

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

**Band:** 89 (1998)

**Heft:** 3

**Artikel:** Modellhelikopter wird zum High-Tech-Werkzeug : autonom fliegender Helikopter

**Autor:** Chapuis, Jacques / Eck, Christoph / Kottmann, Markus

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-902048>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 19.03.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

Die Miniaturisierung von Sensoren, gepaart mit leistungsfähigen Digitalrechnern und satellitengestützter Navigation (DGPS, Differential Global Positioning System), erlaubt, autonom fliegende Kleinroboter zu realisieren, welchen aus dem Modellbau stammende Fluggeräte als Basis dienen. Der folgende Beitrag gibt einen Überblick über ein vor zwei Jahren gestartetes Forschungsprojekt der ETH Zürich, das die Entwicklung eines autonom fliegenden Modellhelikopters zum Ziele hat. Im Rahmen des Projektes hat das ETH-Team im Sommer 1996 an einem internationalen Wettbewerb teilgenommen und den erfolgreichen zweiten Platz belegt. Dieser Beitrag illustriert im übrigen ausgezeichnet die im vorhergehenden Grundlagenartikel angesprochenen Möglichkeiten von DGPS.

# Modellhelikopter wird zum High-Tech-Werkzeug

## Autonom fliegender Helikopter

■ Jacques Chapuis, Christoph Eck und Markus Kottmann

Wissenschaftliche Mitarbeiter der ETH Zürich beschlossen im Sommer 1996, mit Unterstützung verschiedener Industriepartner als «Swiss-Team ETH» an der International Aerial Robotics Competition [1] teilzunehmen. Der Wettbewerb findet alljährlich statt und wird von der International Association for Unmanned Vehicle Systems (AUVSI) organisiert.

Die Aufgabe bestand darin, mit einem Flugroboter auf einem Grasfeld stehende, liegende und teilweise vergrabene Fässer zu lokalisieren und ihren Inhalt anhand von Signeten (radioaktiver oder biologischer Müll) zu identifizieren. Start, Flug und Landung hatten autonom zu erfolgen. Auf einem der Fässer befand sich eine markante Scheibe, die vom Flugroboter aufgegriffen und als Probe zum Startplatz zurückgebracht werden musste. Verschiedene Kriterien wie erfolgreiche Lokalisierung und Identifizierung der Fässer, Missionsdauer, technische Ausführung des Flugroboters und Sicherheitsaspekte trugen zur Gesamtwertung bei. Das Swiss-Team – einziges ausländi-

ches Team – erreichte den zweiten Platz hinter dem Team des MIT.

In naher Zukunft werden autonom agierende Drohnen nicht nur für militärische Aufgaben, sondern immer mehr auch für zivile Anwendungen an Bedeutung gewinnen. Sie werden dort zum Einsatz kommen, wo es für den Menschen zu gefährlich ist oder wo sich der Aufwand für einen Grosshelikopter nicht rentiert. Mögliche Anwendungen sind Detektion von Minen, Überwachung des Verkehrs, Kontrolle von Pipelines und Hochspannungsleitungen, Vermessung von Gelände, Informationsbeschaffung bei Katastrophen sowie der Einsatz in der Grossflächenlandwirtschaft.

### Lösungsansatz

Für die Bewältigung der gestellten Aufgaben sind vier Teilprobleme zu lösen; sie betreffen das Navigationssystem, den Flugregler, das Bildverarbeitungssystem und den Missionsmanager. Für das Swiss-Team stand bei Projektbeginn einzig fest, dass ein Modellhelikopter zusammen mit satellitengestützter Navigation (DGPS, Differential Global Positioning System) zu verwenden war. Im weiteren wurde der anspruchsvolle Lösungsweg eingeschlagen, die drei erstgenannten Teilprobleme an Bord des

#### Adressen der Autoren

Jacques Chapuis, Dipl. El.-Ing. ETH, Institut für Automatik, Christoph Eck, Dipl. El.-Ing. Institut für Mess- und Regeltechnik, und Dr. Markus Kottmann, Institut für Computersysteme, ETH Zentrum, 8092 Zürich  
Internet: [http://www.imrt.mavt.ethz.ch/users/heli/Heli\\_Page.html](http://www.imrt.mavt.ethz.ch/users/heli/Heli_Page.html)



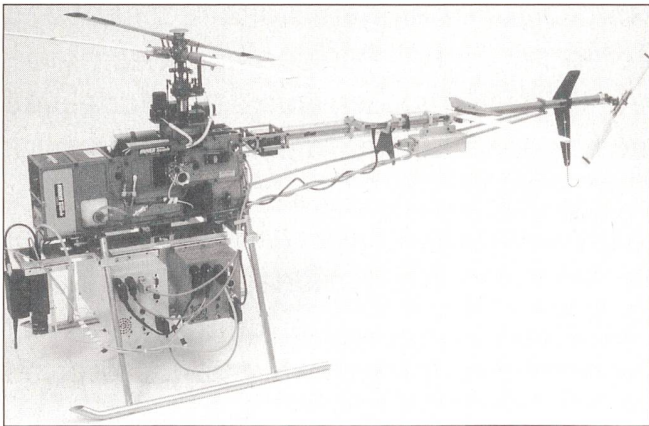


Bild 1 Freifliegender Modellhelikopter mit Bordrechnern, Kamera und Navigationssensoren

Helikopters zu lösen, um grösstmögliche Autonomie bezüglich Bodeninfrastruktur zu erlangen.

Als Plattform diente ein kommerziell erhältlicher Benzinhelikopter, der eine Nutzlast von etwa 10 kg mitführen kann. Diese beinhaltet ein Echtzeit-DGPS-System, eine Inertialmesseinheit mit drei Kreiseln und drei Beschleunigungssensoren, eine CCD-Kamera mit integriertem digitalem Signalprozessor, einen elektronischen Kompass, einen Ultraschall-Höhenmesser mit beschränkter Reichweite, einen bidirektionalen Datenfunk, einen Einwegfunk für Videoübertragung, einen Navigationsrechner, einen Kommunikationsrechner, einen Greifmechanismus und einen Fernsteuerempfänger für manuelles Fliegen.

Die Flugmission des Helikopters ist in einzelne Teilaufgaben gegliedert und wird vom Missionsmanager im Bodenrechner überwacht.

### Hardwarekomponenten

Der Flugroboter ist ein Modellhelikopter mit einem Leergewicht von 9 kg. Der Rotordurchmesser beträgt 1,8 m. Der Verbrennungsmotor mit elektronischer Zündung hat einen Hubraum von 35 cm<sup>3</sup>. Entwickelt und produziert wird der Helikopter von Huner-Technik in Gontenschwil. Das Bild 1 zeigt den Helikopter des Swiss-Teams mit Kamera, Greifer, Navigations- und Kommunikationsbox. In Bild 2 ist ein Blockdiagramm der gesamten Elektronik dargestellt.

Die verschiedenen Rechner teilen sich die Arbeit wie folgt:

- Der Navigationsrechner bestimmt laufend die Position und die Lagewinkel des Helikopters und steuert ihn entlang einer vorgegebenen Flugtrajektorie (Flugregler).
- Der Kommunikationsrechner koordiniert und überwacht den Datenfluss zwischen Kamera, Navigationsrechner,

- ner, Bodenstation und GPS-Empfänger.
- Der Signalprozessor in der Kamera wertet während des Fluges die Bilder nach relevanten Informationen aus.
- Der Bodenrechner zeichnet Flugdaten auf, wertet Kamerameldungen aus und generiert Flugpläne gemäss einer vorprogrammierten Flugstrategie.

Für den Kommunikations- und den Navigationsrechner wurden Industrie-PC auf der Basis des PC104-Standards ge-

wählt. Die PC-Karten beinhalten einen 486-DX-Prozessor mit einer Taktrate von 100 MHz, 4 MByte RAM und 1,4 MByte nichtflüchtigem Speicher. Zur Programmentwicklung werden Tastatur, Bildschirm und Festplatte an die beiden PC angeschlossen.

Das DGPS-System RT-20 von Novatel liefert Geschwindigkeits- und Positionsangaben in Echtzeit bei einer maximalen Abtastrate von 5 Hz und einer Positionsgenauigkeit von 20 cm. Der elektronische Kompass C100 von KVH Europe misst mit einer Abtastrate von 10 Hz den Gierwinkel (seitliche Orientierung) des Helikopters. Der Kompass dient zur Bestimmung der Anfangsorientierung des Helikopters sowie zur Kompensation der Kreisel-Langzeitdrift während des Fluges.

Der Ultraschallsensor misst die Distanz zum Boden in einem körperfesten Koordinatensystem. Mit Hilfe der Lagewinkel lässt sich der vertikale Bodenabstand berechnen. In Anbetracht des beschränkten Messbereichs von 15 cm bis 5 m wird der Ultraschallsensor vor allem für die Start- und Landephase benützt. Der Sensor kann jedoch zusam-

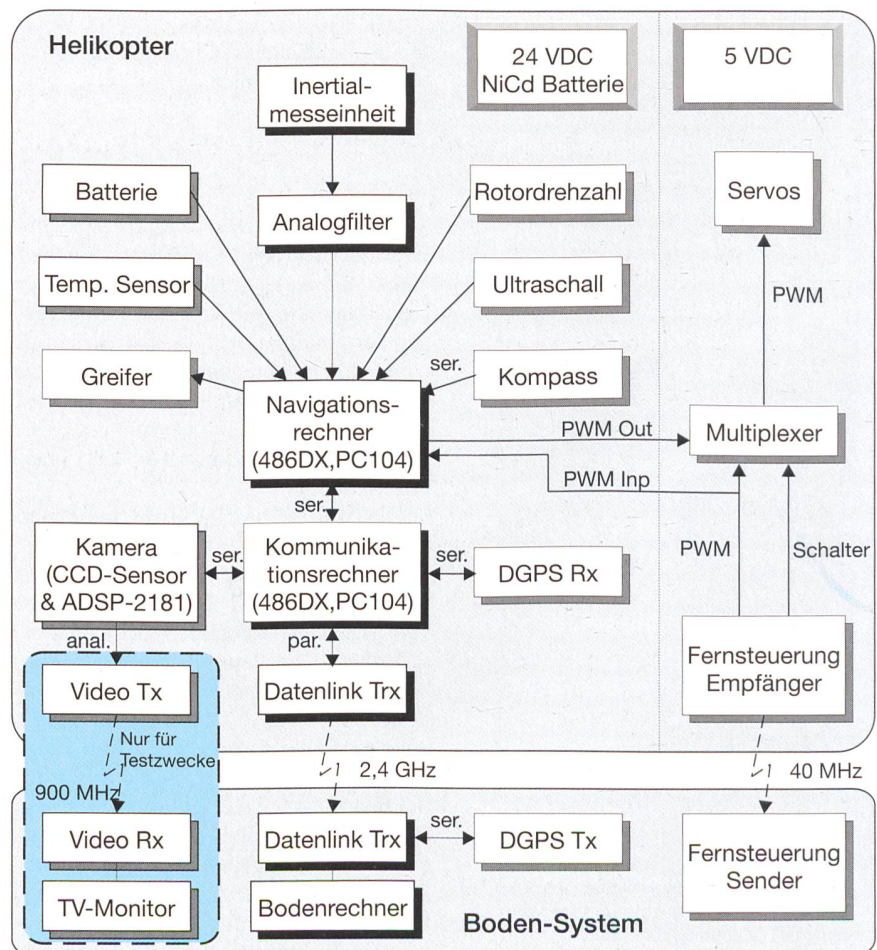


Bild 2 Blockschaltbild des Gesamtsystems



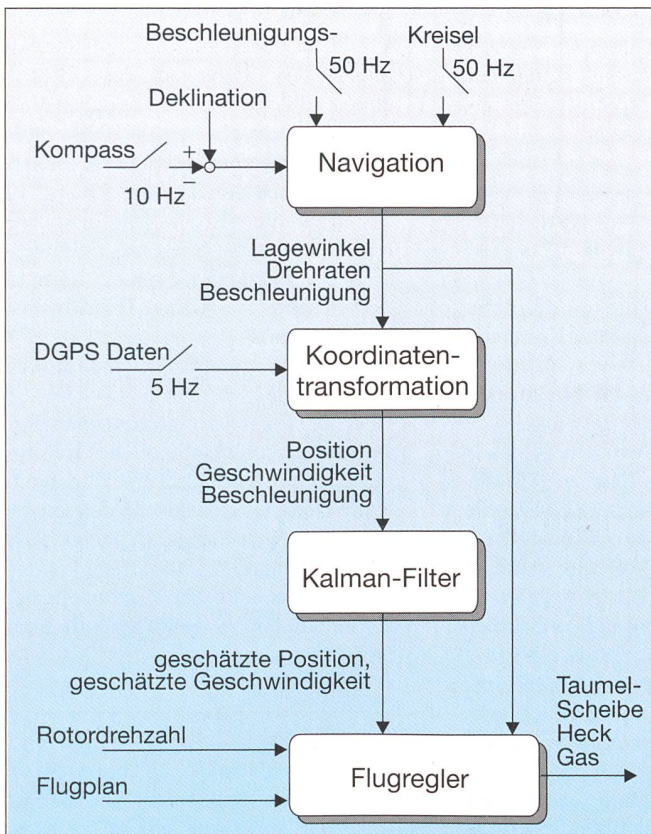


Bild 3 Blockdiagramm des Autopiloten

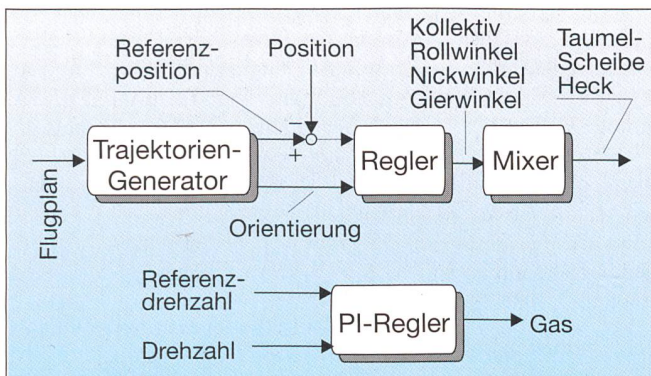


Bild 4 Blockdiagramm des Flugreglers

men mit GPS-Höhenangaben für die Kartographierung des Bodens bei unebenem Gelände verwendet werden (vgl. Aufgabenstellung Wettbewerb).

## Der Autopilot

### Navigation und Flugbahnregler

Das Bild 3 zeigt ein Blockdiagramm des Autopiloten mit dem Navigationssystem und dem Flugregler. Aus den Messwerten der Kreisel und Beschleunigungssensoren bestimmt ein Navigationsalgorithmus die drei driftkompensierten Eulerwinkel (Raumlage). Dazu werden die von den Kreiseln gemessenen Drehraten zu Winkeln integriert. Zur Stützung der Kreisel (Driftkompensation) wird der durch die Beschleunigungssensoren gemessene Gravitationsvektor (zeigt zum Erdmittelpunkt) beigezogen. Die DGPS-Karte liefert Positions- und

Geschwindigkeitsmesswerte bezüglich der GPS-Antenne. Mit einer geeigneten Koordinatentransformation werden diese Messwerte sowie die Beschleunigung in Positions-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsdaten des Helikopterschwerpunktes bezüglich eines erdfesten Koordinatensystems umgerechnet. Ein lineares Kalmanfilter sechster Ordnung extrapoliert Position und Geschwindigkeit für den mit einer Abtastrate von 50 Hz getakteten Flugregler.

Der Flugregler setzt sich aus einem Flugbahnregler und einem Drehzahlregler für den Motor (Bild 4) zusammen. Die Führungsgrößen für den Flugbahnregler sind die Position in erdfesten Koordinaten und der Gierwinkel. Die Generierung der Flugbahnkoordinaten erfolgt an Bord des Helikopters, ausgehend von Flugbahnsegmenten, die durch wenige Parameter charakterisiert sind. Jede Flugbahn

lässt sich durch Aneinanderhängen von verschiedenen Flugbahnsegmenten beschreiben. Es werden drei Basissegmente unterschieden: Drehen, Reisen und Beschleunigen. Der Regelalgorithmus bestimmt den kollektiven Anstellwinkel und die zyklischen Anstellwinkel für Roll- und Nickbewegungen sowie den Anstellwinkel für den Heckrotor. Im Mixer werden die Stellgrößen für die vier Taumelscheibenservos und das Heckservo berechnet. Eine Timer-Karte wandelt die Servoeinstellwerte in pulsweitenmodulierte Signale um.

Der Entwurf des Flugbahnreglers erfolgte nach Methoden, die am Institut für Mess- und Regeltechnik der ETH Zürich entwickelt und erprobt wurden [3]. Für die Stabilisierung von Roll- und Nickwinkel wird eine kaskadierte Struktur von PID-Reglern, für die Regelung der Höhe und des Heckwinkels PID-Regler eingesetzt. Mit einem mathematischen Helikoptermodell konnten anhand von Simulationen Einstellwerte für die Reglerparameter gefunden werden.

### Drehzahlregler

Im Gegensatz zu ferngesteuerten Modellhelikoptern, bei denen Gas und kollektiver Anstellwinkel gekoppelt sind, besitzt der Motor einen eigenen Drehzahlregler, der die Drehzahl im Flug konstant auf 1200 U/min regelt. Um gefährliche Resonanzschwingungen am Boden zu vermeiden, folgt die Rotorgeschwindigkeit beim Startvorgang einer steilen Anstiegsrampe. Gleichzeitig wird der kollektive Anstellwinkel gemäss manueller Piloteneinstellung verändert.

### Sicherheitsaspekte

Während der Entwicklungsphase muss der Pilot jederzeit die Kontrolle über den Helikopter zurückgewinnen können. Deshalb erfolgt die Ansteuerung der Servos entweder über den Navigationsrechner oder über den konventionellen Fernsteuerempfänger. Der Pilot kann mit einem Schalter an seinem Senderpult zwischen Automatik- und Handbetrieb wählen. Da der Navigationsrechner die Servosignale des Piloten einliest, können die Regler im Handbetrieb nachgeführt werden, um ein stossfreies Umschalten zu garantieren.

### Der Missionsmanager

Der Missionsmanager im Bodenrechner erzeugt die Flugpläne, welche sich aus mehreren Flugbahnsegmenten zusammensetzen, und überwacht deren Ausführung. Systemkritische Daten werden fortlaufend angezeigt, und bei Über-



schreitung von Grenzwerten werden optische und akustische Alarmsignale ausgelöst. Die Parameter des Autopiloten können während des Fluges abgefragt und verändert werden. Der Missionsmanager wertet darüber hinaus alle anfallenden Kamerameldungen aus. Diese beinhalten Richtungsinformationen über die Lage von erkannten Objekten und den Typ eines Fasssignets.

Die Bestimmung der exakten Fassposition erfolgt nach dem «Maulwurfverfahren». Bildlich gesprochen erzeugt jede Fassbeobachtung ein kleines Häufchen Erde am Boden. Seine Höhe und horizontale Ausdehnung hängen von der Genauigkeit jeder einzelnen Beobachtung ab. Mit steigender Anzahl von Beobachtungen wird der zu Beginn ebene Boden hügeliger. Die Fassschwerpunkte sollten sich am Schluss mit den höchsten Erhebungen decken.

### Bildverarbeitung

Da Gras bekanntlich infrarote Strahlung gut reflektiert, wurde eine Schwarzweisskamera mit optischen Filtern eingesetzt. Die Kamera arbeitet im nahen Infrarotbereich und liefert weisse Pixel für Boden und Scheibe, schwarze Pixel für die Fässer und gemischt weisse und schwarze Pixel für die Fassbeschriftungen. Eine elektronisch steuerbare Blende ermöglicht die automatische Anpassung an unterschiedliche Lichtverhältnisse. Anstatt komplizierte Mustererkennungsverfahren zu verwenden, wurde eine einfache Methode für die Klassifizierung der beiden Fasstypen verwendet, die das unterschiedliche Verhältnis von weissen und schwarzen Anteilen der beiden Muster ausnützt. Das Verfahren ist dadurch unabhängig vom Sichtwinkel und der Bildverdrehung.

### Der Greifmechanismus

Um die orange Scheibe zu detektieren, sucht die Kamera nach einem hellen, runden Fleck auf einem Fass und gibt nach geeigneter Positionierung des Greifers den Auslösebefehl. Der Greifarm selbst besitzt 30 Magnete, die sternförmig angeordnet sind. Er hängt an einer kleinen Kabelrolle unter dem Helikopter und wird mit einem Servo ausgelöst. Aus Sicherheitsgründen kann der Greifarm durch einen Befehl des Bodenrechners vom Helikopter abgeworfen werden.

### Software

Die Software auf allen PC-Rechnern basiert auf einem kompakten Echtzeit-

Multitasking-Kernel. Zusammen mit einem Standard-C-Compiler erlaubt diese günstige Entwicklungsumgebung ein rasches Softwareprototyping mit guten Debug-Möglichkeiten.

### Ausblick

#### All-in-One-Rechnersystem

Am Institut für Computersysteme wird zurzeit eine schlanke Alternative zu den zwei Bordrechnern (Kommunikation, Navigation) entworfen. Basierend auf einem Strong-ARM-Prozessor (DC 1035), ist eine Karte entwickelt worden, welche die Aufgaben beider Rechner übernehmen kann und neben seriellen Schnittstellen auch über A/D-Wandler und pulsbreitenmodulierte Signalgeneratoren verfügt. Die Software wird in Oberon SA erstellt, einer Version der Sprache Oberon, die auf die Anforderungen bezüglich Effizienz und Echtzeit ausgerichtet ist; ein Compiler ist bereits von Prof. Niklaus Wirth implementiert worden. Die Verteilung der Softwareaufgaben zwischen Boden- und Bordrechner wird im ersten Prototyp beibehalten; ebenso die Protokolle der Meldungen, die über die verschiedenen seriellen Schnittstellen laufen. Dies erleichtert, zwischen den zwei Bordsystemen zu wechseln.

#### Zivil nutzbarer autonomer Helikopter

Die system- und fachübergreifende Zusammenarbeit unterschiedlicher Institute an der ETH Zürich schafft die Voraussetzung für die Entwicklung eines zivil nutzbaren Modellhelikopters mit anspruchsvollen Zielsetzungen:

- Die Weiterentwicklung eines preiswerten, kommerziell nutzbaren Helikopters beinhaltet neben dem vollständig autonomen Helikopter auch einfachere Systeme, die nur einen Flugstabilisator enthalten, um bei-

spielsweise einen Piloten auf ein bestimmtes Modell zu trainieren oder um ungelerneten Personen das Fliegen eines Helikopters zu ermöglichen.

- Der Aktionsradius eines Helikopters hängt von der Zuverlässigkeit, Sicherheit, Eigenintelligenz und Robustheit des Flugreglers ab, wobei für diesen mittels Low-Cost-Sensorik, minimiertem Gewicht und kleinem Stromverbrauch eine maximale Performance anzustreben ist.
- Das Systemkonzept beinhaltet eine gewisse «Skalierbarkeit», welche die Übertragbarkeit der gewonnenen Resultate auf unterschiedliche Helikoptersysteme bis zum personentragenden Helikopter gestattet. In den letzten Jahren hat sich übrigens gezeigt, dass die Regelung eines Modellhelikopters von der Dynamik her anspruchsvoller ist als diejenige eines Grosshelikopters.

### Danksagung

Die Autoren danken an dieser Stelle den folgenden Sponsoren des Swiss-Teams: Oerlikon-Contraves AG, Zürich; Bühler AG, Uzwil; Bucher und Suter AG, Worblaufen; Imar GmbH, Saarbrücken; Leutron AG, Glattbrugg; Noser Engineering AG, Winterthur; Teleprint TDC SA, Dällikon; Fabrimex AG, Volketswil. Ohne ihre grosszügige Unterstützung wäre die Realisierung dieses Projektes unmöglich gewesen.

### Literatur

- [1] URL: <http://avdil.gtri.gatech.edu/AUVS/IARC/LaunchPoint.html>
- [2] E. v. Hinüber und H. Janocha: Inertial measurement system for calibration and control of robots. *Industrial Robot* 20(1993)2, pp. 20–27.
- [3] M. Weilenmann: Robuste Mehrgrößen-Regelung eines Helikopters. Diss. ETH Nr. 10890. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 1994.

## Un hélicoptère modèle devient un outil de haute technologie

### Un hélicoptère capable de voler de manière autonome

La miniaturisation des capteurs, ainsi que les ordinateurs numériques performants et la navigation assistée par satellites (DGPS, Differential Global Positioning System), permettent de réaliser, sur la base des appareils du modélisme aéronautique, de petits robots capables de voler de manière autonome. L'article donne un aperçu du projet de recherche lancé voici deux ans par l'EPF Zurich avec pour but le développement d'un hélicoptère modèle autonome. Dans le cadre de ce projet, l'équipe de l'EPF a participé en été 1996 à un concours international et obtenu la seconde place. L'article illustre en outre parfaitement les possibilités du DGPS présentées dans l'article de fond qui précède.