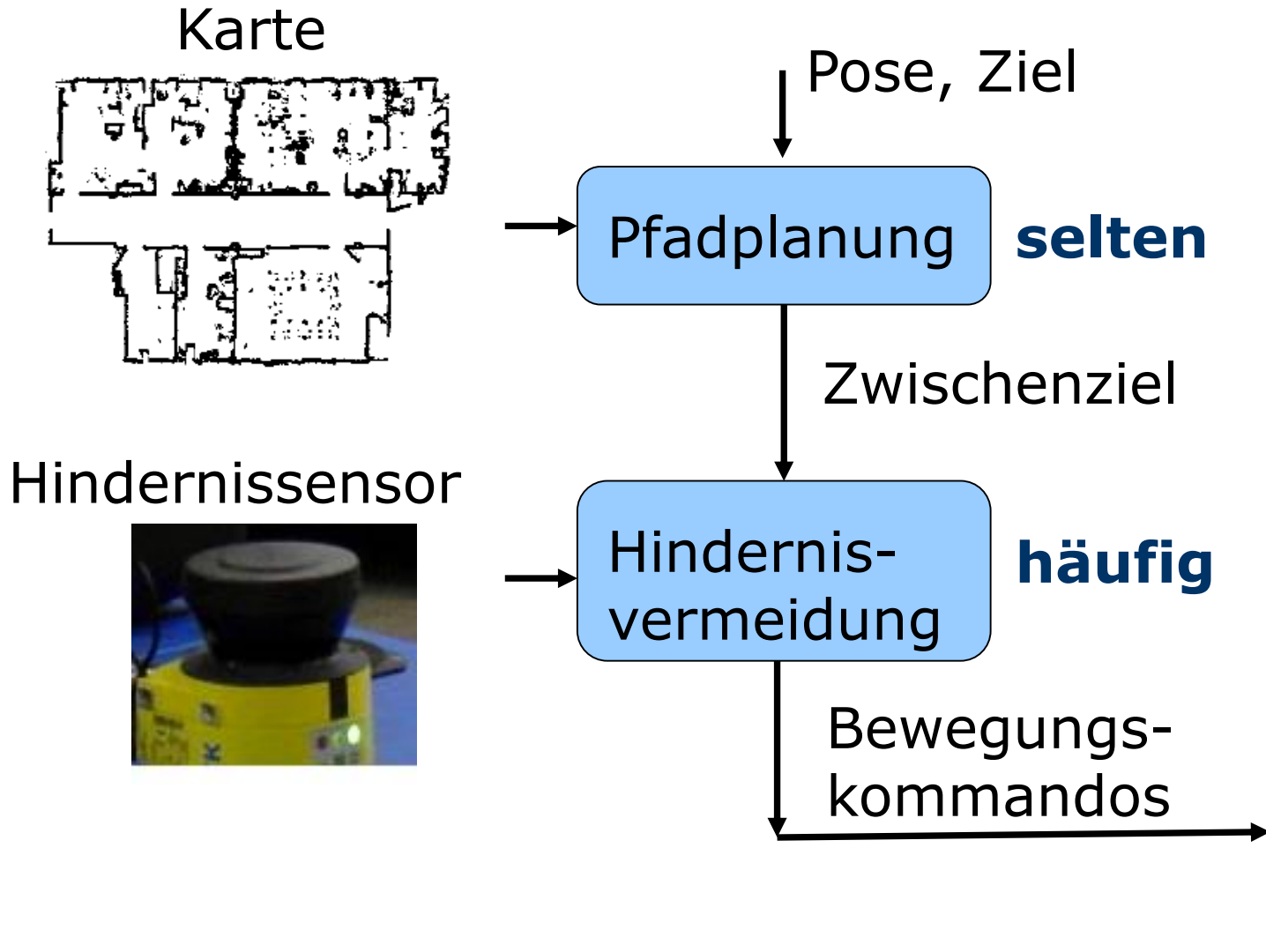
- Ziel: Treffen des Balls ohne Verlangsamung
- Gelerntes Bewegungsmodell
- Offline-Planung
- Funktionsapproximator für ersten Schritt



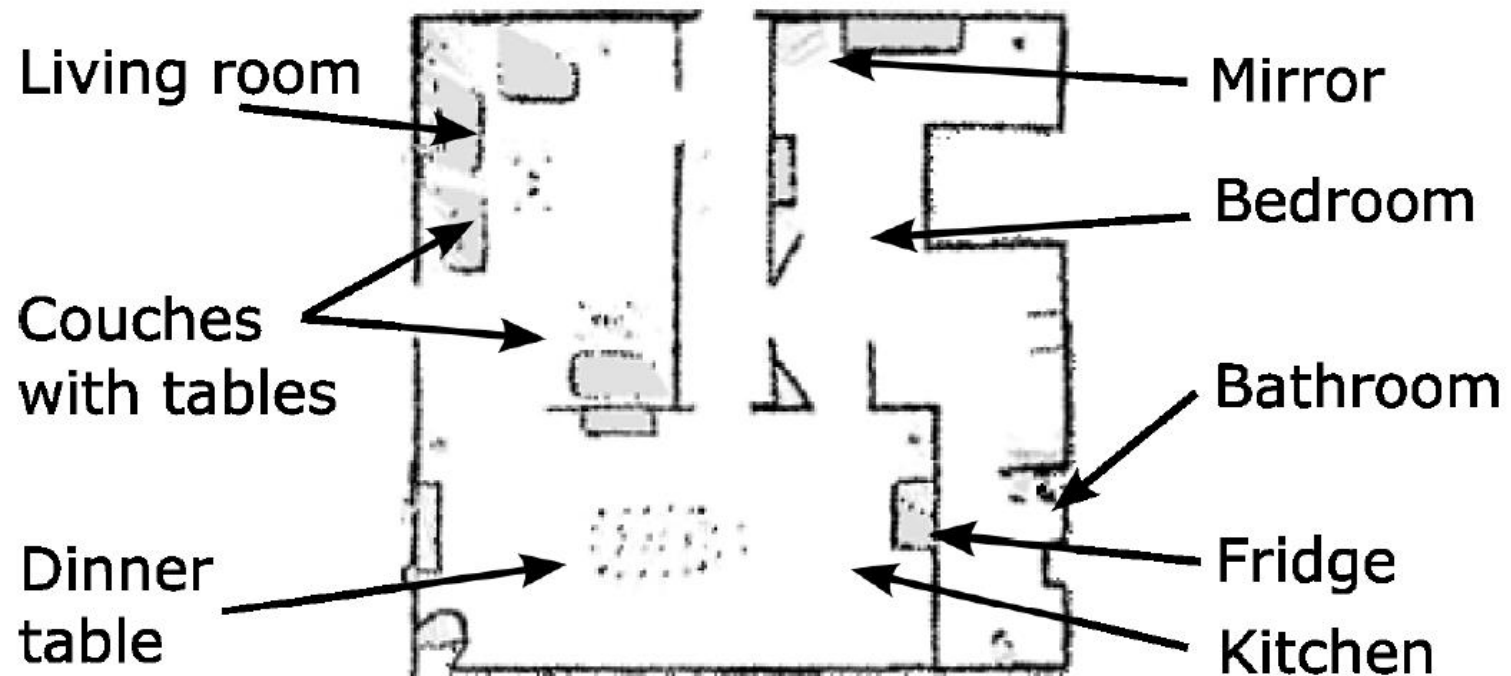
Hybride Verhaltenssteuerung

- Versuch, das Beste aus beiden Welten (deliberativ und reaktiv) zu vereinen
- Beispiel: Drei-Schichten-Architektur (Erann Gat 1998: Alfred)
 - **Deliberative Schicht** (Planer)
 - Repräsentation der Zukunft
 - Langsam, Ziel-getrieben
 - **Zwischenschicht** (Sequenzier)
 - Repräsentation der Vergangenheit
 - Abstraktion
 - Fehlererkennung, Alternativerhalten
 - **Reaktive Schicht** (Controller)
 - Kein Zustand, schnell, Sensor-getrieben

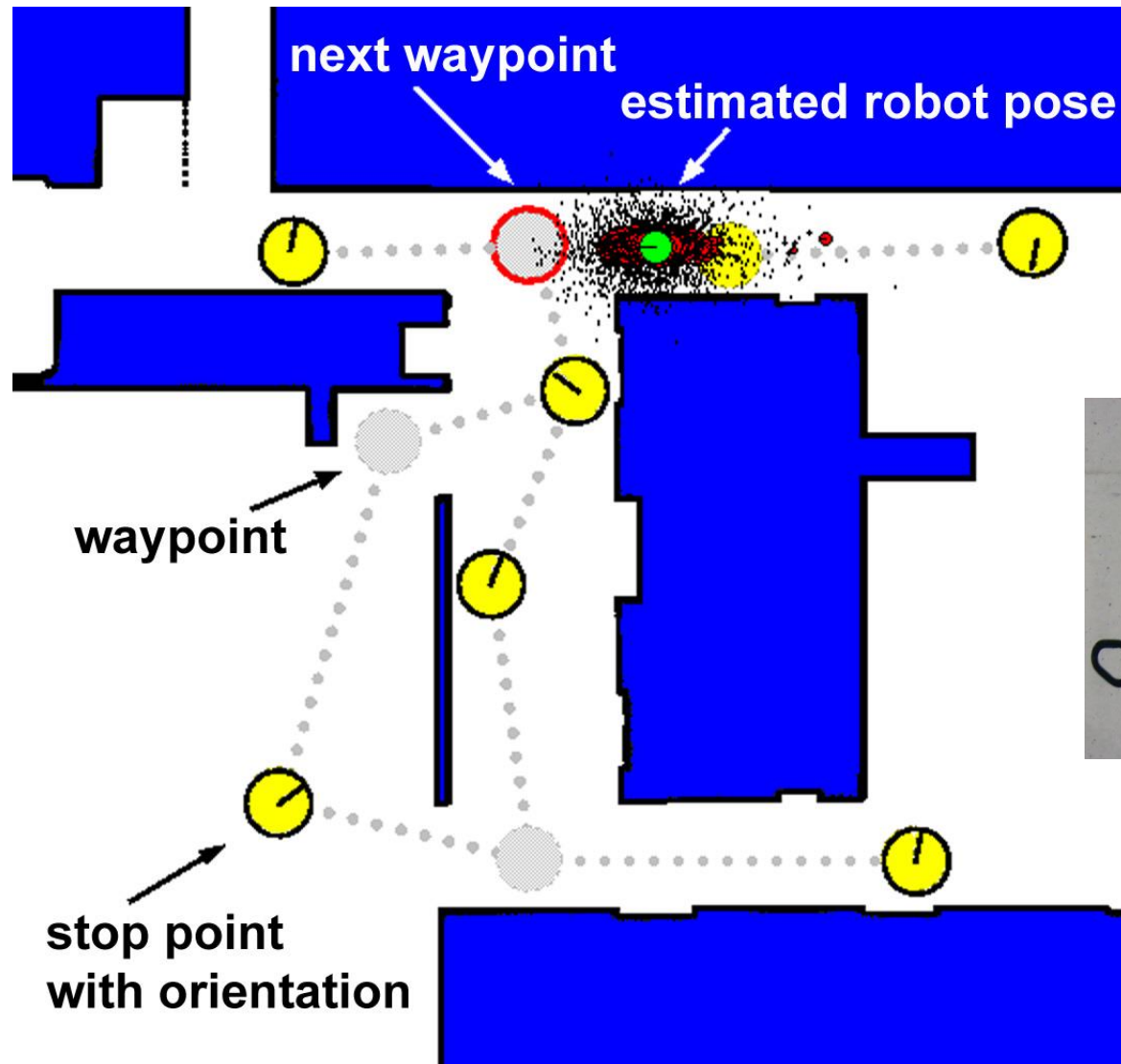
Zweischicht-Architektur zur Navigation



Kartierung der Umgebung



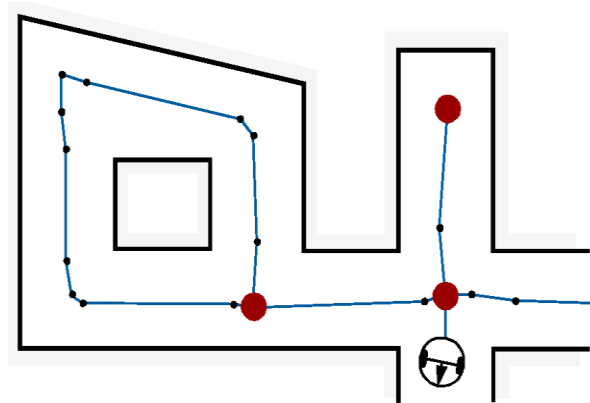
Navigation für Kommunikationsroboter



Überblick Pfadplanung

Routengraphen

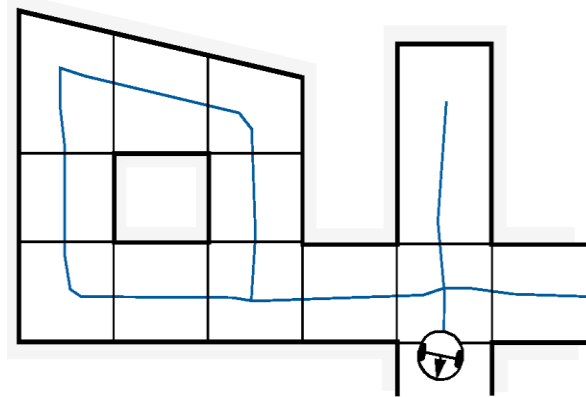
- Knoten und Kanten



- Platzierung der Knoten an ausgezeichneten Stellen
 - Abbiegungen
 - Änderung der Sichtbarkeit

Zelldekomposition

- Unterscheidung von frei und belegt



- Zellengrenzen willkürlich oder von Karte abgeleitet