

**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:** 78 (1987)

**Heft:** 9

**Artikel:** Ein Energieversorgungssystem für die Raumfahrt

**Autor:** Koebel, H.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-903852>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 14.01.2026

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

# Ein Energieversorgungssystem für die Raumfahrt

H. Koebel

**An die Zuverlässigkeit der Energieversorgung autonomer Plattformen im Weltraum werden ausserordentlich hohe Anforderungen gestellt. Die Anlage des Eureka-Projektes wird beschrieben, wobei auf einige besondere Probleme der Raumfahrt eingegangen wird. Anschliessend erfolgt ein Ausblick auf das Columbus-Programm der neunziger Jahre.**

**Des exigences extrêmement élevées sont posées à la fiabilité de l'alimentation en énergie de plates-formes spatiales autonomes. L'installation du projet Eureka est décrite, notamment quelques problèmes spéciaux d'astronautique, puis un aperçu du programme Columbus des années 90 est donné.**

Der Aufsatz entspricht dem Fachreferat anlässlich des Technischen Presse-Colloquiums TPC '86 der AEG vom 24. Oktober 1986 in Frankfurt a.M.

## Adresse des Autors

Dipl. Phys. Heinz Koebel, Leiter des Fachgebietes Raumfahrt im Fachbereich Neue Technologien, Raumfahrt, AEG, D-2000 Wedel.

## 1. Spacelab - Eureka - Columbus

Im Auftrag der ESA (European Space Agency) baut ein Konsortium zahlreicher europäischer Firmen die autonome Plattform EURECA. Der Name EURECA steht für *EUropean RETrievable CArrier*; es handelt sich also um einen wiederverwendbaren Nutzlastträger (Fig. 1). Vor EURECA war SPACELAB im Weltraum, und nach EURECA wird COLUMBUS kommen. Damit lässt sich die Eingliederung von EURECA in die europäischen Raumfahrt-Grossprojekte recht gut beschreiben.

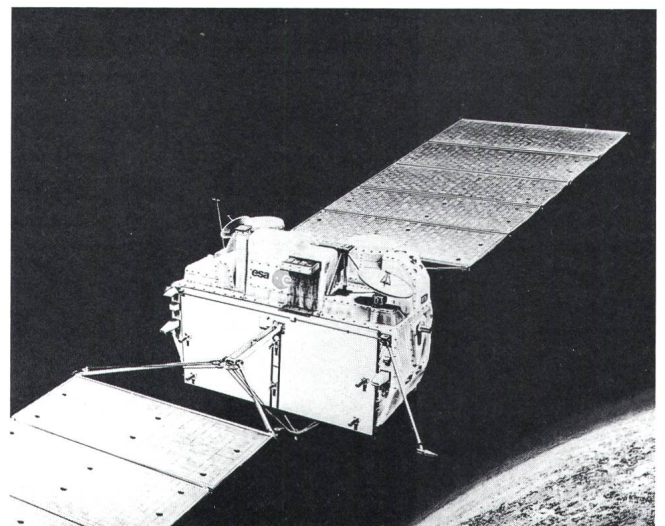
Mit dem Spacelab-Programm hat Europa den ersten Schritt in die bemannte Raumfahrt getan. Hingegen wurde dabei die fast vollständige politische Abhängigkeit von den USA, die logistische Abhängigkeit vom Shuttle und - während der Mission - vom Orbiter und seiner Infrastruktur. Einstellen musste man sich auf die für manche Experimente problematische kurze Missionsdauer von lediglich etwa acht Tagen im All.

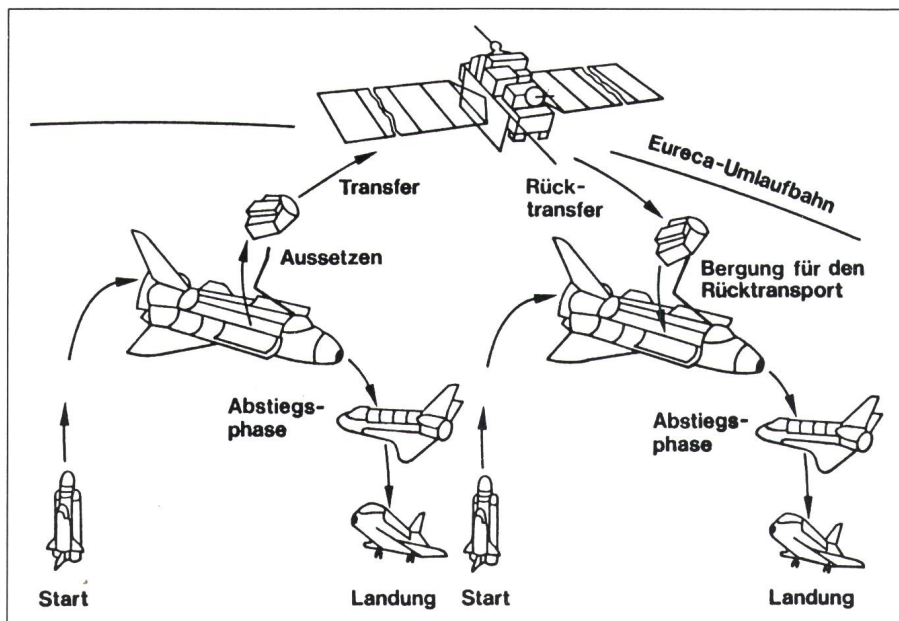
Das Columbus-Programm geht einen entscheidenden Schritt weiter. Zwar bleibt die Verbindung mit der NASA zunächst ein mitbestimmender Faktor. So wird das druckbeaufschlagte Modul, das «pressurized module», als Element der Raumstation konzipiert. Die anderen Elemente des Programms, also die Plattformen und das bemannte, freifliegende Modul, zielen mittel- bis langfristig auf eine stärkere europäische Autonomie.

Eureka steht nicht nur zeitlich, sondern auch technisch zwischen diesen beiden Programmen. Für den Transport in die Erdumlaufbahn benötigt die Plattform zwar den amerikanischen Shuttle, führt jedoch danach ihre jeweiligen Missionen unabhängig und autark durch (Fig. 2). Eureka verfügt damit im Gegensatz zu Spacelab über alle für den Betrieb notwendigen Untersysteme. Dazu gehört auch eine eigenständige Energieversorgung. AEG zeichnet verantwortlich für das gesamte Energieversorgungssystem. Bei Spacelab wurde die elektrische Energie von den Brennstoffzellen des Orbiters der NASA geliefert. Die Um-

**Figur 1**  
**Eureka im Orbit**  
(Quelle: ESA)

Masse gesamt: 4000 kg  
Masse Nutzlast: 1000 kg  
Elektrische Leistung des Solargenerators: 5200 W  
Lageregelungsgenauigkeit: 1%  
Restgravitation:  $10^{-5}$  g,  
1 Hz;  $10^{-3}$  g, 100 Hz  
Umlaufbahn: 500 km; 28°  
Dauer eines Raumflugs:  
6 Monate (Betrieb)  
+ 3 Monate (ausser  
Betrieb)





Figur 2 Eureka – Phasen eines Raumfluges

(Quelle: ESA)

rüstung auf andere Nutzlasten ebenso wie Wartungs- und Reparaturarbeiten sind jedoch auch bei Eureka nur auf dem Boden durchführbar, d.h. die Plattform muss nach jeweils etwa neun Monaten Einsatz im Weltraum zur Erde zurückgebracht werden. Dies wird bei Columbus nicht mehr der Fall sein.

Eureka ist für mindestens fünf Missionen bei einer «turn around»-Zeit von etwa 18 Monaten ausgelegt. Im Gegensatz dazu werden die Columbus-Elemente für eine im Prinzip unbegrenzte Lebensdauer im Weltraum konzipiert, wobei die entsprechende Wartung und Reparatur im Orbit vorausgesetzt werden.

## 2. Energieversorgungssystem der Eureka-Plattform

### 2.1 Stromerzeugung

Die Plattform ist für den kontinuierlichen Betrieb einer Nutzlast mit einer Leistungsanforderung von 1 kW konzipiert. Weiterhin müssen die für den Betrieb notwendigen Untersysteme, wie Lagerregelung, Datenmanagement, Datenübertragung usw. ständig mit etwa 1,3 kW versorgt werden. Das führt zu einem kontinuierlichen Leistungsbedarf von rund 2,3 kW. Dieser muss sowohl während der Sonnenphase als auch während der Dauer des Durchgangs durch den Erdschatten bereitgestellt werden.

Diese elektrische Leistung wird durch photoelektrische Umwandlung des Sonnenlichts gewonnen. Zu berücksichtigen ist, dass sich die Plattform während etwa 40% der Dauer jedes Erdumlaufs (Umlaufdauer 90 min) im Erdschatten befindet, also kein Sonnenlicht als Energiequelle zur Verfügung steht. Werden ferner die Leistungsverluste im Energieversorgungssystem selbst und hier insbesondere der Wirkungsgrad der Energiespeicherung einkalkuliert, so gelangt man zu einer Leistungsanforderung an den Solargenerator von 5,2 kW. Dieser wurde so konzipiert, dass er diese Leistung am Ende der ersten Mission erbringt. Die sogenannte «begin of life»-Lei-

stung liegt bei 5,5 kW. Damit erhält die Plattform den bisher leistungsstärksten Solargenerator der westlichen Welt mit Ausnahme des Skylab-Programms der NASA. Erinnert man sich, dass der erste deutsche Forschungssatellit AZUR im November 1969 mit einer elektrischen Leistung von knapp 40 W auskommen musste, so gibt das einen plastischen Eindruck von der Entwicklung, die inzwischen stattgefunden hat (Fig. 3). Dazwischen liegen allerdings rund 45 Projekte mit insgesamt rund 90 Satelliten.

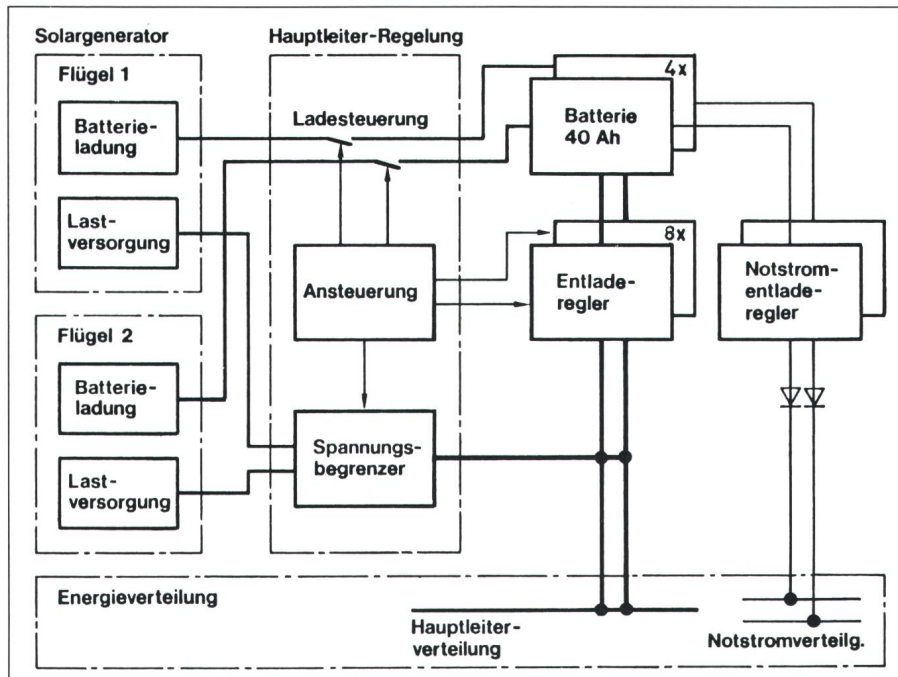
### 2.2 Energiespeicherung

Bedingt durch den Betrieb mit Sonnenphase und Schattendurchgang ist die Energiespeicherung eines der missionskritischen Elemente der Energieversorgung (Fig. 4). Für die kontinuierliche Bereitstellung von etwa 2,3 kW elektrischer Leistung in der Schattenphase sind vier parallel arbeitende Batteriemodule von je 30 NiCd-Zellen mit einer Kapazität von jeweils 40 Ah vorgesehen. Während der Mission durchlaufen die Batterien etwa 4000 Lade-/Entladezyklen bei einer Entladetiefe von 30%. Dies stellt für jede Batterie eine starke Belastung dar. Um die geforderte Zuverlässigkeit zu gewährleisten, ist ein erheblicher elektronischer Aufwand erforderlich, mit dem die Batteriefunktionen ständig überwacht werden, um gegebenenfalls das Energieversorgungssystem durch gezielte Eingriffe in den Betrieb der Batterien zu schützen. Die elektrischen Lasten werden in der Schattenphase über insgesamt acht identische, jeweils parallel geschaltete Entladeregler von den Batterien gespeist.

Figur 3  
Herstellung der  
Solargeneratoren

Höchste Reinheit ist in der Produktion von Raumfahrt-Solargeneratoren oberstes Gebot. Geringste Verunreinigungen bei der Herstellung bergen die Gefahr späterer Ausfälle. In diesem Reinst-Raum der AEG werden die Solarzellen durch Aufbringen extrem dünner Schutzgläser gegen die Teilchenstrahlung im Weltraum geschützt.





Figur 4 Eureka – Energieversorgungssystem

### 2.3 Energieaufbereitung und -verteilung

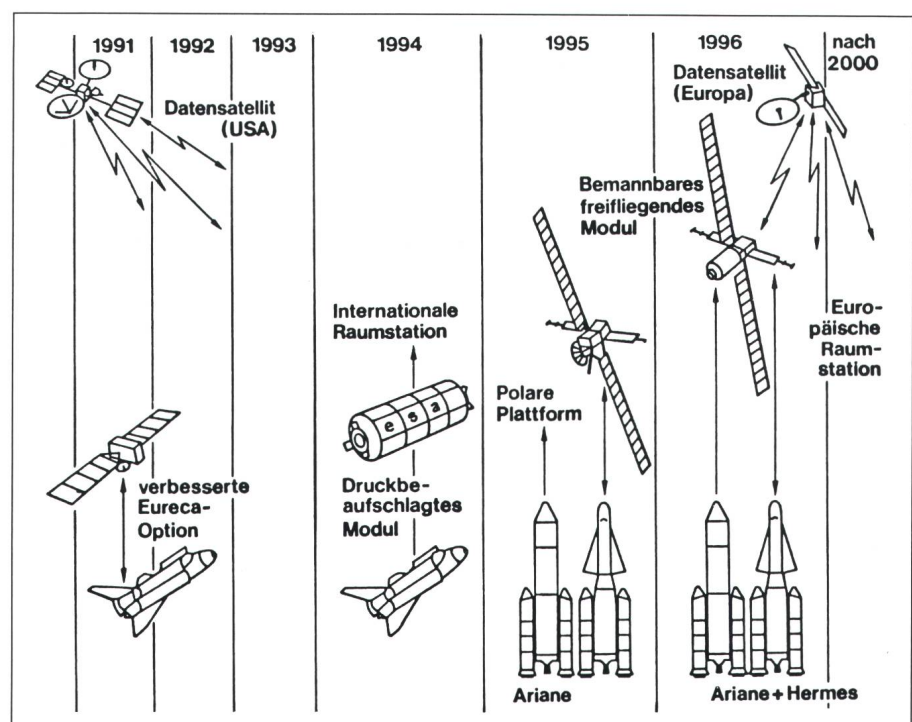
Die Spannung des Hauptleiters, das ist die Sammelschiene, wird direkt aus dem Solargenerator erzeugt und durch 18 sequentiell angeordnete, geschaltete Spannungsbegrenzer auf 28 V geregelt. Früher hatte man erwogen, bei höheren Leistungen auf eine Wechselspannungsversorgung überzugehen. Trotzdem wurde für Eureka wieder ein Gleichspannungskonzept gewählt. Es hat sich nämlich gezeigt, dass fast alle Verbraucher auf Gleichspannungsversorgung ausgerichtet sind. Hinzu kommt, dass frühere Probleme beim Schalten starker Gleichströme inzwischen durch die Entwicklung deutlich leistungsfähigerer und raumfahrtgeeigneter Schaltelemente weitgehend reduziert werden konnten.

Bei Überlast werden die Batterien mit herangezogen, ebenso im Fall eines lastseitigen Defekts, um das System wieder in einen stabilen Zustand zurückzuführen. Die missionskritischen Untersysteme werden unabhängig von den übrigen Verbrauchern über einen separaten Versorgungszweig von der Batterie über zwei weitere Notstromentladeregler gespeist. Diese bleiben auch dann noch funktionsfähig, wenn durch einen Defekt, z.B. in einem der Nutzlastexperimente, das Hauptversorgungssystem kurzzeitig ausser Funktion ist. Alle wesentlichen Parameter der Energieversorgung, wie Spannungen, Ströme und

Batterietemperaturen, werden ständig automatisch überwacht.

### 3. Ausblick auf die Columbus-Plattform

Der bisher vorgesehene Zeitplan für das Columbus-Projekt ist in Figur 5 angedeutet.



Figur 5 Columbus-Szenario

(Quelle: MBB/ERNO)

### 3.1 Solargenerator

Die im Eureka-Solargenerator eingesetzten Technologien basieren auf den Erfahrungen und Erkenntnissen bisheriger Satelliten-Solargeneratoren. Erstmals werden bei Eureka jedoch die drastisch härteren Anforderungen der erdnahen Umlaufbahn mit ihrer thermischen Zyklenbelastung erfüllt. Berücksichtigt wurden hierbei die Erfahrungen aus den jüngsten Shuttle-Flügen über die Materialdegradation durch atomaren Sauerstoff, der im Bereich niedriger Orbits noch vorhanden ist. Über den Einfluss des atomaren Sauerstoffs lagen zu Beginn des Projekts nur ungesicherte Informationen vor. Inzwischen weiss man, dass ausser bestimmten Kunststoffen auch Metalle angegriffen und zersetzt werden. Dies trifft auch für den für die elektrische Verbindung zwischen den einzelnen Solarzellen jahrelang erfolgreich eingesetzten Silber-Verbinder zu. In langwierigen Untersuchungen gelang es jetzt, einen partiell versilberten Molybdän-Verbinder zu entwickeln, der die hohe thermische Zyklenbelastbarkeit des Molybdäns und dessen Resistenz gegen atomaren Sauerstoff mit der Eignung des Silbers für eine optimale Widerstandsschweißung auf der Solarzelle in sich verbindet.

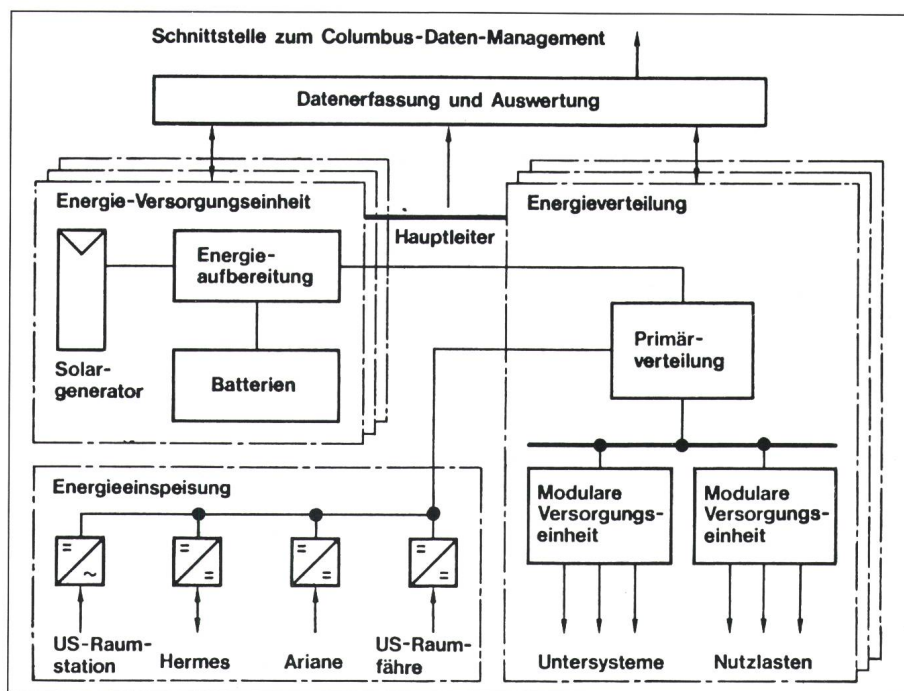
Bisher durchgeführte Tests haben die in diese Entwicklung gesetzten Erwartungen voll bestätigt. Dass derarti-

ge Tests Schwierigkeiten bereiten können, ist leicht vorstellbar, z.B. wenn 30 000 oder zukünftig sogar 60 000 und mehr thermische Zyklen zwischen  $-100^{\circ}\text{C}$  und  $+100^{\circ}\text{C}$ , die in Echtzeit im Weltraum über viele Jahre ablaufen, im Labor innerhalb kurzer Zeit, d.h. im extremen Zeitraffer, durchzuführen sind, ohne die tatsächliche Materialbelastung unzulässig zu verfälschen.

Aufgrund der jetzt vorliegenden Ergebnisse ist man bei AEG sicher, technologisch auch für die nächste Generation von Solargeneratoren für autonome Plattformen mit einer wesentlich längeren Einsatzdauer als bisher im erdnahen Umlauf gerüstet zu sein. Selbstverständlich wird parallel an der weiteren Verbesserung der Solarzelle als dem Grundelement jedes Solargenerators gearbeitet. Der Schwerpunkt der Entwicklungen zielt auch zukünftig auf eine weitere Verbesserung des Systemwirkungsgrades ab.

### 3.2 Energieaufbereitung und -verteilung

Auch für das System der Energieaufbereitung und -verteilung greift der Entwurf von Eureka schon aus Kostengründen in vielen Bereichen auf Spacelab zurück. Teilweise werden auch Entwicklungen im Rahmen anderer Satellitenprojekte aus jüngerer Zeit verwendet. Dies ist voll gerechtfertigt, zumal die elektrische Leistung in Eureka derjenigen in Spacelab ähnlich ist. Bei Columbus hingegen wird die elektrische Primärleistung in der ersten Phase für die Plattform und das Versorgungsmodul mit 16 kW etwa dreimal so hoch liegen (Fig. 6). Die Energieversorgung muss darüber hinaus auf noch deutlich höhere Leistungen erweiterbar sein. Aus diesem Grund, aber auch im Hinblick auf die erheblich grössere Komplexität der Columbus-Elemente, reicht das bislang verfolgte Konzept eines einzelnen Hauptleiters nicht mehr aus. Die gesamte elektrische Leistung muss daher auf mehrere parallele Hauptleiter aufgeteilt werden. Zuverlässigkeitsaspekte erzwingen andererseits eine Vernetzung dieser parallelen Versorgungszweige, um im Fehlerfall und bei Lastverschiebungen zwischen den einzel-



Figur 6 Columbus – Energieversorgungssystem des Versorgungsmoduls

nen Zweigen flexibel reagieren zu können. Hieraus ergeben sich schwierige regelungstechnische Probleme, die zurzeit analytisch und durch rechnergestützte Simulationen untersucht werden. Gleichzeitig wird bei Columbus ein erheblich höherer Grad von systeminterner Automation gefordert, um in den bemannten Elementen die Astronauten von Routineaufgaben zur Steuerung der Betriebssysteme zu entlasten. Dazu bietet die in den vergangenen zehn Jahren seit Beginn der Spacelab-Arbeiten erfolgte Entwicklung der Mikroelektronik heute Möglichkeiten, die für Spacelab noch nicht verfügbar und auch noch nicht abzusehen waren.

Mit Hilfe der heute einsetzbaren Mikroprozessoren wurde für Columbus ein in die Energieversorgung integrieres, eigenständiges Informationssystem konzipiert, das eine automatische Steuerung der gesamten Energieflüsse ermöglicht. Zusätzlich kann mit diesem Power Management ein selbsttätiges Reagieren des Energieversorgungssystems auf alle denkbaren Situationen erreicht werden. Auf der Basis derselben Hardware wird ferner durch entsprechende Software ein

«built-in»-Testsystem realisiert, das gerade unter dem Aspekt der Wartung und Reparatur im Weltraum unverzichtbar ist. Die Kommunikation mit dem Datenmanagementsystem erfolgt auf hierarchisch hoher Ebene.

Eureka als Brücke zwischen Spacelab und Columbus hat eine Vielzahl neuer und wichtiger Voraussetzungen geschaffen, um zukünftige Projekte auf dem Gebiet autonomer Plattformen erfolgreich angehen zu können. Dennoch bleibt für die Vorbereitung des Columbus-Programms noch viel zu tun. Das technische Konzept des Energieversorgungssystems basiert auf der Spacelab-Entwicklung, berücksichtigt jedoch bereits wesentliche Anforderungen, die sich im Laufe des Columbus-Programms stellen werden. Bei der Stromerzeugung, also beim Solargenerator, wurden die erforderlichen Technologien bereits entwickelt und werden hier auch eingesetzt. In der Energieaufbereitung und -verteilung wird bei Columbus ein erheblich stärkerer Einsatz der Mikroelektronik erfolgen. Nur dadurch ist der erforderliche Grad an Automation, Flexibilität und zugleich Zuverlässigkeit, Sicherheit und Wartbarkeit zu erreichen.