



Bild: Raymond Oung, ETH Zürich

Tom Sperlich

# Flugzirkus

## Spielerische Forschung mit Quadrokoktern

**Diese Vorführungen der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich sorgen regelmäßig für Furore: Surrende Flugroboter erledigen zusammen komplizierteste Aufgaben, jonglieren oder bauen Türme. Was wie Spielerei aussieht, ist wichtige Grundlagenforschung.**

**W**er nicht genau hinschaut, verpasst was: Ein rund zwei Meter großes Oktaeder-ähnliches Gebilde steht auf einer seiner Spitzen. Was wie eine feststehende Installation eines Künstlers aussieht, ist in Wirklichkeit ein frei stehendes, selbst balancierendes Objekt. Über Motoren angetriebene Gewichte an den Seiten verlagern ständig ihre Position und halten das Gebilde im Gleichgewicht.

„The Balancing Cube“ ist ein Musterbeispiel für faszinierend greifbare Grundlagenforschung am Institut für Dynamische Systeme und Regelungstechnik (IDSC) der ETH Zürich. Die sich selbst ausbalancierende Struktur dient als Testplattform für Regel- und Filteralgorithmen auf einem vernetzten System. Jedes der motorisierten Gewichte verfügt über seine eigene Regelung bestehend aus einem Motor, Sensoren, einer Batterie und einem Singleboard-Controller. Der Controller, der den sensorischen Input verarbeitet, ist über ein CAN-Bussystem (Controller Area Network) an den Motor angeschlossen und über einen zweiten CAN-Bus sind alle Controller miteinander vernetzt. Mittels der verteilten Datengewinnung und -verarbei-

tung können sich die sechs Module koordinieren und so den Cube mit adäquaten Bewegungen stabilisieren, selbst wenn man ihm einen kleinen Stups gibt.

Mit dem Cube gewannen die Forscher auch wichtige Erkenntnisse für ihr derzeitiges Renommierobjekt: die Flying Machine Arena. Darin zeigen Quadrokokter verblüffende Kunststückchen. Einige Videos der Flugschau sind über den c't-Link zu erreichen. Professor Raffaello D'Andrea, einer der beiden Institutsleiter, arbeitet bereits seit zehn Jahren mit Quadrokoktern und konnte an der ETH die Plattform für Flugroboter-Experimente etablieren.

Die Flugzone der Quadrokokter, beim IDSC auch Quadrobots genannt, ist ein Raum von 10 m × 10 m × 10 m mit Netzen an den Seiten und dicken Matten am Boden. Sie sollen bei Bruchlandungen Schäden in Grenzen halten. Die Quadrokokter sind modifizierte Hummingbird-Modelle (X3D) der Firma Ascending Technologies nahe München. Das IDSC-Team ersetzte die mitgelieferten Controller gegen Eigenentwicklungen mit ARM-Prozessoren, die eine höhere Geschwindig-

keit, mehr Flugdynamik und einen einfacheren Zugriff auf Schnittstellen und Subsysteme erlauben.

Immer wieder flitzen in der Arena einzelne oder Gruppen von Quadrobots herum, jonglieren mit Stäben, spielen allein mit Bällen oder gegeneinander Tennis, tanzen abgestimmt auf schmissige Musik oder schweben ganz einfach in ästhetischem Formationsflug durch die Luft – programmiert und beobachtet von ihren Betreuern in einem angrenzenden Kontrollraum. Was so leicht und spielerisch wirkt, ist harte Grundlagenforschung und -entwicklung – und ganz viel Mathematik. Gerade bei den Gruppenausflügen müssen die Luftakrobaten laufend ihre Tätigkeiten mit den anderen Einheiten koordinieren und korrigieren, um zusammen komplexe



Bild: Sebastian Trimpe, ETH Zürich

**Sechs motorisierte Gewichte verlagern ständig ihre Position und verhindern ein Umfallen des Alu-Gestells „Balancing Cube“.**

Dank des montierten Tennisschlägers ist der Quadrocopter im Fliegen in der Lage, den Ball hüpfen zu lassen.



Bild: Mark Müller, ETH Zürich

Mit Hilfe eines eigens entwickelten servo-gesteuerten Nadelgreifers krallen sich die Quadrocopter in den Steinen fest.

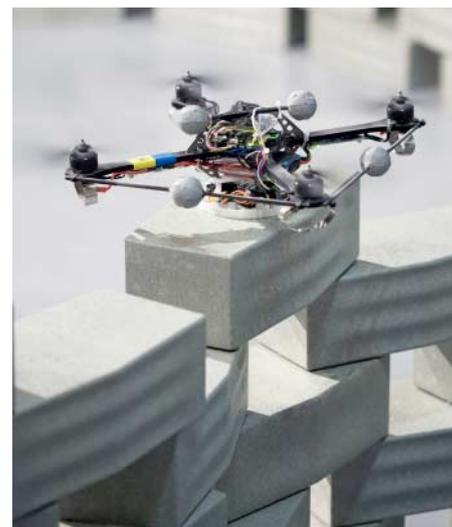


Bild: François Laugnier, ETH Zürich

und dynamische Aufgaben zu lösen, ohne aneinanderzustoßen.

Die dafür erforderliche Sensorik haben die Forscher teilweise auf ein Motion-Tracking-System des Herstellers Vicon ausgelagert. Es besteht aus acht im Raum verteilten Infrarot-Kameras, die mit reflektierenden Markern beklebte Objekte millimetergenau mit einer Frequenz von rund 200 Hz und einer Latenz von circa zehn Millisekunden erfassen. Die Kopter sind jeweils mit vier Reflektoren bestückt; gehören ein oder mehrere Bälle zur Performance, werden diese ebenfalls zur Positionserkennung mit Reflektoren beklebt.

Das Vicon-System liefert die Daten an einen Cluster aus handelsüblichen PCs, die die aktuellen Positionen der einzelnen Kopter und deren Zielflugbahnen berechnen. Obwohl die Kopter autonom auf der Stelle schweben und bestimmte Bewegungen auch selbst erledigen, hat der PC-Cluster die Oberhand und steuert sie über eine dedizierte, störsteife Funkverbindung (FHSS, Frequency Hopping, Spread Spectrum) mit 2,4 GHz, die eine geringe Latenz hat.

Für eine Flugschau laden die Forscher verschiedene Softwaremodule in die ARM-Controller. Die Komponenten sind in C++ programmiert und werden für den jeweiligen

Einsatz zusammengestellt. Bestimmte Low-Level-Steueralgorithmus werden immer wieder verwendet, beispielsweise die Stabilisierung des Kopters in der Luft mit Hilfe seiner elektronischen Gyroskope für die drei Hauptachsen (Gieren, Nicken und Rollen). Für musikalisch-tänzerische Darbietungen steht schon eine fertige Bibliothek mit zahlreichen grundlegenden Bewegungen zur Verfügung, die die Kopter autonom ausführen können, beispielsweise einen „Flip“, also eine Rolle in der Luft.

Über ein zusätzliches WLAN sammeln die Steuerrechner Daten der verschiedenen Sensoren und Gyroskope sowie den Batteriestatus

## „Wir konzentrieren uns auf die Verzahnung von Daten und Material“

**Professor Fabio Gramazio, ETH Zürich, vom Fachbereich Architektur und Digitale Fabrikation (DFAB), im Gespräch mit c't**

*c't: Was ist der Impuls für Ihre Arbeiten an der ETH, in einem Bereich den Sie Architektur und digitale Fabrikation nennen?*

**Fabio Gramazio:** Wir nutzen vor allem die Möglichkeit, etwas am Computer zu entwerfen und von Maschinen direkt ab Daten bauen zu lassen. Am DFAB betrachten wir dies immer auch aus der gestalterischen Perspektive. Und wir beschäftigen uns intensiv mit den Auswirkungen der sich verändernden Produktionsbedingungen auf die Architektur. Effizienz und Rationalisierung sind, vor allem in der Wirtschaft, natürlich ein Antrieb für Innovationen und Automatisierung. Wir hoffen, dass bei aller Produktivitätssteigerung die Frage, wie Architektur geplant und gemacht wird und was man gestalterisch erreichen kann, nicht auf der Strecke bleibt.

Das Bauen, wie wir es derzeit erforschen, erweitert nicht nur das konstruktive Spektrum,

sondern ergibt durch den Einbezug der Material- und Fabrikationslogiken in den Entwurfsprozess einen eigenen architektonischen Ausdruck und eine neue Ästhetik. Bei Einbindung der digitalen Möglichkeiten in Entwurf und Produktion erhält man also andere Ergebnisse oder macht auch Projekte, die sonst liegen geblieben wären.

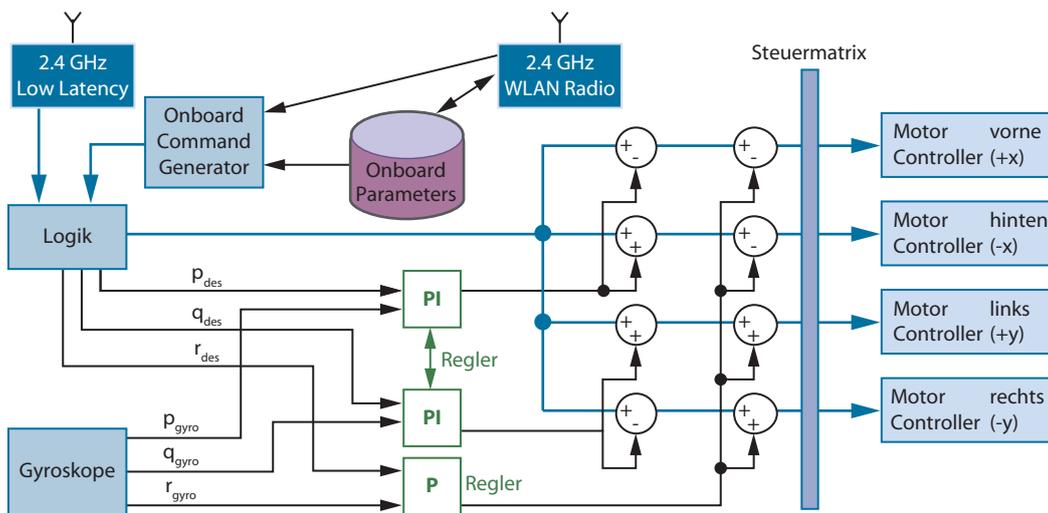
*c't: Sie wollen in Ihre mit CAD/CAM-Programmen designten und entworfenen und von Robotern umgesetzten Strukturen „Informationen einbetten“. Was verstehen Sie darunter?*

**Gramazio:** Die Informationen können sich auf mehreren Ebenen ansiedeln. Das ist einmal das auch gestalterisch Interessanteste, die Geometrie. So können wir etwa ein Muster oder eine bestimmte Wirkung erzeugen, wenn wir den Steinen in einem Bauwerk eine definierte Drehung geben. Oder man generiert neue Informationswerte, etwa bauphysikalische, indem entsprechende Materialien mit bestimmten Eigenschaften oder Beschaffenheiten an bestimmten Orten benutzt werden und dies eine Informierung des Materials im Produktionsprozess beinhaltet, was wiederum auch Impli-

kationen für den Entwurf hat. Wir konzentrieren uns also sehr auf diese Verzahnung von Daten und Material, auch kommendem intelligentem Material.

*c't: Sie haben in den letzten Jahren Industrieroboter Ihre sehr speziellen Mauern und Bauelemente zusammensetzen lassen. Nun gehen Bauroboter – in Kooperation mit Professor D'Andrea – auch in die Luft. Was ist der Grund fürs Fliegen?*

**Gramazio:** Erstens ist es ganz einfach eine praktische Lösung, denn ein Bauroboter am Boden kann die Arbeiten auch behindern und er ist ein sehr statisches Ding. Dabei sind natürlich Entwicklungen für fliegende Bauroboter auch eine revolutionäre Grundlagenforschung, die uns sehr interessiert. Und zweitens geht es darum Techniken zu entwickeln, mit denen man bauen kann, wo man sonst nicht hinkommt, eben etwa auf 600 Metern Höhe. Natürlich gibt es Möglichkeiten mit speziellen Gerüsttechniken, aber diese sind doch sehr, sehr aufwendig. Und man kann so was auch nicht mit einem Hubschrauber bauen, dafür brauche ich autonome Flugroboter.



Der Onboard-Controller nimmt Befehle entgegen und berechnet daraus die Steuersignale für die vier Motorsteuerungen.

tus. Alle Bewegungsdaten lassen sich aufzeichnen und für eine erneute Vorführung einfach wieder einspielen. Für eine manuelle Steuerung einzelner Quadroboter nutzt das Team des IDSC auch Microsofts 3D-Steuerung Kinect. Die Koppelung von Vicon und Kinect ermöglicht eine relativ natürliche und intuitive Steuerung.

### Fliegende Borgs

Auch das neueste Kunststückchen der Luftakrobaten erfordert viel Kooperation und Synchronisation. Ein vom Anwender geworfener kleiner, für das Tracking-System erkenn-

barer Ball, wird von drei kooperierenden Quadroboter mit Hilfe eines 2,5 Meter langen und 1,2 Meter breiten Netzes eingefangen. Anschließend bewegen sich die kleinen Elektroflieger auseinander, um das Netz zu spannen und somit den Ball wieder herauszuschleudern – und sogleich wieder einzufangen und so weiter. Bei der Berechnung der Steuerbefehle lässt der PC-Cluster auch den Luftwiderstand des Balls sowie die Fehler vorhergehender Fangversuche einfließen. Nicht immer klappt das wie gewünscht, aber genau das treibt die experimentelle Forschung in der Flying Machine Arena voran: Für die autonomen Systeme werden laufend neue Algorith-

men entwickelt, die sie aus ihren vergangenen Erfahrungen lernen lassen.

Beim ETH-Projekt Distributed Flight Array tun sich fahrende, allein jedoch fluguntaugliche Propeller zu einem Fluggerät zusammen. Die im Durchmesser rund 25 Zentimeter messenden, sechseckigen Module sind mit Controllern, Sensoren, Rädern und Andock-Buchten ausgestattet. Mehrere davon fahren zunächst wahllos am Boden hin und her. Sobald sie einander nah genug gekommen sind, docken sie an. Mehrere der verbundenen Module bilden so ein zufälliges Gebilde. Gemeinsam aber reicht die Zahl der Propeller, um sich in die Luft zu erheben. Sie

## „Für mich dreht sich alles um die Kreation“

### Professor Raffaello D’Andrea vom IDSC über Inspirationen und Visionen.

*c’t:* Herr D’Andrea, Sie sagten einmal, Ihre Arbeit stehe unter dem Motto: „Dinge kreieren, die nie zuvor erschaffen wurden“. Das trifft nicht nur auf Ihre Forschungsarbeiten zu – Sie bringen eine Menge verschiedener Arbeiten hervor, sogar Kunst. Warum, und wo ist da der gemeinsame Nenner?

*Raffaello D’Andrea:* Vieles, was wir am Institut machen, ist die Konzeptualisierung dessen, was möglich ist. Die gemeinsamen Nenner sind dynamische Prozesse und Regelungssysteme, das Erlernen von Anpassung, die Erschaffung autonomer Systeme, die aus Erfahrung lernen und sich adaptieren – einfach dynamische Werke, die zuvor noch nie kreiert wurden.

Sich so aufzustellen, solch zwanglose Arbeit machen zu können, bringt auch einigen Nutzen. Erstens kann man viel Grundlagenforschung betreiben. Zweitens sind ja die Studierenden, die wir auf allen Stufen ausbilden, eines der Hauptprodukte von Universitäten. Solche Projekte zu machen ist eine tolle Lernerfahrung für alle, inklusive mich.

Der dritte Punkt ist: Wenn man die Grenzen solcher Systeme immer weiter treibt, teilt man der Welt dabei auch mit, was diese so zu tun imstande sind. Und man wird auch zu einer Inspiration für andere. Das war meine Erfahrung bei Kiva Systems, eine Firma, die ich mit gründete. Der Gründer von Kiva zeigte die Videos unserer fußballspielenden Roboter, um Investoren davon zu überzeugen, dass die Technologie da sei, etwa für automatisierte Verteilanlagen. Und nur auf den ersten Blick scheinen die beiden Sachen nicht viel miteinander zu tun zu haben.

*c’t:* An der amerikanischen Cornell University haben Sie das Fußballteam beim RoboCup geleitet. Das mittlerweile an Amazon verkaufte Kiva Systems schloss daran an, als quasi logischer Schritt hin zu einer wirtschaftlichen Anwendung Ihrer Robotik-Arbeiten. Wo sehen Sie weiteren praktischen Nutzen?

*D’Andrea:* Die Arbeit, die wir und Kollegen machen, mündet fast schon unbegrenzt in



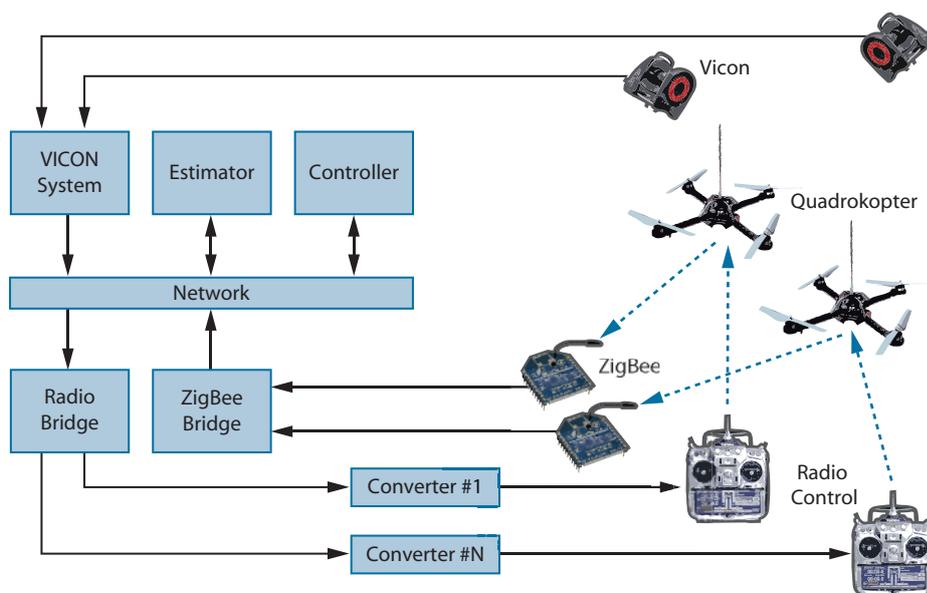
Professor Raffaello D’Andrea ist Leiter des Instituts für Dynamische Systeme und Regelungstechnik an der ETH Zürich.

einer großen Vielfalt möglicher Applikationen. Fakt ist: Wir können heute technische Gerätschaften herstellen, die die Fähigkeiten in bisher nicht erreichtem Maße haben, Entscheidungen zu treffen oder mit der Welt zu interagieren – seien sie fliegend, am Boden oder selbst im Ozean. Das wird zu vielen neuen Anwendungen führen. Beispielsweise im Bereich Katastropheneinsatz oder Umweltschutz. Unbenannte fliegende Vehikel (UAVs) könnten Umwelt-Monitoring betreiben, indem sie etwa Wasserproben an Orten entnehmen, die schwierig zu erreichen sind. Leute haben schon überlegt, ein Netzwerk für den Transport von Gütern zu gründen, ähnlich wie UPS oder DHL, aber anstatt Straßen zu benutzen, geht man in die Luft.

Das Motion-Tracking-System ermittelt die Lage und Bewegung jedes Kopters und leitet sie an einen PC-Cluster weiter. Der berechnet die Flugbahnen und sendet die notwendigen Steuerbefehle per Funk an jeden Flieger.

schweben für einige Minuten, lösen sich voneinander, fallen herunter und alles beginnt von Neuem. In dem Verbund-System tauschen benachbarte Module ihre Sensordaten per Infrarot aus und kombinieren sie mit eigenen Messdaten über Schub und Fluglage. Jedes Chassis kann so seine Schubkraft anpassen, um den Flug des gesamten Konstrukts stabil zu halten.

Neuere Forschungsarbeiten am IDSC in der Gruppe um Professor D'Andrea beschäftigen sich mit der Zukunft des Bauens. Unter dem Namen „Flying Machine Enabled Construction“ erweiterte die Gruppe zusammen mit den ETH-Forschern für Architektur und Digitale Fabrikation (DFAB ARCH) den Aufgabenbereich ihrer Quadrocopter. Ende 2011 gab es im FRAC Centre in Orleans die weltweit erste architektonische Installation zu bestaunen, die von fliegenden Robotern erbaut wurde. Aus 1500 Schaumstoff-Elementen errichteten vier IDSC-Flugmaschinen einen sechs Meter hohen Turm. Emsig schwirren sie zwischen den Bausteinen und dem Turm hin und her, rund 100 Elemente platzierten sie pro Stunde. Bei niedrigem Akku-Stand flogen sie zur Lade-station. Eine Flugzonen-Regelung und Kollisionsvermeidungsalgorithmen sorgten dafür,



dass sie sich nicht in die Quere kamen. Eine abgespeckte Version der Performance mit nur einem fliegenden Roboter war auch auf der CeBIT 2012 in Hannover zu bestaunen.

Die spektakuläre „Flight Assembled Architecture“ war das erste Projekt gemeinsam mit der DFAB-Gruppe um die Professoren Fabio Gramazio und Matthias Kohler. Die technische Grundlage für das andauernde Projekt ist die Infrastruktur der Flying Machine Arena, wobei einige Komponenten speziell für die Aufgaben im Bauwesen entwickelt wurden. Entscheidend war, dass die

Kopter die Elemente mit höchster Präzision an die vorgegebene Stelle aufsetzten. Beim Bau handelte es sich um ein Modell der „vertical village“ im Maßstab 1:100, eine „Architekturvision“ von Gramazio & Kohler, die in der französischen Region Meuse entstehen könnte. In dem geplanten 600 Meter hohen Gebäude soll sich ein Lebensraum für 30 000 Menschen entfalten. Bislang scheitern die kleinen Flugroboter jedoch noch am hohen Gewicht von echten Baumaterialien. (dab)

[www.ct.de/1216082](http://www.ct.de/1216082)

*c't:* Sie sagten kürzlich, die Sensor-Technologie sei eine der größten Herausforderungen in Ihrer Arbeit.

*D'Andrea:* Ich finde, von der Rechnerseite her ist alles ziemlich solide. Was verbessert werden könnte respektive was den Systemen neue Fähigkeiten verleihen würde, wären bessere Sensoren, am besten auch bessere Aktuatoren. Ein Roboterarm macht zum Beispiel einige Geräusche, man hört ihn mahlen, wenn er herumbewegt wird. Wenn ich hingegen meinen Arm bewege, hört man gar nichts, das ist perfekt. Und dann haben wir den sensorischen Teil – unsere Augen zum Beispiel. Wenn wir die Sensoren und Aktuatoren verbessern, verleihen wir diesen Systemen eine Menge neuer Fähigkeiten, aber freilich müssen wir auch noch an den Algorithmen arbeiten, um alles zusammenzubringen.

*c't:* Es gibt Marktanalysten, die behaupten, dass Hersteller von humanoiden Robotern in den kommenden zwei bis drei Jahren mit einer Serienproduktion beginnen könnten. Was halten Sie davon?

*D'Andrea:* Ich stimme dem nicht zu. Wir müssen einen Unterschied machen zwi-

schen der physischen und der digitalen Welt. In letzterer kann man so etwas wie ein grundlegendes Betriebssystem programmieren und andere können tonnenweise Applikationen schreiben, die darauf aufsetzen. Und die Anwendungen können dann vielen, vielen Zwecken dienen. Diese Analogie lässt sich auf die physische Welt nicht so einfach übertragen. Bezogen auf Robotik: Wenn man eine spezielle wirtschaftliche Herausforderung angehen will, sollte man den Roboter genau mit dieser Problematik vor dem geistigen Auge werfen. Humanoide sind generische Plattformen. Will man aber ein spezifisches Problem lösen, wird es preisgünstiger, robuster, und man wird es mit weniger Entwicklungszeit schaffen, eine Plattform genau für diese Aufgabe zu erstellen. Ganz im Gegensatz steht dazu, einen generischen Roboter zu bauen, der jede Menge Aufgaben bewältigen kann. In absehbarer Zukunft sehe ich keine vielseitig einsetzbaren, humanoiden Roboter am Werkplatz.

*c't:* In Ihrer Arbeit praktizieren Sie einen interessanten Ansatz: Sie forschen in größeren Teams und jedes Teammitglied kann die Ergebnisse

aller nehmen und für die eigenen Arbeiten weiterbenutzen.

*D'Andrea:* Ja, das stimmt. Bei uns profitiert jeder vom kollektiven Wissen aller Gruppenmitglieder. Aber wenn man das macht, muss es auch richtig passieren. Bei Entwicklung von Hardware oder einem Stück Software muss man sicher sein, dass es in gutem Zustand ist, bevor man es der Gruppe zur Verfügung stellt. Die Arbeit muss auch gut dokumentiert sein. Es ist wie bei einem Haus: wenn man es auf ein unzureichendes Fundament baut, stürzt es ein. Alle verschiedenen Teile müssen sehr robust und gut getestet sein. Speziell in den Bereichen Robotik und autonome Systeme – da macht man nie etwas komplett für sich alleine. Das ist alles so interdisziplinär, eine Reihe von Wissenschaften sind an Robotik-Forschung und -Entwicklung beteiligt. Es ist eine wichtige Bestrebung in unserer Gruppe: Wir wollen, dass unsere Leute breit aufgestellt sind, sodass sie mit Experten aus verschiedenen Ingenieurs- und denen aus den Computerwissenschaften oder der Automation kommunizieren können. Wir brauchen all dieses Wissen.