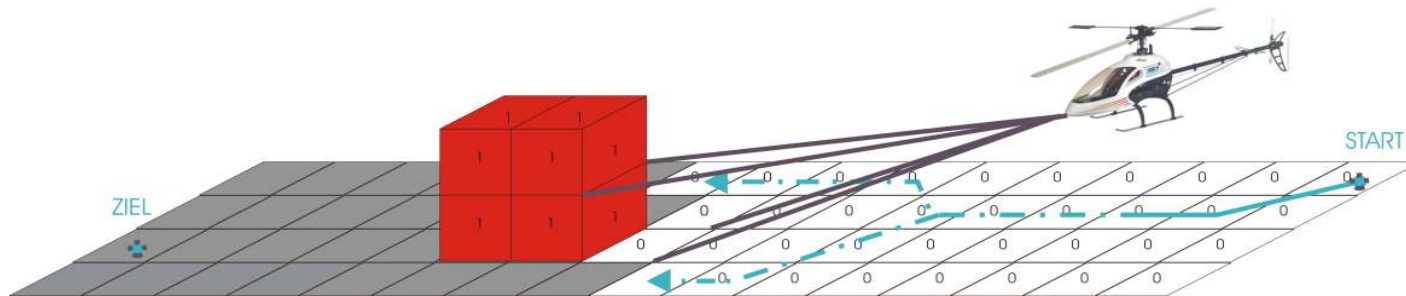


# Routenplanung und Flugführung in unbekannter Umgebung



S. Löchelt, W. Alles, Lehrstuhl für Flugdynamik, RWTH Aachen  
M. Bollwerk, ehem. RWTH Aachen



**UAV-Design unter operationellen Randbedingungen**  
Workshop bei Diehl BGT Defence in Überlingen, 20./21.11.2008

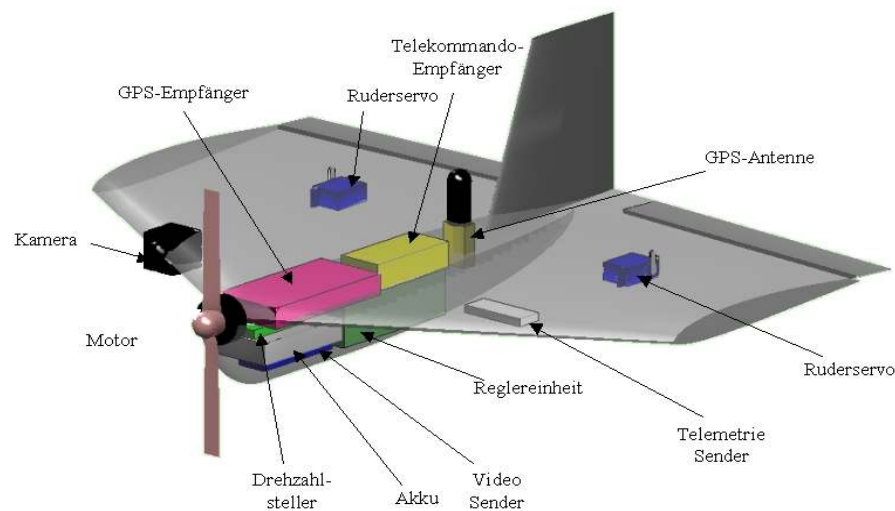
## Übersicht

- Lehrstuhl für Flugdynamik
- Modellhubschrauber
- Modellierung
- Flugregelungs-/Führungssystem
- Problemstellung/Ansatz
- Vergleichbare Projekte
- Implementierung
- Sensor-Konzept
- Simulation Routenplanung/Hindernisvermeidung
- Testfälle
- Zusammenfassung
- Ausblick
- Quellennachweis

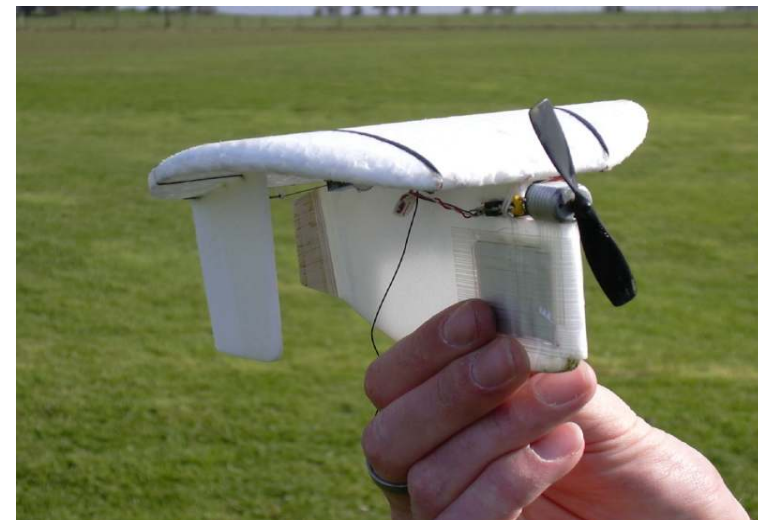
## Lehrstuhl für Flugdynamik I

### Forschungsthemen:

- Entwurf, Modellierung, Identifizierung, Automatisierung und Optimierung für unkonventionelle Fluggeräte
- Schwerpunkt der Arbeiten im Bereich UAV/MAV



Komponentenintegration in ein MAV



MAV 15

## Lehrstuhl für Flugdynamik II

### Versuchseinrichtungen:

- Windkanal Göttinger Bauart bis 70 m/s,
- 6 Komponentenwaagen (Kräfte, Momente)
- Freiflugtechnik (z.B. für Parameteridentifizierung)
- Mess-Bus mit Bodenstation
- Modellwerkstatt und Elektronik-Labor
- Prüfstände für E-Motoren, Servo-Aktuatoren, Akkus



Notebook als Bodenstation



Mess-Bus



Windkanal



Abwurf PHOENIX-Modell



Schleppmaschine

## Lehrstuhl für Flugdynamik III

### Flugsimulatoren:

- Link-Trainer für Instrumentenflug (ohne Sicht)
- Forschungs-Simulator mit Außensicht zur Untersuchung von Flugeigenschafts- und Führungsfragen, Erprobung von Flugreglern sowie Anzeigen- und Bedienelementen



Link-Trainer

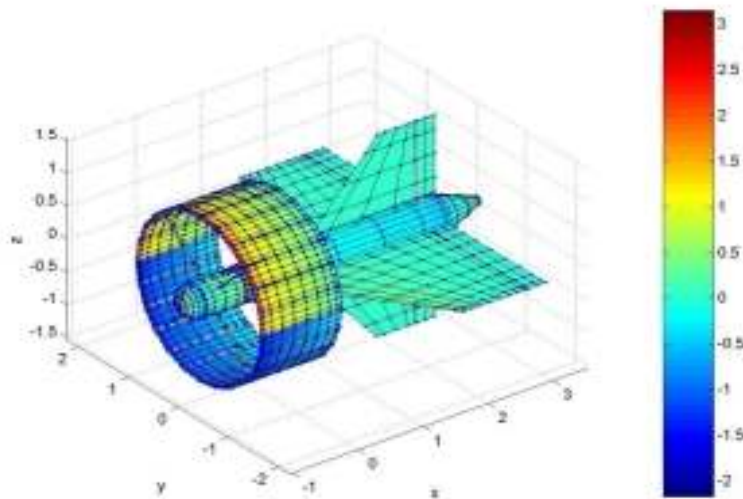


Cockpit-Simulator mit Außensicht

## Lehrstuhl für Flugdynamik IV

### VTOL:

- Hausinterne Projekte und Industriekooperation zu VTOL-UAVs
- Auslegung Flugregelungs-/Führungssystem für EADS-SHARC
- Modellhubschrauber als Testträger im Aufbau für Forschung im Bereich Flugregelung/-führung, Autonomie



MICHEL – VTOL MAV



SHARC – Koaxial-Rotor UAV mit 200 kg Abflugmasse [1]

## Modellhubschrauber I

### Fluggerät:

- Elektrotriebener Modellhubschrauber mit 2-Blatt Rotor, 1.5 m Durchmesser
- Gewicht des Testträgers ca. 5 kg
- Nutzlast mit LiPo-Zellen > 2 kg → kein Zwang zur Miniaturisierung von Komponenten

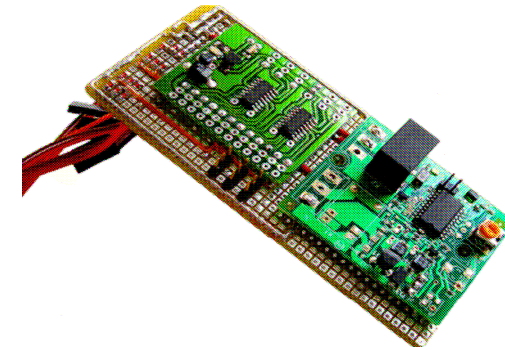


Versuchsträger auf Basis eines elektrogetriebenen Modellhubschraubers

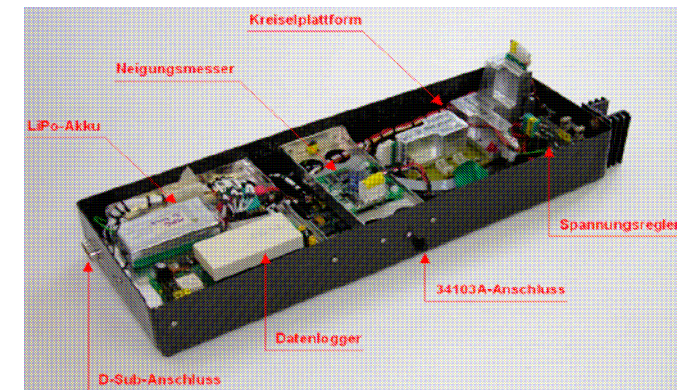
## Modellhubschrauber II

### Flugregelungsbox im Aufbau:

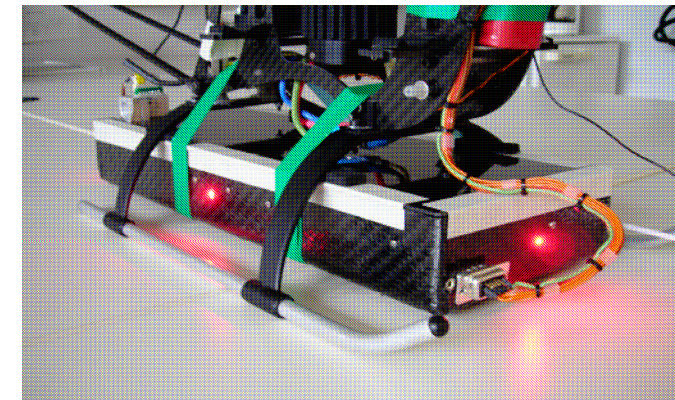
- Signalweiche Reglerbetrieb/  
Manueller Betrieb (Sicherheitspilot)
- Komponenten: Bordrechner, INS-  
Sensorik, Inclinometer, Datenlogger,  
eigene Energieversorgung
- Bordrechner: MPC555 mit  
Development Board, erlaubt  
Programmierung aus  
MATLAB/Simulink
- Modulare Befestigung
- Ausweitung Sensorik (GPS) und  
Datenfunk sowie Missionsrechner/  
sensorik geplant



Signalweiche Regler-/Manueller Betrieb



Komponenten der Flugregelungsbox



Position Flugregelungsbox, Status-LEDs



## Modellierung I

### Flugmechanische Modellierung:

- 6-Freiheitsgrad System erweitert um Blatt-Schlagfreiheitsgrade
- Rotor wird als Momenten- und Kräfteerzeugendes System betrachtet
- Rotor aerodynamik über Blattelementtheorie unter Berücksichtigung der Schlagdynamik
- Rumpfaerodynamik vereinfacht über Widerstandsflächen

### Bewegungsgleichungen

$$\dot{u} = \frac{1}{m}(X - G \sin \Theta) - w \cdot q + v \cdot r$$

$$\dot{v} = \frac{1}{m}(Y + G \cos \Theta \sin \Phi) - u \cdot r + w \cdot p$$

$$\dot{w} = \frac{1}{m}(Z + G \cos \Theta \cos \Phi) - v \cdot p + u \cdot q$$

$$\dot{p} = \frac{L + I_{xz} \dot{r} + (I_y - I_z)qr + I_{xz}pq}{I_x}$$

$$\dot{q} = \frac{M + (I_z - I_x)rp - I_{xz}(p^2 - r^2)}{I_y}$$

$$\dot{r} = \frac{N + I_{xz} \dot{p} + (I_x - I_y)pq - I_{xz}rq}{I_z}$$

### Momentengleichgewicht um Schlaggelenk

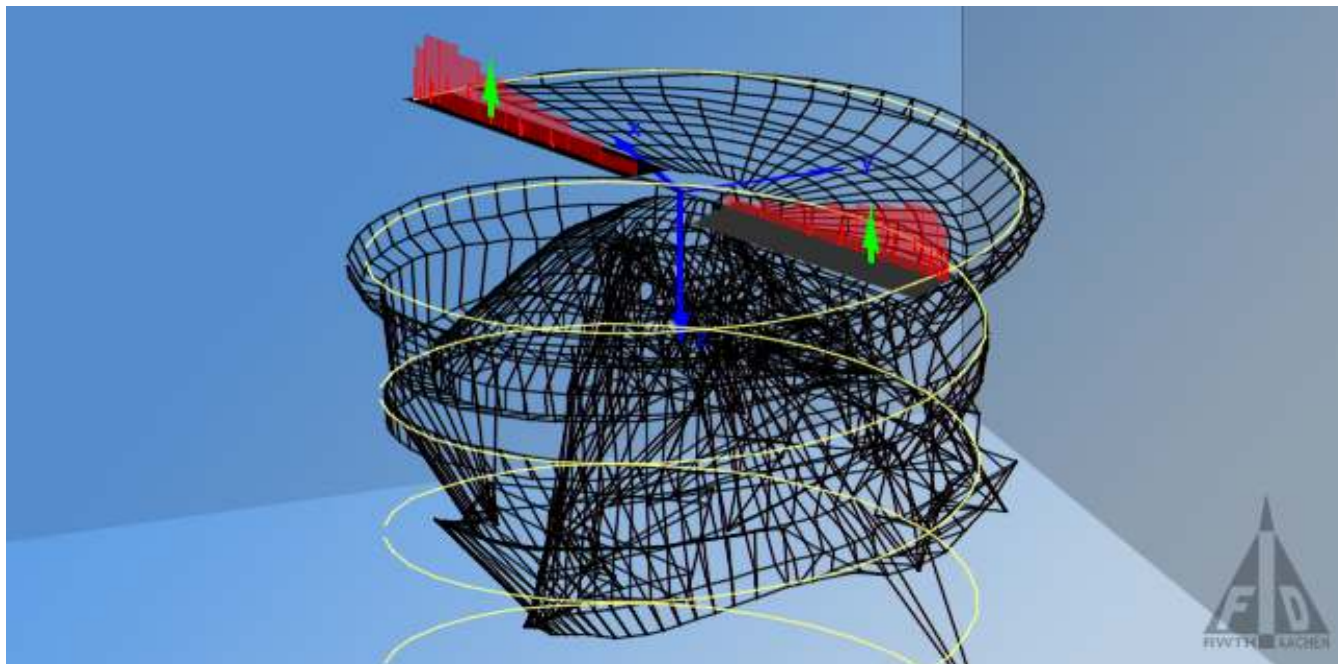
$$\sum M = 0 = M_Z + M_T + M_G + M_A$$

### Schub am Blattelement

$$dS = \frac{\rho}{2} V_t^2 C_a' (\vartheta - \varphi) l dr$$

## Modellierung II

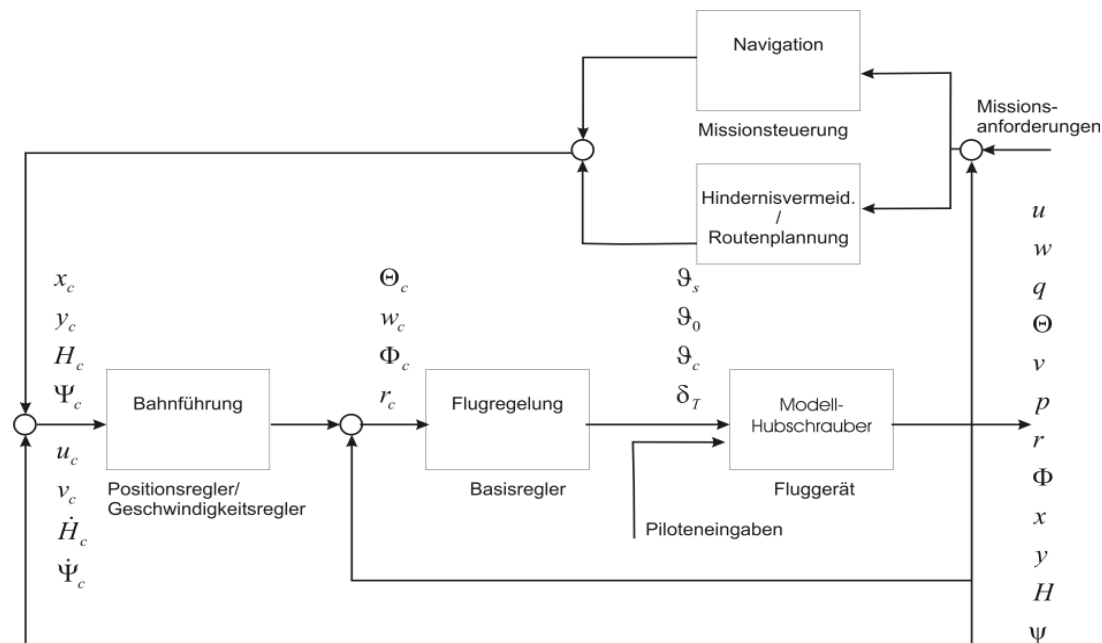
- Alternative Modellierung über Wirbelmethode auf Basis eines „Free-Wake Time Marching“ Ansatzes  
→ Flugmechanik (MPI für Ausführung auf Rechencluster)
- Bodenmodell: Landegestell als Mehrkörpersystem
- Erzeugung linearisierter Modelle zur Analyse und Reglersynthese



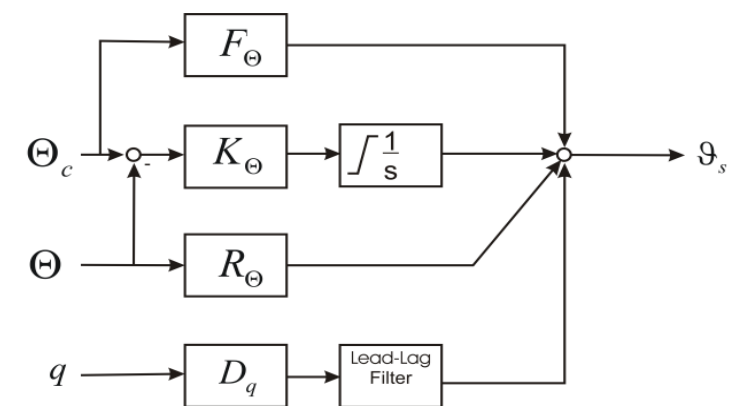
Visualisierung der „Free-Wake Time Marching“ Simulation

## Flugregelungs-/Führungssystem

- Klassischer Kaskadenregler mit Basisregler, Positions-/Geschwindigkeitsregler und Missionssteuerung (Zustandsautomat) bzw. Routenplanungs- und Hindernisvermeidungsmodul
- PID Regler mit Vorsteuerung, Auslegung über Pol-/Nullstellenvorgabe
- Aktueller Schwerpunkt der Forschung auf Mehrgrößenregelung (MIMO)



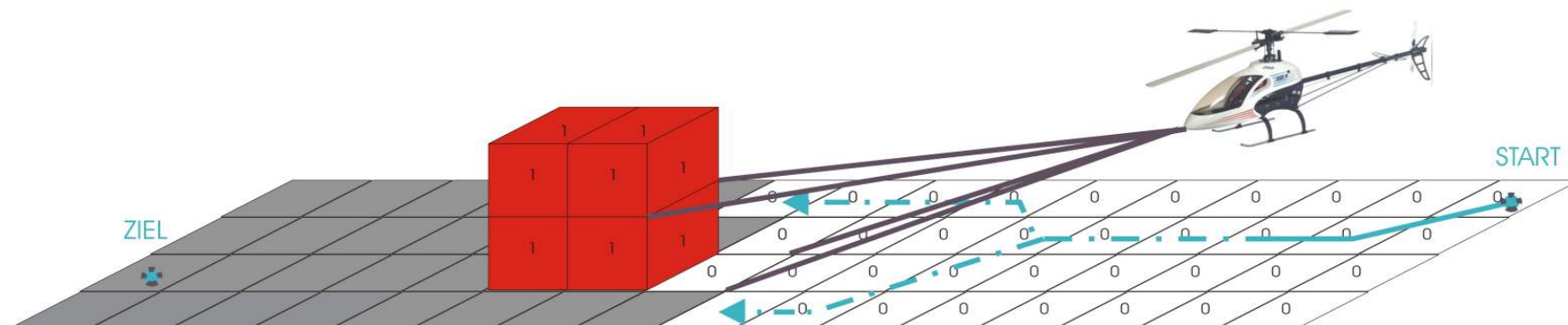
Struktur des Flugregelungs/-führungssystems



PID-Regler mit Vorsteuerung

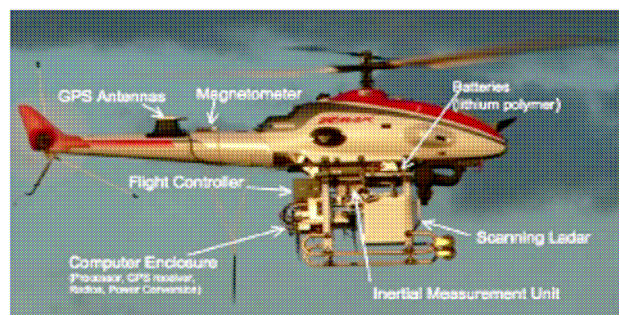
## Problemstellung/Ansatz

- Autonomer Flug zwischen einem bekannten Start- und Zielpunkt durch unbekanntem Raum mit Hindernissen, Hubschrauber kennt eigene Pose
- Weitergehende Anforderungen, z.B. Flug so tief wie möglich
- Hubschrauber wegen weiten Geschwindigkeitsbereichs und guter Agilität
- Aktiver, strahlbasierter Sensor zum Lokalisieren der Hindernisse
- Aufbau einer Hinderniskarte in Form von Wahrscheinlichkeitsmatrizen, Größe orientiert sich an Rechenleistung und Speicherbedarf
- Mit Hilfe dieser Karte Routenplanung für kostenoptimalen Weg

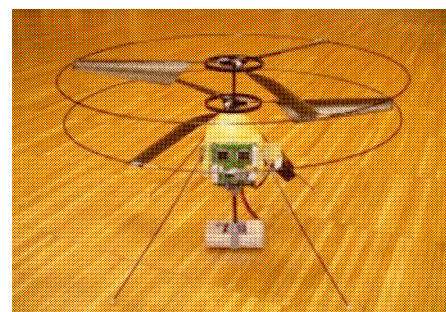


## Vergleichbare Projekte

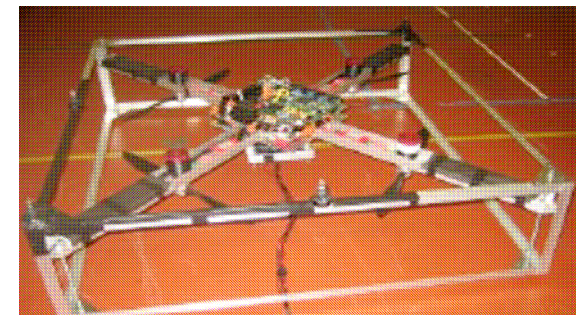
- International Vielzahl an Flächenflug- und Hubschrauber-UAVs für autonomen Flug (Beispiele als nicht repräsentativer Querschnitt)
- Hubschrauber/Drehflügler in der Mehrheit
- Sensorik: CCD-Kameras, Laserscanner, Ultraschall
- PC104-System als Missionsrechner für größere UAV, ansonsten Datenlink zum Boden, getrennter Flugrechner
- Übergang zu heterogenen UAV-Teams (Netzwerkbasierte Operationen)
- Unterschied: Karte ist in vielen Fällen bekannt
- Eigener Ansatz orientiert sich an Carnegie Mellon University



Carnegie Mellon University [2]



ETH Zürich [3]



TU Berlin [4]

## Implementierung

- Implementierung in MATLAB, Simulink, Stateflow, Virtual Reality-Toolbox
- Einschränkungen in Programmiermöglichkeiten, Speicherplatz und Ausführungsgeschwindigkeit, keine dynamischen Speicherstrukturen, keine Parallelverarbeitung
- Vorteil einer einheitlichen Entwicklungsumgebung, insbesondere vor dem Hintergrund einer Konzepterstellung
- Real Time Workshop zur automatischen Generierung von C-Code in der Konzeptionsphase noch nicht genutzt
- Operationelle Software muss in einer MATLAB-unabhängigen, effizienten Hochsprache geschrieben sein, um auch für den 3D-Fall leistungsfähig zu sein

## Sensor-Konzept I

- Aktiver, strahlbasierter Sensor  
(keine Stereo-/CCD-Kamera → Wegfall Bildverarbeitung)
- Generische Betrachtung der Sensoreigenschaften in der Simulation
  - Reichweite
  - Auflösung
  - Aktualisierungsrate
  - Blickfeld
  - Rauschen
- Zusätzliche Anforderungen an Gewicht, Bauraum, Kosten, Energieverbrauch etc.

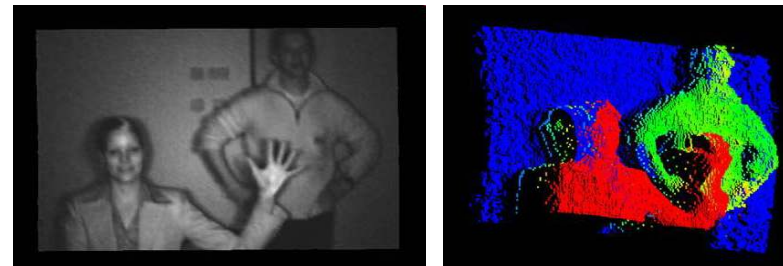
## Sensor-Konzept II

2 mögliche Sensorkonzepte für Modellhubschrauber:

- Laserscanner (schwer, hoher Energieverbrauch, hohe Genauigkeit sowie Reichweite und Sichtbereich, 2D/3D, Kosten)
- PMD-Kamera (klein, geringer Energieverbrauch, geringe Reichweite, Video und Entfernungsbild, 3D)
- Sensorebene (2D) wird schwenkbar in Flugpfadebene angenommen, 360 °Horizontal-Abdeckung, 0.5 °Auflösung



PMD-Kamera [5]



Helligkeits- und Tiefenbild [5]

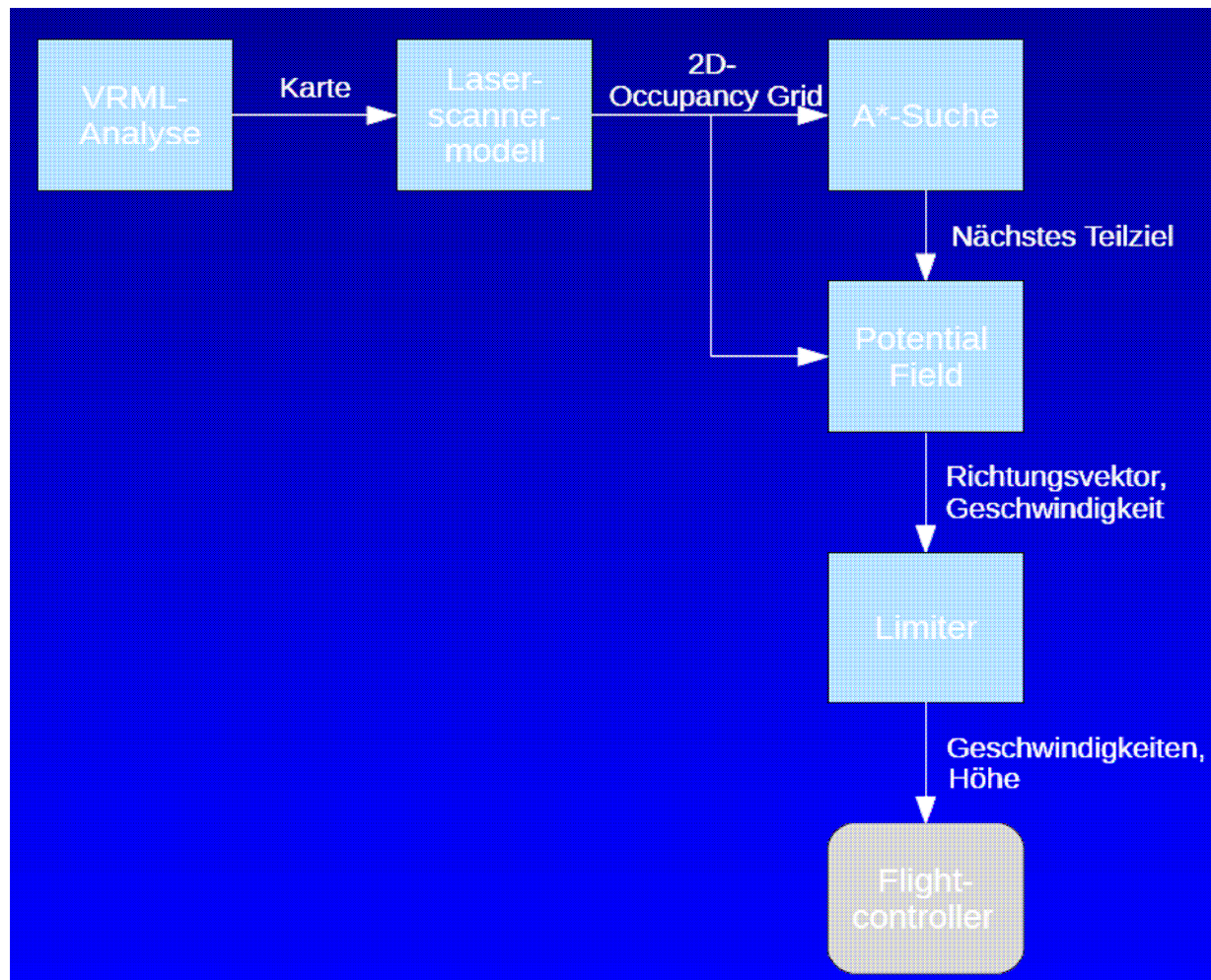


Laserscanner [6]



## Simulation Routenplanung/Hindernisvermeidung I

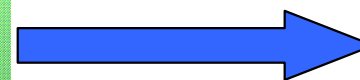
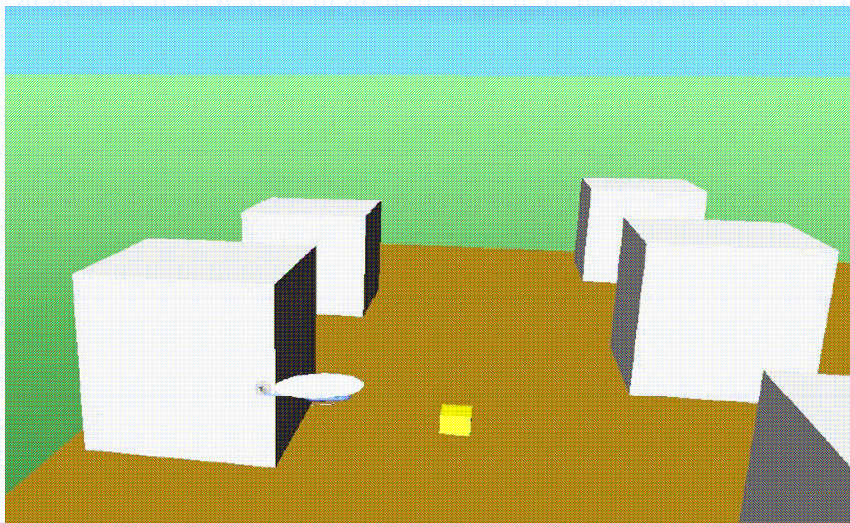
- Softwarestruktur



## Simulation Routenplanung/Hindernisvermeidung II

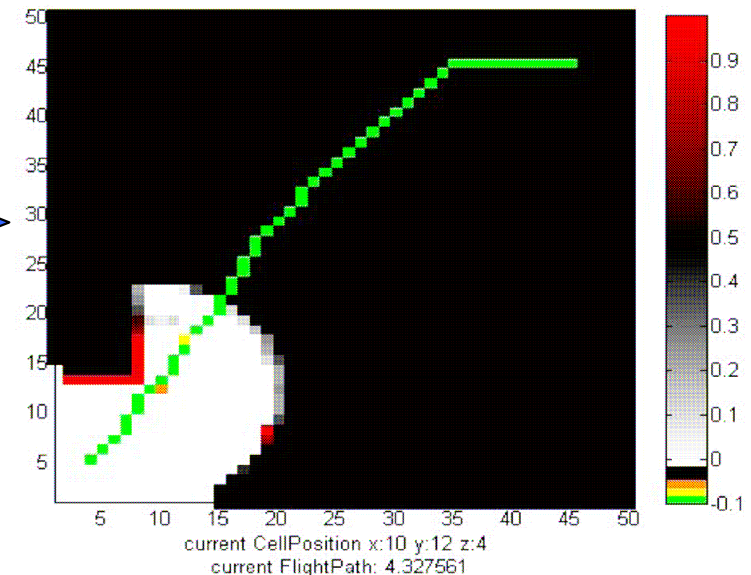
- Hindernisse, die in der VRML definiert und visualisiert sind (3D), werden über das simulierte Raytracing des Sensors in eine Wahrscheinlichkeitsmatrix (Occupancy-Grid) überführt
- Occupancy Grid: Schwarz = Unbekannte Bereiche, Weiß = Freie Bereiche, Rot = Hindernisse, Grün = aktuelle/globale Routenplanung, Orange = Hubschrauber, Gelb = Zwischenziel auf globaler Route

VRML-Visualisierung (3D)



Sensor

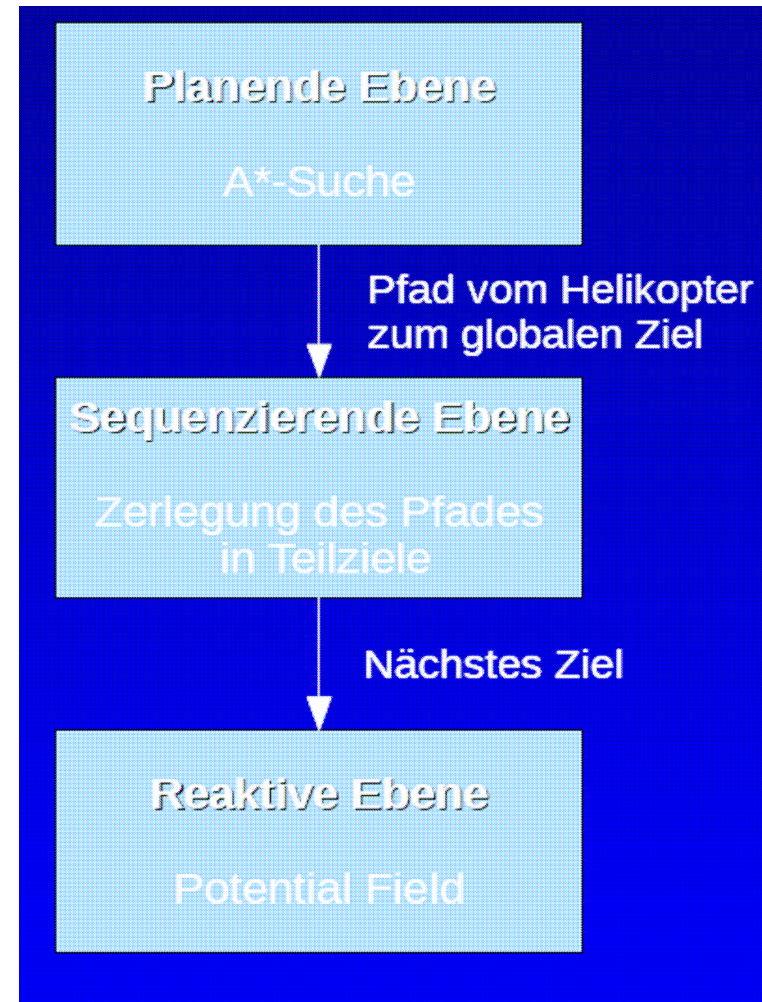
Occupancy Grid (2D)



## Simulation Routenplanung/Hindernisvermeidung III

### 3 stufiger Planungs-Ansatz:

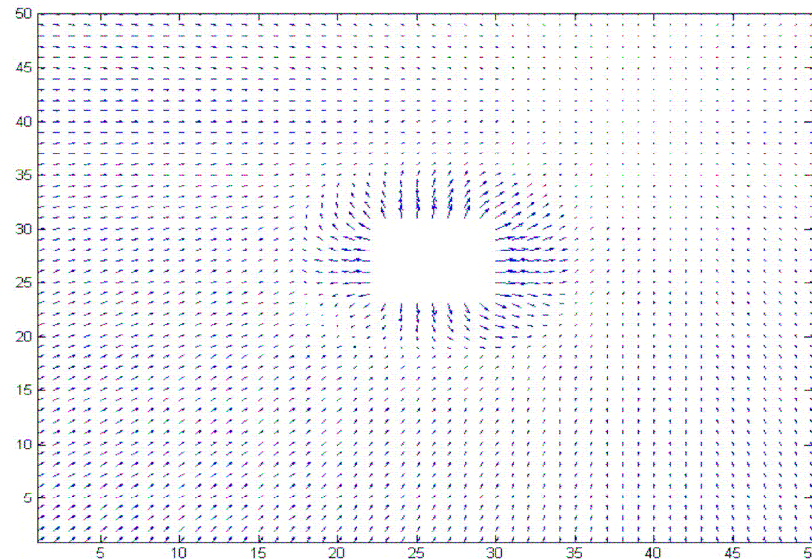
- Globale Routenplanung ( $A^*$ , 2D Planung wegen MATLAB) auf Occupancy Grid
- Sequenzierende Erzeugung von Teilzielen aus der globalen Route, Zwischenziel hat anziehende Eigenschaften, Vermeidung von Totpunkten durch Potential Fields
- Reaktive Ebene über Potential Fields, z.B. auch zum schnellen Ausweichen mobiler Hindernisse
- Zunehmende Aktualisierungsrate von Planender zu Reaktiver Ebene



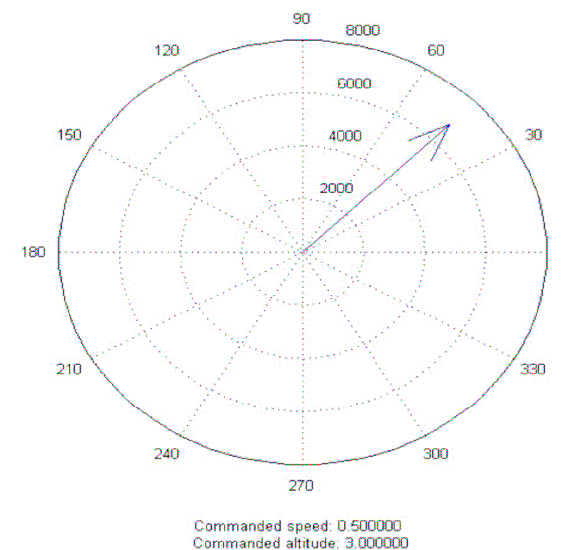
## Simulation Routenplanung/Hindernisvermeidung IV

### Steuerkommandogenerierung für FCS/FGS aus Potential Fields:

- Potential Fields (Ziel als Anziehung, Wände/Hindernisse erzeugen Abstoßung)
- Kraftvektor als „Steuerkommando“ für FCS/FGS (Vorwärtsgeschw., Steuerwinkel, Höhe)
- Begrenzung der Steuerkommandos, Glättung durch Trägheit



Potential Fields



„Kraftvektor“ als Steuerkommando

## Simulation Routenplanung/Hindernisvermeidung V

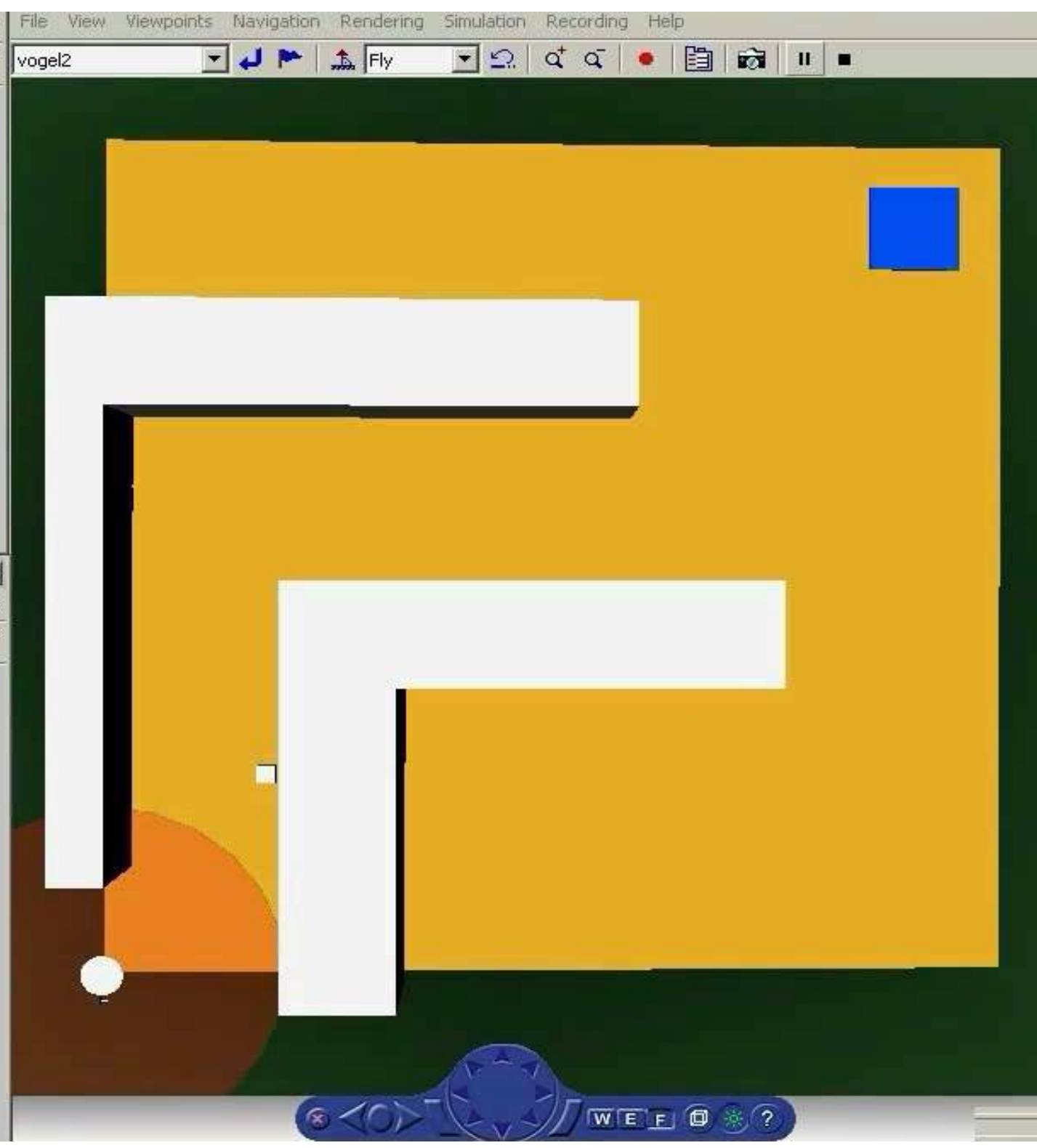
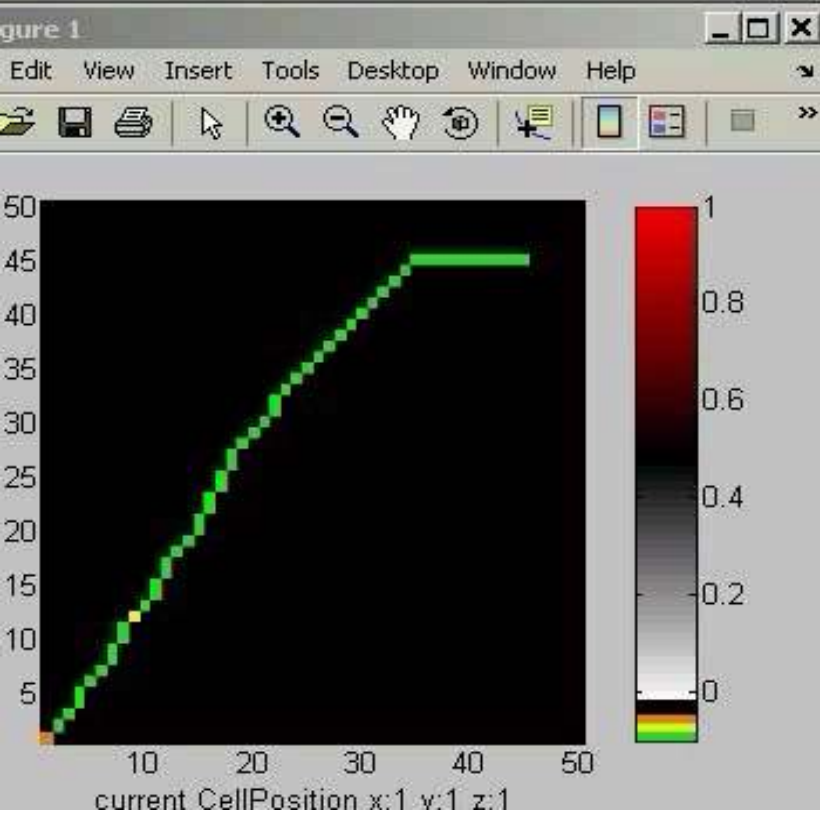
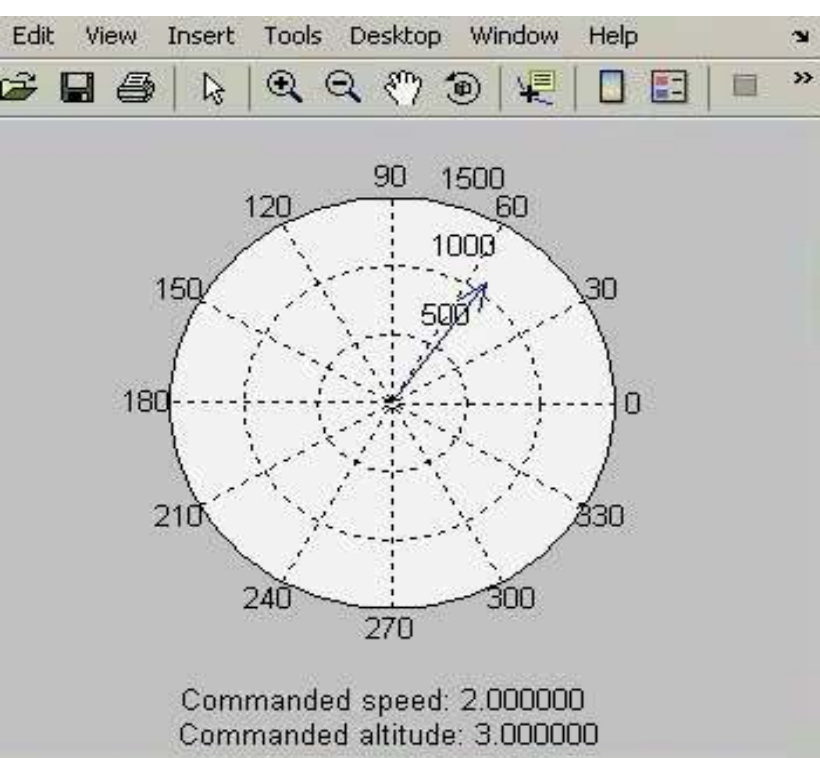
Wichtige Einflussparameter für die Simulation:

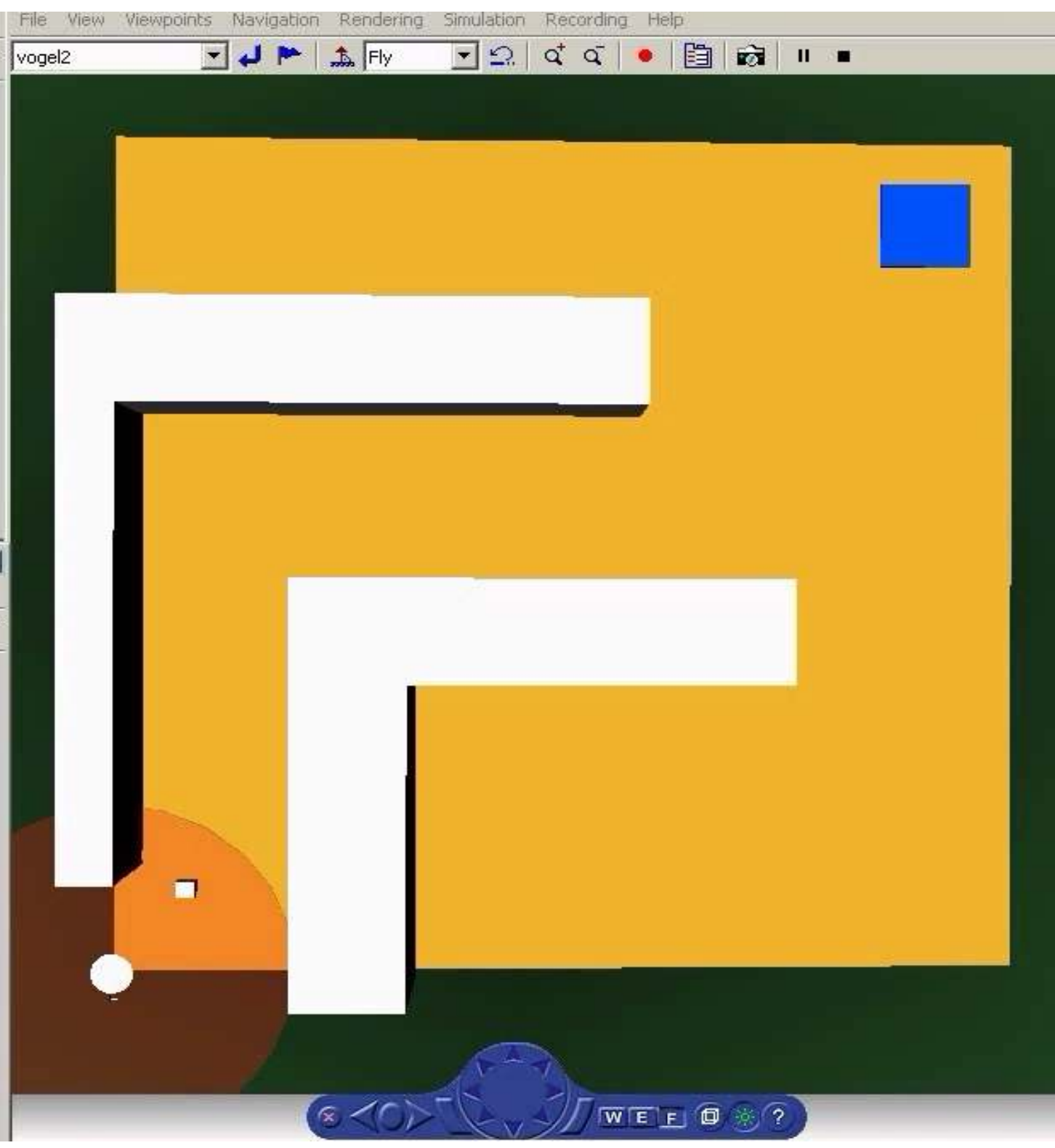
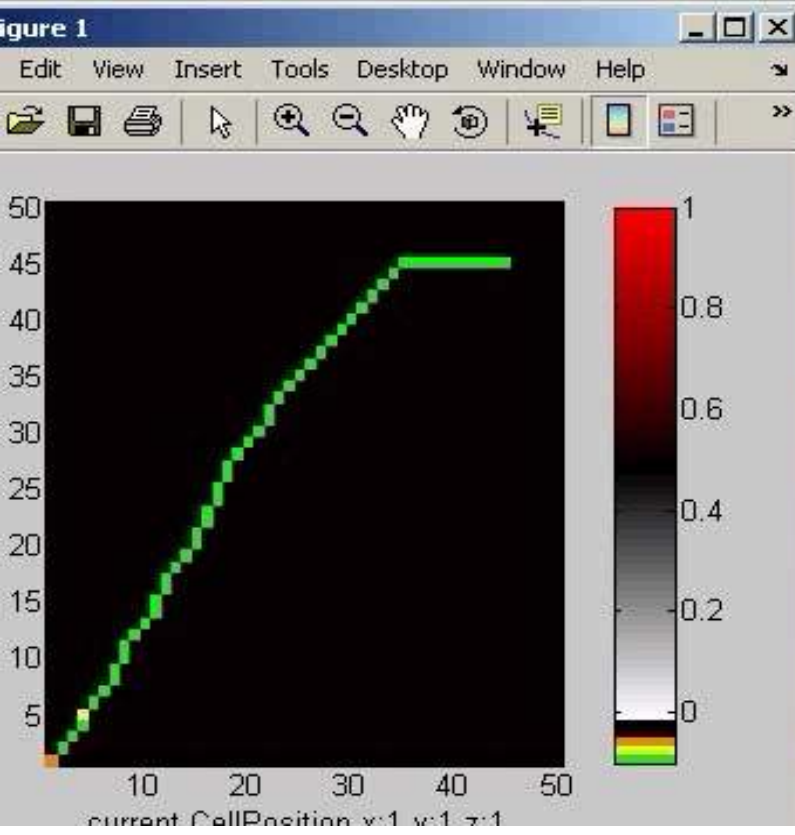
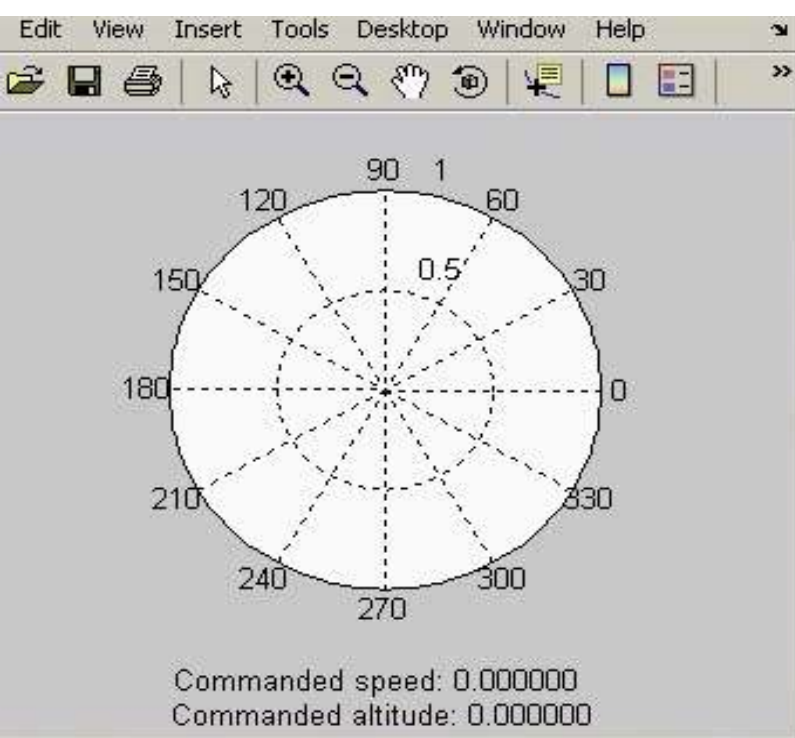
- Sensorreichweite und Genauigkeit, Aktualisierungsrate
  - Agilität des Hubschraubers
  - Genauigkeit Helikopter- und Hindernis-Position
  - Ausführungsrate der 3 Planungs-Schichten
  - Skalierung der „Kräfte“
- Ansatz ist auf Starrflügler übertragbar, allerdings mit stärkeren Einschränkungen und weitergehenden Anforderungen (Energiemanagement, minimale Fluggeschwindigkeit etc.)

## Testfälle

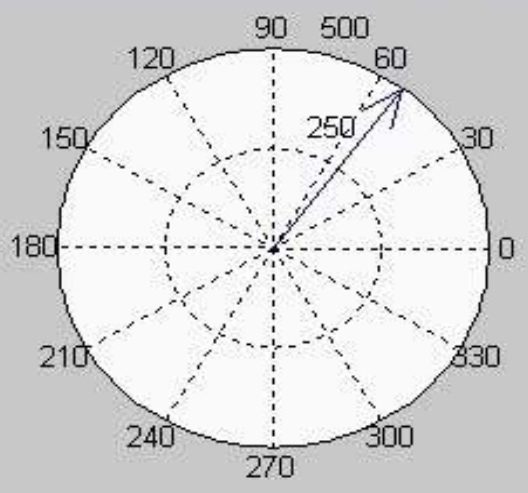
Nachfolgende Videos als Beispiele für unterschiedliche Hindernisszenarien:

- Flur I
- Flur II (ungünstige Parameterwahl)
- Sackgasse
- Vertikales Ausweichen

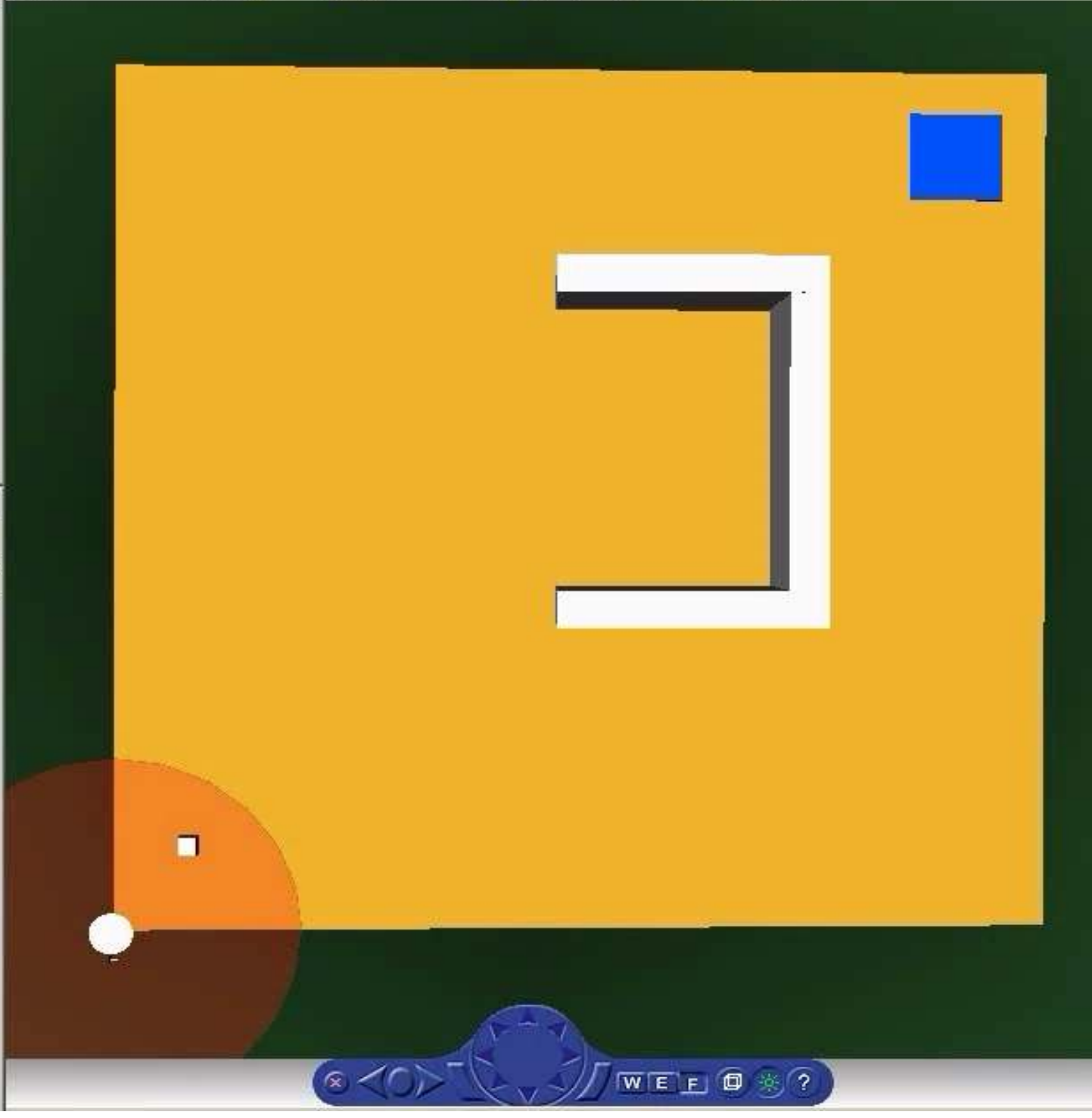
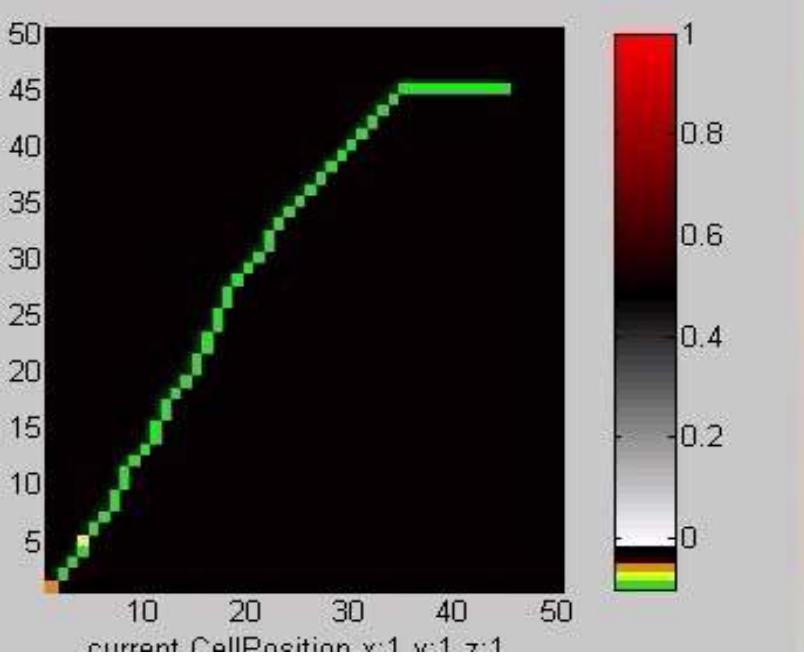








Commanded speed: 1.750000  
 Commanded altitude: 3.000000



## Zusammenfassung

- Simulation für den geforderten Flugbereich des Hubschraubers, linearisiertes Modell aus Laufzeitgründen für Hindernisvermeidungs-Simulation
- Regelungssystem in klassischer Kaskadenstruktur für schwebenahen Flug analytisch ausgelegt
- Allgemeine Konzeption Hindernisvermeidung/Routenplanung erstellt
- Generische Betrachtung von Umwelt, Sensor, Hindernisrepräsentation und Planungsalgorithmen
- Schnittstelle zum FCS/FGS
- Implementierung unter MATLAB, Simulation und Validierung des Konzepts
- Visualisierung der Testfälle
- Wesentliche Einflussparameter bestimmt

## Ausblick

- Weitergehende Parameteranalysen (Untersuchung automatischer Anpassung der Planungsparameter je nach Hindernissituation)
- Reale Sensoreigenschaften bestimmen und in der Simulation bewerten (Rauschen, Genauigkeit, Reflektionseigenschaften etc.)
- Erweiterung auf wirklichen 3D-Fall → Implementierung in effizienter Hochsprache
- Optimierung der Trajektorien
- Auswahl Missionsrechner
- Auswahl Sensorik
- Erweiterung Testträger um Missionsrechner und Sensorik
- Hardware-Schnittstelle zum FCS/FGS
- Anpassung des Konzepts an operationelle Software
- Flugversuch

## Quellennachweis

- [1] EADS Deutschland GmbH, Innovation Works, D-81663 München
- [2] L.J. Chamberlain, S.Saripalli, S. Scherer, S.Singh, „Flying fast and low among obstacles“, In *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*, April 2007
- [3] ALS/ETHZ, Autonomous Systems Lab, Webseite:  
<http://asl.epfl.ch/index.html?content=research/projects/VtolIndoorFlying>, Seite  
besucht am 19.11.2008
- [4] Laboratory For Autonomous Flying Robots, Webseite:  
<http://pdv.cs.tu-berlin.de/lfafr/robots.html/>  
Seite besucht am 19.11.2008
- [5] PMDTechnologies GmbH, D-57076 Siegen
- [6] SICK AG, D-79183 Waldkirch