

# Energie- und Datenübertragung für einen Hubschrauberrotor mit piezoelektrisch angetriebenen Servoklappen

Dieter Reiners, DaimlerChrysler Forschung und Technologie in Frankfurt / Böblingen  
 Stephan Friedl, EADS CRC in Ottobrunn  
 Dieter Preißler, EUROCOPTER DEUTSCHLAND GmbH in Ottobrunn

**Kurzfassung:** Zur Reduktion von Außenlärm, Vibrationen und Lasten heutiger und zukünftiger Hubschrauber entwickelt EUROCOPTER DEUTSCHLAND z. Zt. eine Steuerungstechnologie auf Basis piezoelektrisch angetriebener Servoklappen an den Blatthinterkanten der Rotorblätter. Zur Ansteuerung dieser Klappen hat die DaimlerChrysler-Forschung in Frankfurt bzw. Böblingen in enger Abstimmung mit EUROCOPTER und der EADS-Forschung in Ottobrunn eine Piezoansteuerelektronik mit berührungsloser Energie- und Datenübertragung entwickelt. Bei der im Jahr 2005 begonnenen Flugerprobung wurde die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems erfolgreich bestätigt. In der Piezoansteuerelektronik wird eine Leistung bis zu 10kVA mit einem 100kHz-Wechselstromsystem zwischen Rotor und stationärem System in der Hubschrauberzelle induktiv übertragen. Die für die Regelung und Überwachung des Rotorsystems notwendigen Reglersollwerte und Sensorsignale werden über Lichtwellenleiter und eine optische Freistrahübertragung mit 100MBit/s und einer Zykluszeit von 0,5ms zwischen Rotor und stationärem System ausgetauscht. Der Vortrag beschreibt die Anforderungen an die Elektronik die Realisierung von stationärem System, Übertragungstechnik und Rotorkopfelektronik und erste Betriebserfahrungen.

Dieser Teil des Projektes ADASYS wurde von der DaimlerChrysler Forschung in Frankfurt (ab Oktober 2004 in Böblingen) durchgeführt. Das Projekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft gefördert.

## 1 EINLEITUNG

Zur Reduktion von Außenlärm, Vibrationen und Lasten heutiger und zukünftiger Hubschrauber entwickelt EUROCOPTER DEUTSCHLAND z. Zt. eine Steuerungstechnologie auf Basis piezoelektrisch angetriebener Servoklappen an den Blatthinterkanten der Rotorblätter. Die aerodynamischen Funktionsprinzipien und die daraus abgeleiteten Anforderungen an ein Klappensystem wurden ausführlich in [1] beschrieben. Die Funktion der piezoelektrisch angetriebenen Klappen wurde in [2] beschrieben. *Bild 1* zeigt die Servoklappen an der Hinterkante eines Rotorblattes im Prüflabor.

Die Flugerprobung des Adaptiven Rotorsystems (ADASYS) mit zwei aktiven Klappen an jedem der vier Rotorblätter einer BK117 wurde im Herbst 2005 begonnen. *Bild 2* zeigt den Erprobungsträger mit dem ADASYS-System beim Erstflug bei Eurocopter Deutschland am Standort Donauwörth.

Zur Ansteuerung dieser Klappen hat die DaimlerChrysler-Forschung in Frankfurt bzw. Böblingen eine Piezoansteuerelektronik mit berührungsloser Energie- und Datenübertragung entwickelt.



Bild 1: Rotorblatt mit Servoklappen im Prüflabor

In der Piezoansteuerelektronik wird eine Leistung bis zu 10kVA mit einem 100kHz-Wechselstromsystem zwischen Rotor und stationärem System in der Hubschrauberzelle induktiv übertragen. Die für die Regelung und Überwachung des Rotorsystems notwendigen Reglersollwerte und Sensorsignale werden über Lichtwellenleiter und eine optische Freistrahübertragung mit 100MBit/s und einer Zykluszeit von 0,5ms zwischen Rotor und stationärem System ausgetauscht.



Bild 2: BK117 mit ADASYS-System beim Erstflug

## 2 SYSTEMANFORDERUNGEN

Die Piezo-Ansteuerelektronik hat die Aufgabe, acht von Piezoaktuatoren angetriebene Servoklappen in den Rotorblättern nach Vorgabe einer in der Hubschrauberzelle installierten Anti-Lärm und Anti-Vibrationsregelung zu bewegen und insgesamt 72 Messwerte aus den Rotorblättern und dem Rotorkopf mit einer Taktfrequenz von 2 kHz an ein in der Hubschrauberzelle installiertes Tele-

metriesystem zu übertragen. Das System war für eine Experimentalflugerprobung zu qualifizieren.

Ein Problem bestand darin, dass bei dem für die Versuche vorgegebenen Versuchsträger alle Verbindungen zwischen stationärem System und dem Rotorkopf durch eine nur 8,5mm große Bohrung im Rotorkopf geführt werden mussten.

### 3 SYSTEMÜBERSICHT

Dieses Problem wurde dadurch gelöst, dass im Rotormast zwischen der Rotorkopfelektronik und einem Drehübertrager unter dem Hauptgetriebe ein Koaxialrohr mit einem Außendurchmesser von 8mm für die Energieversorgung der Rotorkopfelektronik (RKE) verlegt wurde, in dessen Innenleiter zwei Plastik-Lichtwellenleiter für die Datenübertragung zwischen Rotorkopfelektronik und stationärem System liegen. Bild 3 gibt eine Übersicht über das ADASYS-System.

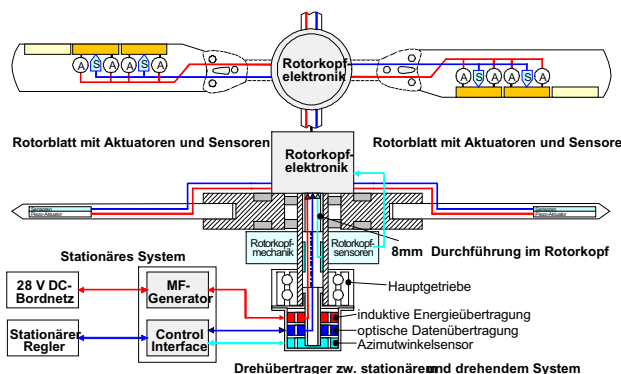


Bild 3: Übersicht über die Piezo-Ansteuerelektronik

Ganz oben im Bild sieht man zwei der vier Rotorblätter des Versuchsträgers. Die Aktuatoren und die Sensoren der Rotorblätter und die Sensoren am Rotorkopf und am Mast sind direkt mit der Rotorkopfelektronik verbunden. Diese ist über das Koaxialrohr mit dem innen liegendem Lichtwellenleiter an den Drehübertrager angeschlossen, in dem die induktive Energieübertragung und die optische Datenübertragung mit einem Azimutwinkelsensor kombiniert sind.

Die Energieversorgung der Rotorkopfelektronik übernimmt ein Mittelfrequenzwechselrichter (MF-Generator), der an das 24/28V-Hubschrauber-Bordnetz angeschlossen wird. Das Control-Interface setzt analoge Sollwerte und binäre Kommandos in einen seriellen optisch übertragbaren Datenstrom um und wandelt andererseits optisch übertragene serielle Datenströme der Rotorkopfelektronik in analoge Messwerte und binäre Meldungen um, die auf einem Steckerbrett ausgegeben werden. Die einzelnen Komponenten werden im Folgenden detailliert beschrieben. Der stationäre Regler steht für den von EUROCOPTER entwickelten Antivibrations- und Anti-Lärm-Regler, der in [3] näher beschrieben wurde.

### 4 ROTORKOPFELEKTRONIK

Über das unter Kapitel 3 genannte Koaxialrohr (links unten im Bild 4) wird ein 100kHz-Wechselstrom mit einer

konstanten Amplitude von  $14 A_{eff}$  in die Rotorkopfelektronik eingespeist.

Dieser Strom wird über Transformatoren mit nachgeschalteten Serienresonanzfiltern an die Leistungsmodule und an die Hilfsspannungsquelle übertragen. Die Leistungsmodule erzeugen die Vorspannung und die Steuerungsspannung für die Piezoaktuatoren in den Rotorblättern. Die Hilfsspannungsquelle stellt alle Betriebsspannungen für die Steuerelektronik bereit.

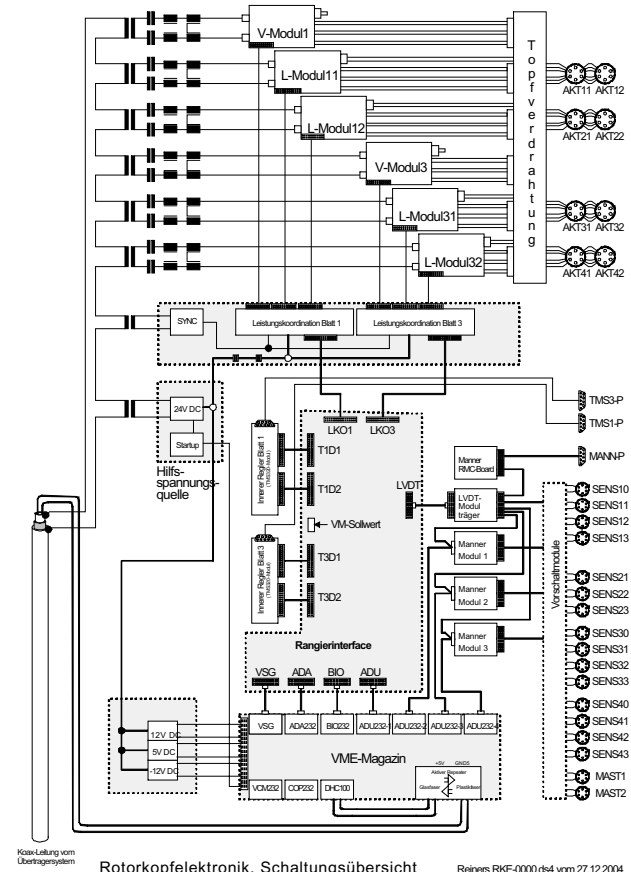


Bild 4: Blockschaltbild der Rotorkopfelektronik

Das VME-Magazin ist ein modulares digitales Steuer- und Regelsystem mit einer standardisierten parallelen Rückwandverdrahtung. Das von CONVERTEAM in Berlin (früher ALSTOM bzw. AEG-Automatisierungstechnik) vertriebene System wurde für industrielle Anwendungen entwickelt und im Rahmen des AROSYS-Projektes für den Einsatz im Hubschrauber mechanisch verstärkt.

Die Lichtwellenleiter sind im VME-Magazin an eine Kommunikationsbaugruppe (DHC100) angeschlossen. Der DHC100 der Rotorkopfelektronik schreibt alle empfangenen Kommandos und Reglersollwerte in ein DUAL-PORT-RAM am parallelen Bus. Die VME-Zentraleinheit (COP232) liest diese Werte aus und gibt die entsprechenden Signale über Analog- und Binärausgabekarten an die inneren Regler und die Leistungsmodulblöcke aus. Die inneren Regler basieren auf schnellen Signalprozessoren. Sie begrenzen Geschwindigkeit und Beschleunigung der Reglersollwerte und können für einen schnellen Lageregelkreis verwendet werden.

Außerdem nimmt der COP232 über Analog- und Binäreingabekarten Messwerte und Meldungen auf und schreibt sie in das DUAL-PORT-RAM, aus dem der DHC100 sie über den Lichtwellenleiter an das stationäre System überträgt.

Die Messwerte werden mit Ausnahme einiger elektronischer Strom- und Spannungssignale über Stecker aus dem Rotorkopf (MASTxx) und den Rotorblättern (SENSxx) aufgenommen und mit programmierbaren Vorverstärkern der Fa. Manner konditioniert.

Im Bild 5 sind beispielhaft die Aktuatoren und Sensoren eines Rotorblattes dargestellt. Sensoren erfassen hier u. a. Schwenkmomente, Blattspitzenbeschleunigungen, Aktuatorkräfte, Aktuatorwege und Aktuatortemperaturen sowie Klappenwinkel.

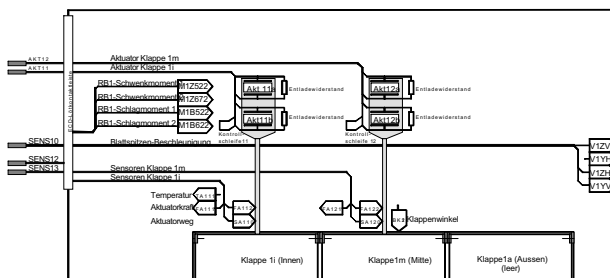


Bild 5: Aktuatoren und Sensoren eines Rotorblattes

Die Rotorkopfelektronik ist in ein von der Schenck-Fertigungs-GmbH in Darmstadt aus dem Vollen gefertigtes Aluminium-Gehäuse (Bild 6) eingebaut, welches mit einem speziellen Flansch auf dem Rotorkopf des Versuchsträgers befestigt wird.

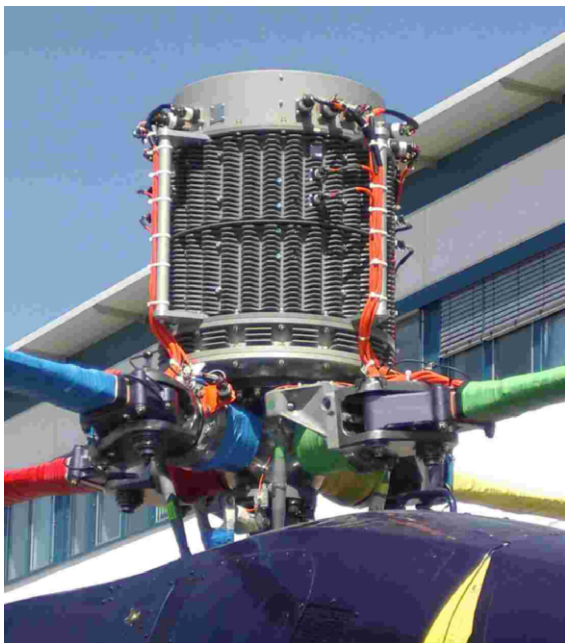


Bild 6: Rotorkopfelektronik auf dem Rotor der BK117

#### 4.1 Ansteuerung von Piezo-Aktuatorpaaren

Jede Servoklappe wird von einem Piezo-Aktuatorpaar über Zug- bzw. Schubstangen angesteuert. Elektrisch

sind die beiden in Reihe geschalteten Aktuatoren eines Paares an ein Leistungsmodul zur Vorspannungserzeugung angeschlossen, während der Mittelabgriff eines Aktuatorpaares von einem Leistungsmodul auf die für die geforderte Position nötige Spannung eingestellt wird. (Bild 7) Ein Vorspannungsmodul versorgt die Aktuatorpaare zweier Rotorblätter. Die beiden Klappen eines Rotorblattes sind außerdem elektrisch parallel geschaltet.

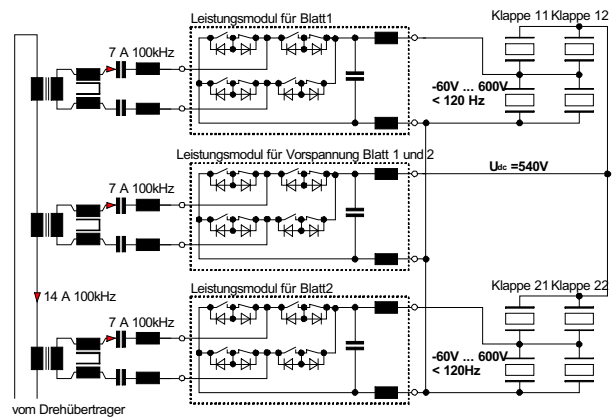


Bild 7: Ansteuerung von vier Piezo-Aktuatorpaaren

#### 4.2 Leistungsmodule

Die Rotorkopfelektronik enthält insgesamt sechs 100kHz-Direktumrichter bzw. Leistungsmodule, mit denen die Vorspannungen und die Steuerspannungen der acht piezoelektrisch angetriebenen Servoklappen erzeugt werden. Die mit einem Wechselstrom konstanter Amplitude gespeisten Direktumrichter sind für eine Leistung von jeweils etwa 3kW ausgelegt. Die Ausgangsspannung ist zum Schutz der Piezo-Aktuatoren auf Werte zwischen -60 und +600V begrenzt. Der große Vorteil des stromgespeisten Direktumrichters liegt u. a. darin, dass er im Gegensatz zum spannungsgespeisten Spannungswandler keinerlei Energiespeicher, wie z. B. große Induktivitäten oder Kapazitäten, benötigt.

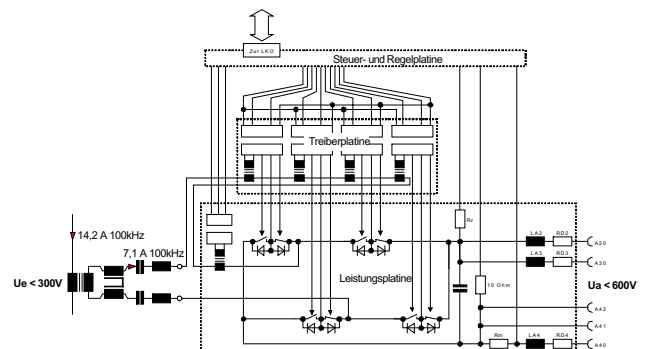


Bild 8: Prinzip des 100kHz-Direktumrichters

Der Direktumrichter (Bild 8) besteht aus der Stromeinspeisung und den zu einer Vollbrücke verschalteten Leistungsschaltern (MOS-FETs). Diese schalten die einzelnen Halbwellen des 100kHz-Speisestromes so auf die Aus-



gänge durch, dass sich an den Piezoaktuatoren die geforderten Spannungen und damit die geforderten Positionen einstellen. Über den MOS-FETs sind die Treiberplatine und die Steuer- und Regelplatine angedeutet. Die Steuer- und Regelplatine wird von einer Leistungscoordination (LKO) angesteuert, die die Ansteuersignale der verschiedenen Leistungsmodule auf Plausibilität überwacht. Bild 9 zeigt eine Draufsicht auf die Steuer- und Regelplatine des Direktumrichters.

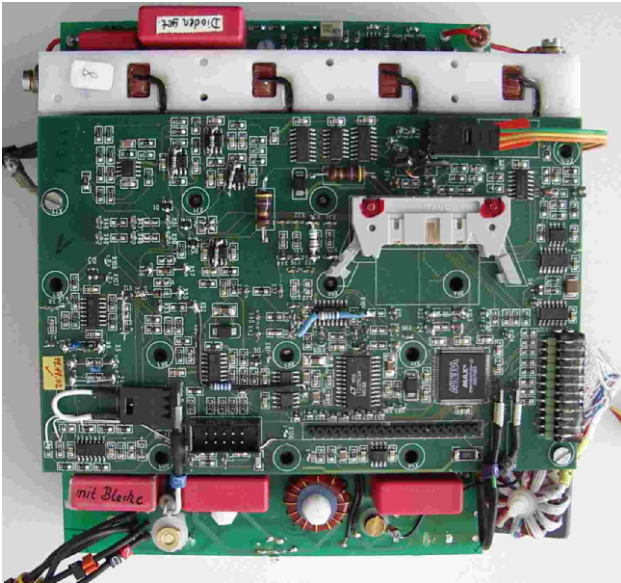


Bild 9: 100kHz-Direktumrichter (Draufsicht)

Bild 10 gibt einen Blick auf die Stirnseite eines Leistungsmoduls. Man erkennt unten das Kreissegment der Basisplatte, die in die runde Innenseite des RKE-Gehäuses geschraubt wird. Auf der Basisplatte sind Power-MOS-Fets montiert. Diese werden über eine Leistungsplatine miteinander verschaltet, auf der auch die Filterelemente montiert sind. Darüber liegen dann die Treiberplatine und die Steuer- und Regelplatine. Das Ing.-Büro Dr. Fuld hat nach Vorgaben der DaimlerChrysler-Forschung alle Leiterplatten des Direktumrichters im Detail entwickelt und deren Musterbau gesteuert.



Bild 10: 100kHz-Direktumrichter (Stirnseite)

Der 3kW-Direktumrichter wiegt mit der Kreissegmentbasisplatte etwa 1kg. Sein Bauvolumen beträgt etwa 1 dm<sup>3</sup>.

## 5 ÜBERTRAGUNGSSYSTEM

Kern des Übertragungssystems ist ein Drehübertrager, der einen für 100kHz optimierten Transformator mit drehbarer Sekundärwicklung, einen Raum für die optische Freistrahübertragung zwischen den beiden Plastik-Lichtwellenleitern und als Azimut-Winkelsensor einen inkrementalen, optischen Winkelgeber enthält. Bild 11 zeigt eine Schnittzeichnung des Drehübertragers unter dem Getriebedeckel mit eingeführttem KOAX-Kabel und Plastiklichtwellenleiter. Bild 12 zeigt ein Foto des unterhalb des Getriebes montierten Drehübertragers.

### 5.1 Energieübertragungssystem

Die feststehende Primärwicklung des Drehübertragers ist auf die Innenseite eines Ferritringes gewickelt, die dazu konzentrische Sekundärwicklung von außen auf den rotierenden inneren Ferritkern.

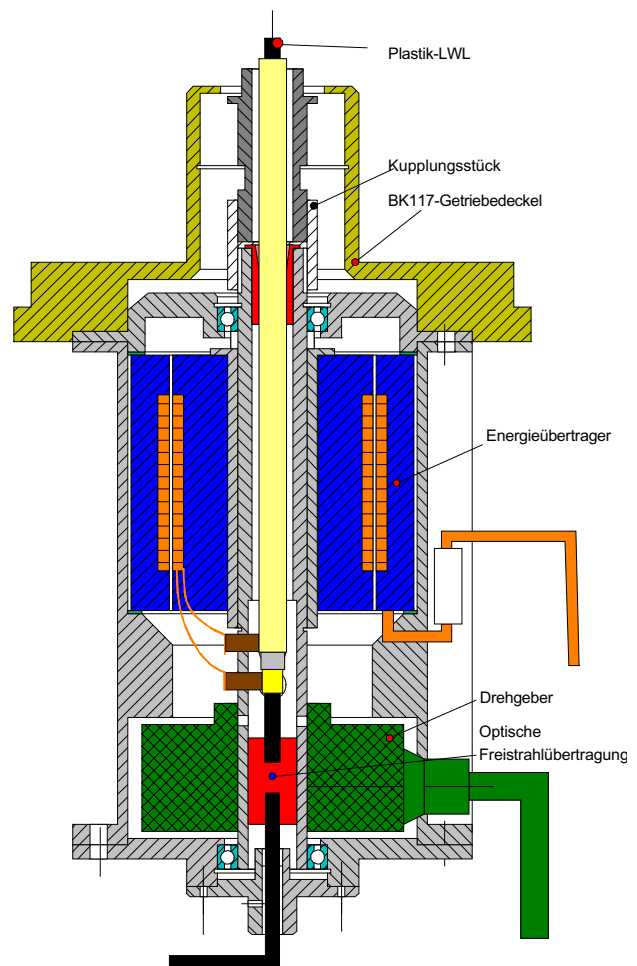


Bild 11: Schnittbild durch den Drehübertrager

Der Transformator ist für die Übertragung einer Leistung von 10kVA bei einer Betriebsfrequenz von 100kHz ausgelegt. Die Einspeisung erfolgt aus dem stationären MF-

Generator mit einem eingepprägten Strom von  $28A_{eff}$ . Über Kronkontakte wird die rotierende innere Wicklung mit dem in der Übertragerwelle verlegten Koaxialrohr verbunden, über die der Strom zur Rotorkopfelektronik übertragen wird.



Bild 12: Drehübertrager unterhalb des BK117-Getriebes

Die Spannung an den Wicklungen stellt sich entsprechend dem Leistungsbedarf der Rotorkopfelektronik ein. Der Spitzenwert der 100kHz-Spannung wird vom speisenden Wechselrichter auf 850V an der Primärwicklung und auf 1,7kV an der Sekundärwicklung und am KOAX-Rohr begrenzt. Bei dieser Spannung und den zusätzlichen im KOAX-Rohr auftretenden höher harmonischen Spannungsspitzen kam der Auslegung der nur 0,5mm dicken Isolation zwischen Innen- und Außenrohr besondere Bedeutung zu. Nach einigen negativen Erfahrungen mit Überhitzungen wegen Plasmaentladungen in den verbliebenen Lufteinschlüssen wurde mit einem elastischen Silikonschlauch letztlich eine Lösung gefunden, die Lufteinschlüsse vermeidet und einer 100kHz-Prüfspannung von 3kV standhält.

## 5.2 Datenübertragungssystem

Die Datenübertragung zwischen dem stationären und dem rotierenden System erfolgt über Lichtwellenleiter und eine optische Freistrahübertragung. Die Datenübertragung basiert auf einem modifizierten, deterministischen FDDI-Protokoll. FDDI ist ein in ISO/IEC 9314 genormtes Datenübertragungsnetz. Die Übertragungsgeschwindigkeit beträgt 100 MBit/s. FDDI arbeitet standardmäßig mit  $62,5\mu m$ -Glasfasern. Die Kommunikationsbaugruppen DHC100 in den VME-Magazinen des stationären und des rotierenden VME-Systems haben jeweils einen Sender und Empfänger für  $62,5\mu m$ -Glasfasern. Die optische Freistrahübertragung arbeitet dagegen auf der Basis von 1mm-Plastikfasern. Für die Signalwandlung zwischen Plastik- und Glasfasern und umgekehrt werden in der Rotorkopfelektronik und im stationären System speziell entwickelte Repeater eingesetzt.

In der optischen Freistrahübertragung (Bild 13) stehen sich die beiden Sendefasern in der Rotationsachse direkt

gegenüber. Die Empfangsfasern liegen im Strahlenkegel der gegenüber liegenden Sendefasern in einem ringförmigen Bereich, der auch bei Rotation des RKE-Gehäuses nahezu konstante Intensität besitzt. Alle Faserenden sind plan poliert. Der Abstand der Fasern wird so eingestellt, dass die aus den Sendefasern austretenden Lichtkegel die gegenüber liegenden Empfangsfasern gerade komplett überstrahlen. Wichtig ist zudem eine möglichst geringe Rückstreuung aus einer Sendefaser in die eigene Empfangsfaser. Zu diesem Zweck sind der gesamte Freistrahübertragungsraum und die Faserhalterungen in einem matten schwarzen Farbton ausgeführt. Linsensysteme sind für diese Freistrahübertragung nicht nötig.

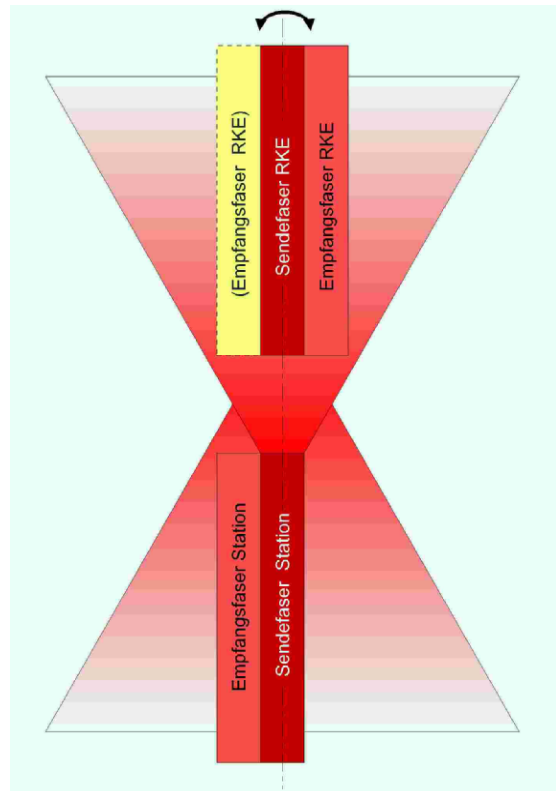


Bild 13 : Prinzip der optischen Freistrahübertragung

## 5.3. Azimutwinkelsensor

Als Azimutwinkelsensor kommt ein inkrementaler, optischer Winkelgeber mit 360-Impulsen und einer Nullmarke pro Umdrehung zum Einsatz, aus dem ein One-per-rev-Signal mit elektronisch programmierbarer Nullposition erzeugt wird. Mit diesem One-per-rev-Signal werden die Klappenpositionen während einer Rotorumdrehung synchronisiert.

## 6 STATIONÄRES SYSTEM

Bild14 zeigt das VME-Magazin mit allen Komponenten des stationären Teils der Piezo-Ansteuerelektronik. Darüber ist der MF-Generator zu erkennen.

Darunter befindet sich das stationäre VME-Magazin mit 8 Analogeingaben für die Sollwertvorgaben und 72 Analogausgaben für die Messwertausgaben. Außerdem enthält

das VME-Magazin eine Zählerbaugruppe zur Auswertung des Azimutsensors und Binärein- und Ausgaben für die Eingabe von Schalterbefehlen und die Ausgabe von Meldungen auf einer LED-Leiste.

Unterhalb des VME-Magazins ist eine Frontplatte mit Schaltern, LEDs und BNC-Buchsen für die Ein- und Ausgabe aller analogen Signale erkennbar. Im unteren Teil des Bildes ist die dspace-Box zu sehen, auf der die Regelalgorithmen zur Vibrations- und Lärmreduzierung implementiert sind.

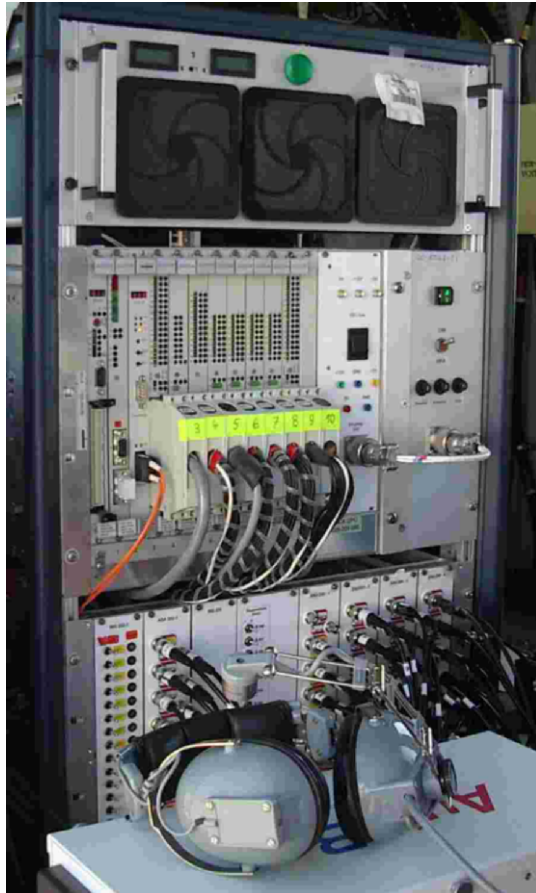


Bild 14: Rack mit dem stationären ADASYS-Teil

## 6.1 MF-Generator

Kernelement der Energieversorgung der Rotorkopfelektronik ist der vom Ing.-Büro Paul Steffens nach Vorgaben der DaimlerChrysler-Forschung gebaute Mittelfrequenz-Generator im stationären System (MF-Generator).

Bild 15 zeigt das Prinzipschaltbild des MF-Generators zusammen mit dem nachgeschalteten Drehübertrager. Der an das 28V-Bordnetz des Hubschraubers angeschlossene MF-Generator besteht aus einem DC-DC-Wandler und einem Wechselrichter. Der achtstufige DC-DC-Wandler lädt einen 400V-Gleichspannungszwischenkreis, aus dem der Wechselrichter versorgt wird. Der Wechselrichter mit nachgeschaltetem Gyrator erzeugt am Ausgang einen eingepprägten Wechselstrom einer konstanten Amplitude von 28A. Die Ausgangsspannung stellt sich abhängig vom Leistungsbedarf ein, wird aber elektronisch auf 850V begrenzt.

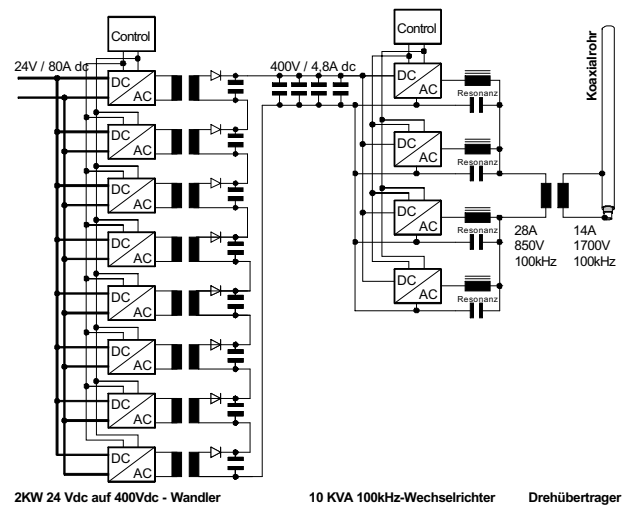


Bild 15: MF-Generator mit Drehübertrager

Die Stromaufnahme aus dem 28V-Bordnetz wird durch eine Eingangsstrombegrenzung unter 80 A gehalten. Die maximale umsetzbare Wirkleistung ist damit auf etwa 2kW begrenzt. Der Wechselrichter kann aber max. 10kVA Scheinleistung zwischen der Rotorkopfelektronik und dem Gleichspannungszwischenkreis an seinem Eingang bewegen.

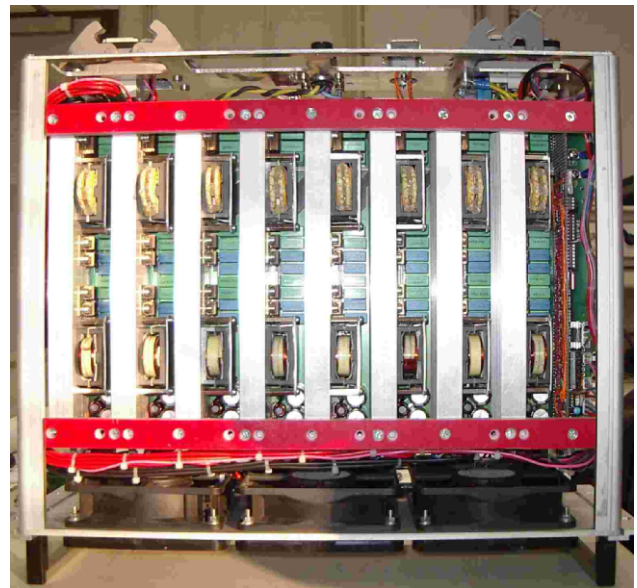


Bild 16: 24V-400-DC/DC-Wandler von Paul Steffens

Der komplette DC/DC-Wandler und der 100kHz-Umrichter sind in einem 19"-Gehäuse mit 3HE montiert. Bild 16 gibt einen Blick auf die acht DC/DC-Wandlerstufen frei.

## 7 BETRIEBSERFAHRUNGEN

### 7.1 Baugröße der Rotorkopfelektronik

Die Baugröße der Rotorkopfelektronik war bestimmt durch das Volumen der elektronischen Komponenten, besonders das Volumen des VME-Magazins, und durch die für die Ableitung der Verlustwärme nötige Oberfläche.



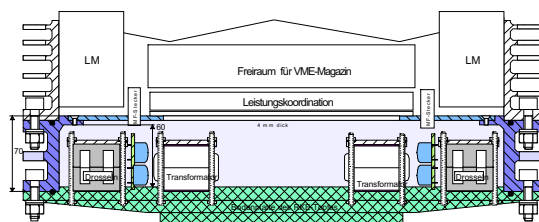
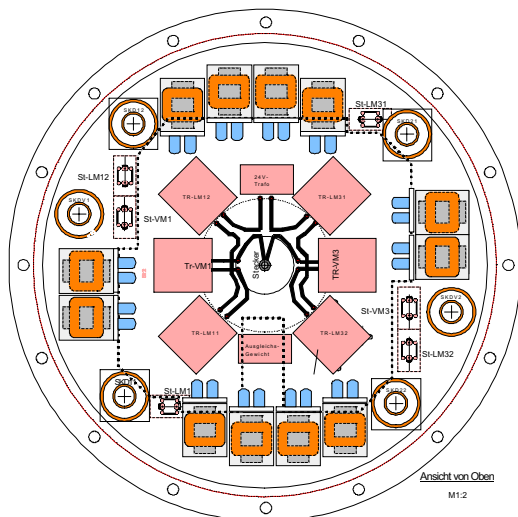
Bei einem Scheinleistungsumsatz von 10kVA ist im RKE-Gehäuse mit Verlusten in der Größenordnung von 300 bis 400 W zu rechnen, die letztlich durch Konvektion aus dem hermetisch dichten Gehäuse abgeführt werden muss. Bei alledem wurde der Durchmesser der Rotorkopfelektronik auf etwa 460mm begrenzt, um die Zugänglichkeit der Rotorkopfmechanik nicht zu behindern. Die Bauhöhe des RKE-Gehäuses beträgt 590 mm.

Das Gewicht der Rotorkopfelektronik von annähernd 70kg und das Volumen von rund 90 Litern sind für ein Experimentalsystem akzeptabel. Für eine Weiterentwicklung besteht aber ein erhebliches Optimierungspotential.

## 7.2 Betriebstemperatur

Die Innentemperatur des RKE-Gehäuses steigt bei stehendem Rotor und 25°C Umgebungstemperatur nach längerer Betriebsdauer auf über 55°C. Die Elektronik kommt damit an ihre thermische Leistungsgrenze.

Bei drehendem Rotor beträgt die Temperaturerhöhung der Rotorkopfelektronik weniger als 10°C, so dass ein längerer Flugbetrieb problemlos möglich ist.



AROSYS  
Adaptive Rotorsysteme

Aufbaukonzept Bodenplatte mit MF-Topf (Variante 6)

Rechner 1: JAROSYS/ROSK-MF-DC-POWER.dwg 21.11

Bild 17: Symmetrischer Aufbau zur Unwuchtminimierung

## 7.3 Unwucht

Die Unwucht des 70kg schweren RKE-Gehäuses darf 10 g m nicht überschreiten.

Diese Forderung wurde weitgehend durch eine rotations-symmetrische Anordnung aller Komponenten erreicht. In Bild 17 sieht man z. B. die Anordnung der Einspeisetrans-

formatoren und Filterdrosseln auf der Bodenplatte. Die verbleibende Unwucht wurde mit einem statischen Verfahren ermittelt und durch den Einbau passender Gegengewichte im Bereich von Bodenplatte und Deckel des RKE-Gehäuses so weit kompensiert, dass sich eine dynamische Auswuchtung auf dem Hubschrauber als überflüssig erwies.

## 7.4 Mechanische Lasten und Vibration

Die am Rand des RKE-Gehäuses montierten Leistungsmodul sind bei der Rotordrehzahl von 400 U/min einer Zentrifugalbeschleunigung bis zu 36 g ausgesetzt. Die Elektronik wurde durch einen entsprechend stabilen Aufbau an diese Lasten angepasst.

Außerdem muss die Rotorkopfelektronik die auf dem Rotorkopf auftretenden Vibrationen beherrschen.

Die Leiterplatten des VME-Systems sind durch stabilisierende Maßnahmen für den Einsatz in der Rotorkopfelektronik ertüchtigt worden. Deshalb wurden die relativ leichten Kunststoffschienen für die Führung der Leitplatten im VME-Magazin durch einen speziellen Aluminium-Rahmen verstärkt. Zusätzlich wurde eine durch das ganze VME-Magazin gehende Mittelsäule (Bild 18) so auf alle Leiterplatten aufgebaut, dass die freien Abstände zwischen den Befestigungen der Leiterplatten mehr als halbiert wurden.

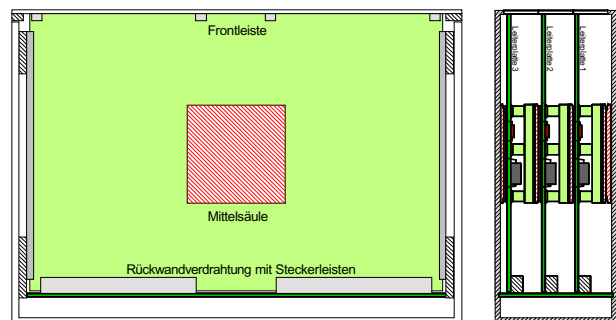


Bild 18: Leiterplattenfixierung durch eine Mittelsäule

## 8 KENNDATEN

- Die Versorgung des Systems erfolgt aus dem 24/28V-DC-Bordnetz. Die Stromaufnahme wird elektronisch auf Werte unter 80A begrenzt.
- Die Energieübertragung erfolgt induktiv bei einer Frequenz von 100kHz. Die maximal übertragbare Leistung beträgt 10kVA.
- Die FDDI-Datenübertragung überträgt 8 Sollwerte und 72 Messwerte über Lichtwellenleiter und eine optische Freistrahübertragung mit 100 MBit/s und einer Zykluszeit von 0,5ms.
- Zur Leistungsteuerung des Piezo-Aktuatoren dienen 100kHz-Direktumrichter. Die Vorspannung ist fest auf 540V eingestellt. Die Ausgangsspannung der Leistungsmodul liegt zwischen -60V und 600V.
- Eine synchrone Ansteuerung von 8 Piezo-Aktuator-Paaren ist bis zu 120Hz möglich.

## 9 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Mit dem ADASYS-Projekt ist weltweit erstmalig eine Einzelblattsteuerung über Servoklappen in den Rotorblättern eines Hubschraubers im Flug erprobt worden. Damit konnte auch die Funktionsfähigkeit der Piezo-Ansteuerelektronik mit berührungsloser Energie- und Datenübertragung unter Beweis gestellt werden. Diese Ansteuerelektronik zeichnet sich besonders dadurch aus, dass es im Gegensatz zu Schleifringsystemen keine betriebsmäßig bewegten Kontakte im System gibt. Die Ansteuerelektronik ist daher prinzipiell wartungsfrei. Bezüglich des Gewichtes und der Baugröße besteht im Sinne eines Serieneinsatzes allerdings noch ein deutlicher Optimierungsbedarf. Derzeit arbeitet Eurocopter zusammen mit EADS-CRC an einem Nachfolgesystem, dessen Energie- und Datenübertragung auf dem Einsatz von Schleifringen basiert.

## 10 DANK

Wir danken Wolfgang Beyer, Waldemar Bergmann, Jürgen Luther, Frank Sanzenbacher, Georg Schmidt, Klaus Schäfer, Klaus Sedlak und Anton Seelig von der DaimlerChrysler-Forschung und den Ingenieurbüros Paul Stefens und Dr. Berthold Fuld für ihre innovativen Projektbeiträge.

Wir danken Wolfgang Möllmann und seinen Kollegen von der AEG-Automatisierungstechnik, dann ALSTOM-Power-Conversion und heute Converteam in Berlin für Ihre Geduld mit unseren Sonderwünschen bezüglich der Eigenschaften des VME-Magazins. Unser Dank richtet sich auch an Prof. Dr.-Ing. Peter Mutschler und sein Team vom Institut für Stromrichtertechnik und Antriebsregelung der TU Darmstadt, die uns bei der Realisierung des programmierbaren Logikbausteins für die Direktumrichtersteuerung intensiv unterstützt haben. Wir bedauern, dass uns die Firmen EMK und Schenck-Fertigungs-GmbH in Darmstadt nicht mehr für die Fertigung elektronischer und mechanischer Musterbauteile zur Verfügung stehen.

Wir danken Dr. Willi Martin, Dr. Peter Jänker und Frank Hermle von der EADS-Forschung für ihre kritischen Anregungen und Diskussionsbeiträge. Und nicht zuletzt danken wir den Mitarbeitern in Entwicklung, Konstruktion, Versuchswerkstatt, Qualitätssicherung und Flugerprobung von EUROCOPTER, ohne die wir die hochgesteckten Ziele nur schwer erreicht hätten. Wir danken ganz besonders Dr. Valentin Klöppel und Bernhard Enenkl von EUROCOPTER Deutschland, die uns auch in kritischen Projektphasen voll unterstützt haben.

## 11 LITERATUR

- [1] Enenkl, B., Klöppel, V., Preißler, D., Jänker, P.  
„Full Scale Rotor with Piezoelectric Actuated Blade Flaps“  
28<sup>th</sup> European Rotorcraft Forum, Bristol, United Kingdom, September 2002
- [2] Dieterich, O., Enenkl, B., Roth, D.,  
“Trailing Edge Flaps for Active Rotor Control, Aeroelastic Characteristics of the ADASYS Rotor System”  
62<sup>nd</sup> AHS Annual Forum, Phoenix, AZ, USA, May 2006
- [3] Roth, D., Enenkl, B., Dieterich, O.,  
„Active Rotor Control by Flaps for Vibration Reduction - Full Scale Demonstrator and first Flight Test Results“  
32<sup>th</sup> European Rotorcraft Forum, Maastricht, The Netherlands, September 2006
- [4] Seelig, Anton,  
”Berührungslose induktive Energieübertragung“  
Vortrag am Institut für Stromrichtertechnik der TU Darmstadt, 22.1.2003  
  
Vortrag beim Elektrotechnischen Kolloquium der Universität Paderborn, 30.11.2004
- [5] Luther, J., Reiners, D., Seelig, A.,  
“Vorrichtung und Verfahren zum Übertragen und Bereitstellen der Energie kapazitiver Aktuatoren“  
DE 10301 978.2, PCT/EP03/14214,  
Priorität 20.01.2003
- [6] Seelig, Anton,  
“Anordnung zur berührungslosen induktiven Übertragung elektrischer Leistung“  
DE 4446779, PTC/EP95/05082,  
Priorität 20.12.1994

Rs