

MARVINs Sieg im „Millennial Event“

Erfolg durch minimale Lösungen



Marek Musial, Uwe Wolfgang Brandenburg, Günter Hommel

<http://pdv.cs.tu-berlin.de/MARVIN/>
TU Berlin, Prozeßdatenverarbeitung und Robotik

Zusammenfassung MARVIN ist ein autonom fliegender Beobachtungs- und Erkundungsroboter auf Basis eines Modellhubschraubers, der im Rahmen von Projekt-Lehrveranstaltungen für die *International Aerial Robotics Competition* in Hanford, Washington, entwickelt wurde. In diesem Wettbewerb sollen in einem Katastrophenszenario Objekte und Personen lokalisiert werden. Am 30.06.2000 siegte MARVIN in der *Millennial Event* genannten Endausscheidung dieses Wettbewerbs mit Abstand vor neun US-amerikanischen und kanadischen Teams. Dieses Papier zeigt anhand mehrerer Beispiele auf, wie die bei MARVIN verfolgte Beschränkung auf *minimale Lösungen* ausschlaggebend für den Erfolg war. Minimale Lösung bedeutet dabei die Minimierung von Gewicht, Stromverbrauch, Kosten und Systemkomplexität unter Verzicht auf alles, was bei genauer Betrachtung über die gestellten Anforderungen hinausgeht.

1 Einführung

MARVIN ist eine Abkürzung für **M**ulti-purpose **A**erial **R**obot **V**ehicle with **I**ntelligent **N**avigation (intelligent navigierender Vielzweck-Luftroboter). Er ist in mehreren Projekt-Lehrveranstaltungen hauptsächlich von Studierenden der TU Berlin entworfen und gebaut worden für den internationalen Flugroboter-Wettbewerb IARC (*International Aerial Robotics Competition*) [1] in Hanford, Washington. Nach der besten Vorführung im zweiten Qualifikationswettkampf 1999 [5] in Führung, trat MARVIN am 30.06.2000 als Favorit in der Endausscheidung an, die der Veranstalter, die *Association for Unmanned Vehicle Systems International*, als *Millennial Event* angekündigt hatte. MARVIN konnte als einziger Teilnehmer alle gestellten Aufgaben erfüllen und wurde mit dem Preisgeld von 30.000 US-Dollar für den auf drei Jahre angelegten Wettbewerb prämiert.

Gegenstand des Wettbewerbs ist es, in einem simulierten Katastrophenszenario mit Flammen, Wasserfontänen und Rauch eine Such- und Rettungsmission durchzuführen. Die teilnehmenden Roboter müssen dazu autonom das Suchgelände durchfliegen und sowohl Gefahrenquellen als auch menschliche Opfer und Überlebende der Katastrophe aus der Luft erkennen und ihre exakten Positionen übermitteln, so daß eine Rettungsmannschaft eine genaue Anleitung für ihr Vorgehen hätte.

Neben MARVIN waren zur Endausscheidung Teams von neun Universitäten aus den USA und Kanada angetreten. Bei einem Vergleich der Systeme fällt auf, daß im MARVIN-System zahlreiche überraschend einfache und auf den ersten Blick „leistungsschwache“ Komponenten zum Einsatz kamen. Dieses Papier geht auf einige solcher Systemkomponenten näher ein und soll aufzeigen, wie und warum gerade die Wahl

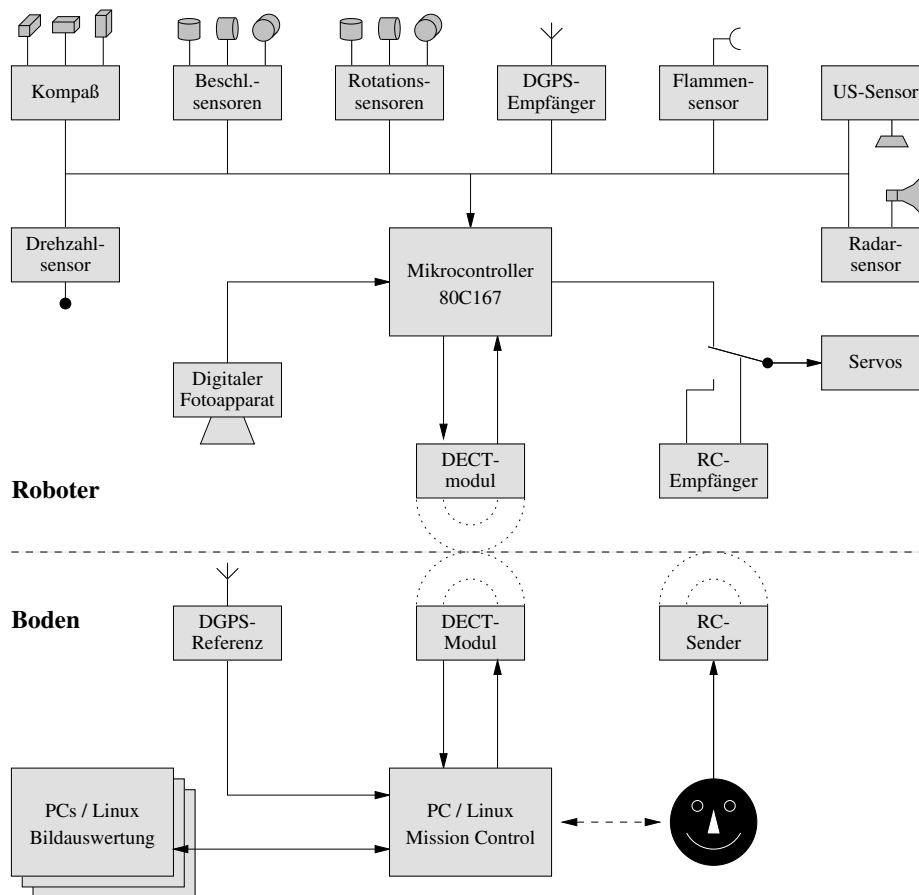


Abbildung1. Überblick über das Gesamtsystem.

solcher *minimaler Lösungen* letztendlich entscheidend für den Wettbewerbserfolg waren. Die betrachteten Lösungen in der Reihenfolge Ihrer Behandlung in den folgenden Abschnitten sind der Bordrechner, die Orientierungssensorik, die Bildaufnahme und die Flugtest-Strategie. Einen Überblick über das Gesamtsystem zur Orientierung gibt Abbildung 1. Details zu den hier nicht behandelten Teilsystemen finden sich in [4, 3, 2, 6].

2 Bordrechner

Sämtliche Konkurrenz-Teams im Wettbewerb verwenden mindestens einen Bordrechner auf Basis einer PC-Architektur. Dies ist zwar zum Teil eine Folge der Absicht, einen auch hinsichtlich der Rechenleistung autonomen Roboter zu konstruieren. Trotzdem sprach vieles gegen diesen Weg: Die Wettbewerbsregeln erlauben explizit die Verlagerung von Berechnungen auf die Bodenstation, eine Bodenstation wird auf jeden Fall

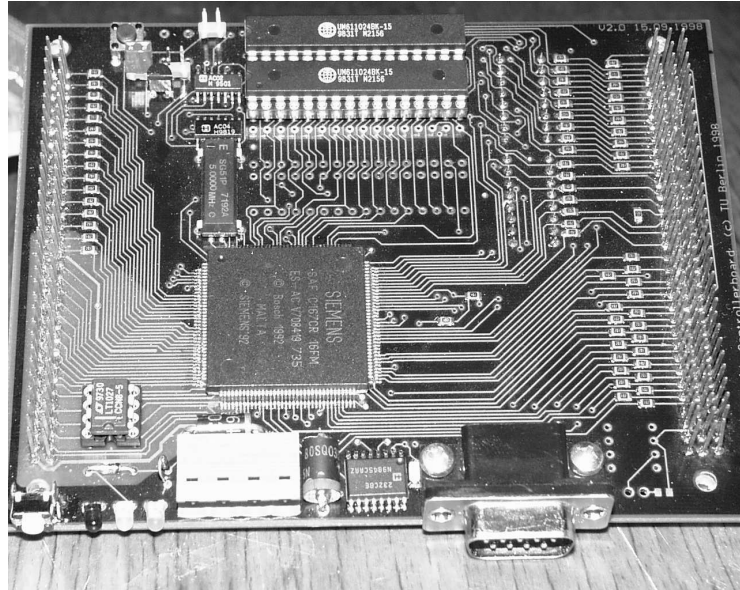


Abbildung 2. Bordrechnerplatine ($13 \times 10 \text{ cm}^2$).

benötigt zur Übertragung der Differential-GPS-Referenzinformationen zum Roboter, und PC-basierte Rechner lassen sich generell relativ schlecht mit den zahlreichen am Roboter vorhandenen Sensoren und Aktoren verbinden.

Statt einer PC-Architektur trägt MARVIN daher einen 80C167-Mikrocontroller von Infineon als einzigen Bordrechner. Dieser Ein-Chip-Computer sorgt für die gesamte Peripherieanbindung und führt außerdem die Software zur Flugregelung aus. Zusatz-Controller sind nicht erforderlich, nur ein UART (*universal asynchronous receiver and transmitter*) mit 4 seriellen Schnittstellen unterstützt den C167. Hier einige Daten des Controller-Chips:

- 10 Millionen Instruktionen pro Sekunde in 16 bit
- A/D-Umsetzer mit 16 Analogeingängen, über 100 kHz maximale Abtastrate
- 32 Compare-Capture-Ein-/Ausgänge, die Rechtecksignale erzeugen oder vermessen können, ohne CPU-Last zu erzeugen
- 128 KByte Flash-ROM bei der benutzten Version
- Möglichkeit, Peripherieereignisse ohne Eintritt in eine Interrupt-Routine durch einzelne vorprogrammierbare Speicher- oder Registertransfers zu beantworten
- ca. 1 W Leistungsaufnahme

Abbildung 2 zeigt die im Rahmen des MARVIN-Projektes speziell entwickelte Rechnerplatine mit dem C167. An Bord von MARVIN sind drei Kompaßsensoren, sechs Servos, der Drehzahlsensor, der Feuersensor und das Ultraschallsonar an die digitalen Compare-Capture-Leitungen angeschlossen, während drei Beschleunigungssensoren, drei Rotationssensoren und das Radar analog durch den A/D-Umsetzer ausgewertet werden. Die Abtastrate dieser Analogeingänge wird zwischen 25 kHz und

100 kHz umgeschaltet. Letztere Rate wird für das Ausgangssignal des Radarsensors benötigt, das nach jeweils 128 Abtastpunkten ebenfalls auf dem C167 einer Fast-Fourier-Transformation (FFT) unterzogen wird. An den zusätzlichen seriellen Schnittstellen hängen der GPS-Bordempfänger, zwei Datenfunkmodule und die Bordkamera, ein digitaler Fotoapparat. Die Schnittstelle zur Bordkamera wird mit 230 kbit/s, der maximal möglichen Datenrate der Kamera, betrieben. Mit dieser Datenrate müssen die Bilddaten vom Bordrechner in Pakete zerlegt, mit Prüfsummen versehen und über die beiden Funkmodule zur Bodenstation gesendet werden. In der aktuellen Konfiguration ist der Bordrechner mit allen diesen Aufgaben im Mittel zu etwa 15% ausgelastet, mit einzelnen Spitzenwerten von nicht mehr als 35%.

Ein Betriebssystem wird auf dem C167 nicht verwendet, alle Tasks laufen periodisch mit 20 Hz aus einer Hauptschleife heraus. Durch das Flash-ROM auf dem C167 konnte die Bordrechner-Software im Wettbewerb mit Anlagen der Betriebsspannung gestartet werden, ohne daß ein Bootvorgang per PC nötig war.

3 Orientierungssensorik

Ein Helikopter weist grundsätzlich eine labile Fluglage auf. Seine Hochachse muß in einem Regelkreis aktiv in etwa senkrecht gehalten werden. Daher benötigt die Flugregelung ständig nicht nur den Gierwinkel des Roboters, sondern auch die Nick- und Rollwinkel. Das Bord-GPS mit einer einzigen Antenne kann hingegen nur Positions- und keine Orientierungsdaten liefern. Zur Messung der Orientierung dienen allgemein sogenannte Kreiselsysteme, oft als Teil eines sogenannten inertialen Navigationssystems (INS).

Weil die Winkelmessung hier über die Integration gemessener Rotationsraten erfolgt, sind hochgenaue Rotationssensoren (Kreisel) erforderlich, damit die über die Meßdauer unvermeidliche Fehlerakkumulation den Meßwert nicht zu stark verfälscht. Die genauesten verfügbaren Sensoren, Laserkreisel, nutzen die Phasenverschiebung zwischen Lichtsignalen auf verschiedenen Wegen. Sie sind so teuer, daß ein Einsatz auf MARVIN von vornherein nicht infrage kam (typischerweise viele zehntausend Mark für alle drei Achsen).

3.1 Aufbau der Sensorik

Für das MARVIN-Projekt wurde daher eine spezielle Orientierungssensorik aus sehr preiswerten Sensorkomponenten entworfen und aufgebaut, mit einem Materialwert von ca. 400 DM. Anfangs war noch nicht einmal klar, ob eine Flugregelung für einen Helikopter mit einer derart preiswerten Orientierungssensorik überhaupt möglich ist. Die Entwicklung basierte auf folgenden technischen Ansätzen:

- Die Nick- und Rollwinkel des Helikopters können regelmäßig über die Richtung der Erdbeschleunigung (Vertikale) driftfrei kalibriert werden.
- Der Gierwinkel des Helikopters, der nicht aus der Lage der Vertikalrichtung im Helikoptersystem hervorgeht, läßt sich mit Hilfe des Erdmagnetfelds bestimmen und somit driftfrei kalibrieren.

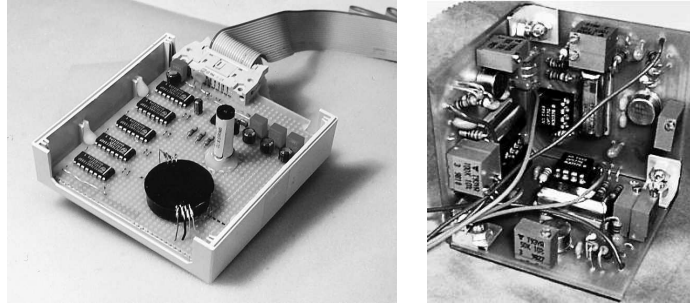


Abbildung 3. Der elektronische Kompaß (links) und die Rotations- und Beschleunigungssensorik (rechts).

Die Genauigkeitsanforderungen der Flugregelung sind dabei denkbar gering: Da die Flugregelung äußere Einflüsse wie Wind ohnehin durch Vorhaltewinkel im Nick und/oder Roll ausgleichen muß, sind Meßfehler dieser beiden Orientierungswinkel bis zu $\pm 5^\circ$ tolerierbar, solange sich diese Fehler nicht zu schnell ändern. Der Gierwinkel ist noch unkritischer, weil er sich nicht auf die Lagestabilität des Roboters auswirkt. Hier kann selbst mit $\pm 20^\circ$ Meßfehler noch ohne weiteres geflogen werden.

Aus dem bisher gesagten kann der erforderliche Aufbau der Orientierungssensorik abgeleitet werden als Kombination von jeweils drei Rotations-, Beschleunigungs- und Magnetfeldsensoren:

- Als *Beschleunigungssensor* kommt der ADXL05 von Analog Devices zum Einsatz. Er funktioniert auf der Basis einer variablen Kapazität in einer Halbleiterstruktur und hat einen Meßbereich von ± 5 g, ist aber auch gut für Messungen innerhalb von ± 1 g geeignet. Für ihn sprechen das geringe Gewicht von 5 g, die geringe Nichtlinearität um 0,2 % und seine Temperaturstabilität.
- Als *Rotationssensor* verwendet MARVIN den Piezo-Gyrosensor Murata ENC05E(A). Der Sensor ist mit 2,7 g extrem leicht, klein und kostet nur rund 50 DM. Der Meßbereich umfaßt laut Datenblatt $\pm 90^\circ/\text{s}$, geht tatsächlich aber deutlich darüber hinaus, wobei die Linearität auch für $\pm 180^\circ/\text{s}$ noch ausreichend gut ist (Fehler $< 5\%$). Das Ausgangssignal skaliert mit $1,11 \text{ mVs}/^\circ$.
- Als *Magnetfeldsensor* kommt des elektronische Resonanz-Fluxgate FGM-1 von Speake & Co. Ltd. zum Einsatz. Der Sensor bietet ein frequenzveränderliches TTL-kompatibles Ausgangssignal um 80 kHz. Zur problemlosen Weiterverarbeitung im Mikrocontroller wurde ein 1:1000-Teiler vorgeschaltet.

Abbildung 3 zeigt die fertigen Schaltungen des Kompaß und der Rotations- und Beschleunigungssensorik.

3.2 Ergebnisse

Mit der beschriebenen Orientierungssensorik funktioniert die Flugregelung für MARVIN einwandfrei. Die von den Beschleunigungssensoren bewirkte Driftkompensation bringt den Fehler für Nick und Roll nach kurzer Ruhelage des Helikopters schnell unter

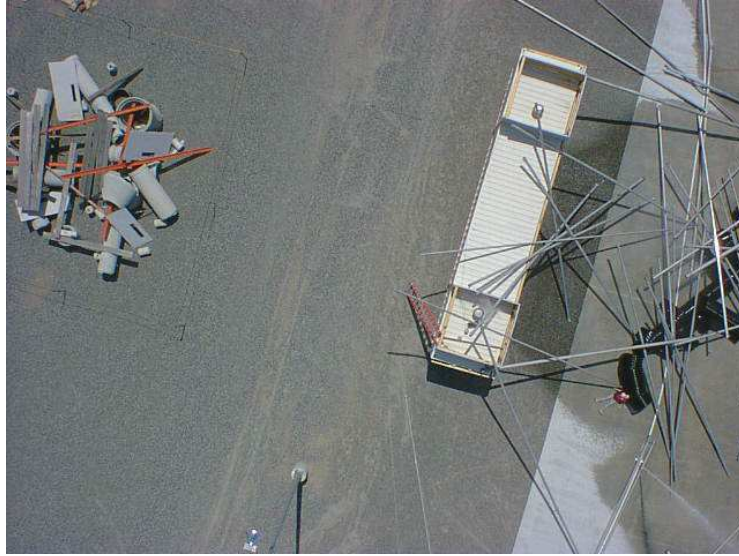


Abbildung4. Luftaufnahme aus dem 2000er Wettbewerbsflug. Auflösung 640×480 Bildpunkte.

1° . In der Bewegung können aber kurzfristig größere Fehler auftreten, die bis zu 4° erreichen. Dies wird deutlich bei der Umrechnung der Bildkoordinaten erkannter Objekte in Weltkoordinaten; für diesen Zweck stellt die Meßgenauigkeit der Orientierungswinkel ein viel größeres Problem dar als für die Regelung. Der Meßfehler des Gierwinkels ist deutlich schlechter: Kurz nach einer manuellen Kalibration der Magnetfeldsensoren liegt er zwar regelmäßig unter 5° , kann aber nach Stunden – vermutlich wegen noch ungelöster thermischer Probleme – auch 30° Fehler erreichen.

4 Bildaufnahme

Während alle Konkurrenz-Teams, die Vorrichtungen zur Bildauswertung in ihren Systemen integriert hatten, Videokameras verwendeten, kommt bei MARVIN ein handelsüblicher digitaler Fotoapparat zum Einsatz. Das verwendete Modell ist eine VPC-X350 von Sanyo. Diese Kamera macht Bilder mit 640×480 oder 1024×768 Punkten Auflösung, läßt sich über eine serielle Schnittstelle mit max. 230 kbit/s fernsteuern und die Bilder auslesen, wiegt einschließlich zweier Mignon-Akkus nur rund 250 g und kostete 800 DM. In der Wettbewerbsmission wird die kleinere Auflösung 640×480 verwendet, in der alle 5 s ein JPEG-komprimiertes Farbbild von ca. 50 KByte Größe aufgenommen und zur Bodenstation gesendet wird.

Gegenüber der Bildaufnahme mit einer Videokamera hat diese Vorgehensweise eine Vielzahl von Vorteilen:

- Bessere Bildqualität. Videokameras liefern typischerweise 625 Zeilen im Interlace-Verfahren, also eigentlich nur 312 nutzbare Bildzeilen.

- Störungsfreiheit. Videobilder würden sich im Rahmen des MARVIN-Systems nur analog übertragen lassen, und analoge Bildübertragungen sind sehr anfällig für Übertragungsstörungen, die die Weiterverarbeitung der Bilder erheblich erschweren.
- Gewichts- und Energieersparnis. Eine Videokamera zusammen mit einer dedizierten Videoübertragungsstrecke sind zwei Komponenten, die zusammen deutlich mehr Gewicht und Stromverbrauch verursachen würden als bei der gewählten Lösung.
- Systemkomplexität. Die digitale Fotokamera kann direkt per serieller Schnittstelle an den Bordrechner angeschlossen werden und die ohnehin benötigte Datenfunkstrecke mitbenutzen. Ferner entfällt eine Bilddigitalisierung in der Bodenstation. Das reduziert die Komponentenzahl und die Ausfallwahrscheinlichkeit.
- Flexibilität. Es können Aufnahmen mit unterschiedlicher Auflösung gemacht werden, z. B. Übersichtsbilder aus großer Höhe, die an entfernteren Punkten aufgenommen werden, mit höherer Auflösung als Detailbilder, die in schnellerer Folge benötigt werden.

Die niedrige „Bildrate“ von 0,2 Bildern/s ist dabei kein Problem, da zwischen zwei auszuwertenden Aufnahmen ohnehin ein Ortswechsel des Helikopters erfolgen sollte. Die Bildauswertung wird bei MARVIN nicht für zeitkritische Entscheidungen verwendet. Abbildung 4 zeigt zum Beweis der Bildqualität eine Originalaufnahme vom diesjährigen Wettbewerbsflug.

5 Flugtest-Strategie

Die erste – und größte – Hürde bei der Verwirklichung von MARVIN war der autonome Flug, also der Entwurf und die erfolgreiche praktische Umsetzung der Flugregelung. Da die Flugdynamik eines Helikopters kompliziert ist, eine Vielzahl von Modellparametern enthält und aus vielen Einzeleffekten zusammengesetzt ist, von denen die meisten im Hinblick auf ein *geregeltes System* tatsächlich ohne Bedeutung sind, wurde kein mathematisches Modell der Regelstrecke für den Reglerentwurf herangezogen. Statt dessen wurde eine Reglerhierarchie mit stückweise linearen Transferfunktionen entworfen (Details in [7]) und zunächst gegen eine stark vereinfachte Simulation – aus lediglich 30 Zeilen C – getestet. Zur Optimierung der Parameter waren die anschließenden Tests am realen Fluggerät von entscheidender Bedeutung.

Mehrere Konkurrenz-Teams haben technische Vorkehrungen getroffen, um die Regelung einzelner Steuerfunktionen getrennt testen zu können. Dazu gehören beispielsweise getrennte Umschalter für die verschiedenen Servo-Eingangssignale oder die Verwendung rotierender Plattformen für den Test der Heckrotorregelung am Boden. Demgegenüber kann bei MARVIN nur die gesamte Steuerung auf einmal umgeschaltet werden zwischen einer „normalen“ Fernsteuerung und dem Bordcomputer, und zwar über einen einzelnen, sonst freien Fernsteuerungskanal. Ein typischer Versuchsflug läuft folgendermaßen ab: MARVIN wird manuell von einem sehr erfahrenen Modellhelikopterpiloten gestartet und in mindestens 20 m Höhe in der Standschwebe gehalten. Der Bordcomputer übernimmt auf Funkbefehl alle Steuerfunktionen, während alle relevanten Zustandsgrößen des Systems (Position, Geschwindigkeit, Reglerausgaben und vie-

les mehr) in einer Art Flugschreiberdatei auf der Festplatte eines Bodenrechners aufgezeichnet werden. Der menschliche Sicherheitspilot kann, sofern sich unerwünschtes Flugverhalten zeigt, durch Umlegen eines Schalters auf der Fernsteuerung sofort die Kontrolle über den Helikopter zurückgewinnen. Bei 20 m Flughöhe hat er stets genügend Zeit, MARVIN sicher abzufangen, egal welche Fehler bei der Regelung aufgetreten sind. Dieser einfache und auf den ersten Blick recht gewagte Ansatz zum Testen und Optimieren der Regelung hat sich als äußerst zuverlässig erwiesen und nie zu Schäden geführt. Gegenüber komponentenweisen Testprozeduren hat er folgende Vorteile:

- Einfachere Technik. Zum Umschalten von bis zu sechs Einzelfunktionen hätte, mangels freier Schaltfunktionen, eine weitere Funkstrecke verwendet werden müssen.
- Effizienz. Weil stets alle Reglerfunktionen einbezogen waren und anhand der Datenaufzeichnung später überprüft werden konnten, konnte die Regelung mit einer minimalen Zahl von Teststunden zum Erfolg entwickelt werden. Jeder Test einer einzelnen Komponente erfolgt unter eingeschränkt realistischen Bedingungen und wäre mithin weniger aussagekräftig.
- Anforderungen an den Piloten. Die Umschaltung *einzelner* Funktionen im Flug stellt viel höhere Anforderungen an den menschlichen Sicherheitspiloten, weil ein *teilweise* von ihm gesteuerter Helikopter in ungewohnter Weise reagiert. Beim verwendeten Ansatz reduziert sich die Zusatzanforderung auf das Erkennen einer unerwünschten Fluglage und das Abfangen – Fähigkeiten, die der Pilot auch bei Komponententests benötigen würde und die ohnehin in der Praxis des „normalen“ Modellflugs verwurzelt sind.

Natürlich bedingt der nicht modellbasierte Reglerentwurf eine höhere Zahl von Testzyklen am echten Roboter mit Änderungen an den Reglerparametern. Um diese Testzyklen zu beschleunigen, sind die Reglerparameter in einer Textdatei festgelegt. Nach einer Parameteränderung wird diese Datei von einem Hilfsprogramm parsiert und der Parametersatz über die Datenfunkstrecke zum Helikopter übertragen. Dies kann sogar geschehen, während MARVIN noch in der Luft ist – allerdings unter manueller Kontrolle.

Abbildung 5 zeigt einen kleinen Ausschnitt aus der Parameterdatei und die resultierenden Transferfunktionen. Dieser Ausschnitt legt fest, wie die Sollwerte für den Nick- und Rollwinkel aus den Längs- und Querpositionsfehlern und -geschwindigkeiten im Standschwebemodus ermittelt werden. Wie man sieht, ist die Parameterdatei als Folge von Symboldefinitionen aufgebaut. Das Symbol Bqs definiert im wesentlichen Grenzen des Ausgabewertes. In den folgenden zwei Zeilen stehen die Eingabewerte für Positionsfehler und Geschwindigkeit in mm bzw. mm/s, also gewissermaßen die Stützpunkt-*x*-Koordinaten. Die folgenden vier Zeilen bilden je eine Funktion für einen Ausgabewert und eine für ein Ausgabeinkrement als Antwort auf Position und Geschwindigkeit, also die *y*-Koordinaten der Stützpunkte für insgesamt vier Transferfunktionen, in $0,1^\circ$ bzw. $0,1^\circ/\text{s}$. Mit den „*-“ wird eine ursprungssymmetrische Fortsetzung der Funktionen ohne textuelle Redundanz erzeugt. Außerhalb der äußeren Stützpunkte sind die Transferfunktionen konstant.


```

# Controller Bqs, Bps: pointmode
Bqs = -200 200 -250 250 12

ipq = -1000 -200 *-
ipq1 = -5000 -1000 *-

op = 80 50 *-
op1 = 100 60 *-
oi = 12 4 *-
oi1 = 15 5 *-

Bqs_pq = ipq op ipq1 op1 ipq oi ipq1 oi1
Bps_pp = Bqs_pq

```

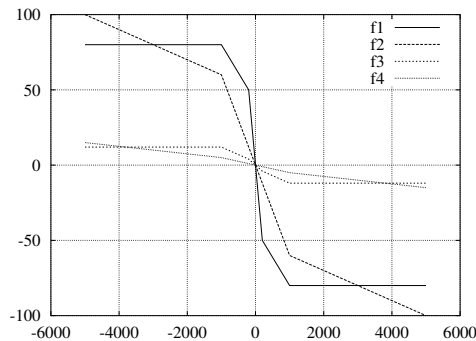


Abbildung5. Ausschnitt aus der Parameterdatei und resultierende Transferfunktionen

6 Schluß

In diesem Papier wurde gezeigt, wie besonders „einfache“ und „billige“ Lösungen – die sich nach eingehender Analyse des vorliegenden Problems ergeben – zum erfolgreichen Entwurf eines komplexen autonomen Robotersystems beitragen können. Gerade in der mobilen Robotik, wo inzwischen der Wunsch nach vereinheitlichten, „standardisierten“ Lösungen zum Ausdruck kommt, sind erhebliche Vorteile durch Komplexitätsreduktion zu erzielen, und zwar nicht nur – aber natürlich auch – im Hinblick auf die Systemkosten. Ein schlüssiges und angemessenes Gesamtkonzept darf nicht gegenüber der Optimierung von Einzelkomponenten vernachlässigt werden.

Literatur

1. International Aerial Robotics Competition: The Robotics Competition of the Millennium. <http://avdil.gtri.gatech.edu/AUVS/CurrentIARC/IARC2000Intro.html>.
2. M. Knoke, C. Reinicke, V. Remuß, M. Musial, U. W. Brandenburg, G. Hommel. Entwicklung einer Orientierungssensorik für einen fliegenden Roboter. In *Robotik 2000*, Berlin, 2000. VDI GMA.
3. G. Hommel M. Musial, U. W. Brandenburg. Das Kommunikationskonzept für MARVIN, den autonom fliegenden Erkundungsroboter der TU Berlin. In *Robotik 2000*, Berlin, 2000. VDI GMA.
4. M. Musial, U. W. Brandenburg, G. Hommel. MARVIN – Technische Universität Berlin’s flying robot for the IARC Millennial Event. In *Proc. AUVS Symposium*, Orlando, Florida, USA, 2000.
5. Marek Musial, Uwe Wolfgang Brandenburg, Günter Hommel. MARVIN - Der autonom fliegende Erkundungsroboter der TU Berlin und sein Erfolg beim Wettbewerb IARC’99. In *15. Fachgespräch Autonome Mobile Systeme (AMS99)*, München, 1999. Springer-Verlag.
6. Marek Musial, Uwe Wolfgang Brandenburg, Günter Hommel. Cooperative Autonomous Mission Planning and Execution for the Flying Robot MARVIN. In Enrico Pagallo, Frans Groen, Tamio Arai, et al., editors, *Intelligent Autonomous Systems 6*, Amsterdam, Berlin, Oxford, et al., 2000. IOS Press and Ohmsha.
7. Marek Musial, Uwe Wolfgang Brandenburg, Günter Hommel. Development of a Flight Control Algorithm for the Flying Robot MARVIN. In *Workshop on Advanced Robotics and its Application*. Shanghai University, October 2000.