

# Modulare Systeme Die Evolution der Zuverlässigkeit

Von Neil Rasmussen  
Suzanne Niles

**White Paper Nr. 76**

**APC**<sup>®</sup>  
Legendary Reliability<sup>®</sup>

## Zusammenfassung

Die Natur hat schon früh den Beweis dafür geliefert, dass modulare Konstruktionen in komplexen Systemen überdauern und überlegen sind. Ein wichtiger Grund für diesen Erfolg ist der für die Zuverlässigkeit entscheidende Vorteil der *Fehlertoleranz*, die es einem modularen System ermöglicht, den Betrieb von fehlerhaften Modulen auf ordnungsgemäß arbeitende Module zu verlagern, während Reparaturen durchgeführt werden. In Datacentern hat die modulare Konstruktion in neuen fehlertoleranten Architekturen für Server und Speichersysteme bereits Einzug gehalten. In dem Maße, in dem Datacenter sich weiterentwickeln und sich dabei an Vorgaben aus der Natur orientieren, muss sich auch die physikalische Infrastruktur für hochverfügbare Netzwerke (NCPI) weiterentwickeln, um neue Verfügbarkeits-, Wiederherstellungs- und Wachstumsstrategien unterstützen zu können.

## Einführung

Modularität ist eine anerkannte Methode zur Organisation und Vereinfachung von komplexen Systemen. Vom Elementaren (Taschenlampenbatterien) bis hin zum Komplexen (Zellen eines Organismus) hat die Modularität eine Erfolgsliste vorzuweisen, die schwer zu überbieten ist. Dennoch können bei künstlichen Systemen beim evolutionären Übergang von der monolithischen zur modularen Konstruktion Zweifel und Anlaufprobleme auftreten, ehe die Modularität selbstverständliche Akzeptanz findet und Ihre bewährten Vorteile bieten kann.

Die physikalische Infrastruktur für hochverfügbare Netzwerke (NCPI) im Datacenter befindet sich in einer solchen Übergangsphase. Während die in physikalischer Hinsicht offenkundigen Eigenschaften der Baustein-Architektur – Skalierbarkeit, Flexibilität, Einfachheit und Mobilität – problemlos erkennbar sind und nicht ernsthaft in Frage gestellt werden, ist ein Aspekt der modularen Konstruktion in der Branche zum Diskussionsthema geworden: die Zuverlässigkeit.

Die Anwendung der klassischen, einfachen Zuverlässigkeitsanalyse („Eine größere Anzahl von Komponenten bedeutet ein höheres Ausfallrisiko“) auf dieses neue Konzept ist im besten Fall unvollständig, im schlimmsten Fall jedoch irreführend. Ziel dieses Dokuments ist es, anhand von Fallstudien zu veranschaulichen, dass die Modularität nicht nur offenkundige und leicht erkennbare Vorteile zu bieten hat, sondern auch einen weniger offenkundigen, weniger leicht erkennbaren Vorteil, der jedoch im Hinblick auf die Zuverlässigkeit entscheidend ist: *die Fehlertoleranz*. Die inhärente Fehlertoleranz der modularen Konstruktion bietet einen leistungsstarken Ausfallschutz, indem sie in komplexe Systeme eine Strategie für Zuverlässigkeit einbringt, die nicht nur angepasst, sondern einfach besser ist.

# Fallstudie aus der Natur: Frühe Lebensformen

Die Geschichte der Modularität ist viel älter als Datencenter oder Taschenlampenbatterien. Vor drei Milliarden Jahren gab es auf der Erde bereits Leben in Form von nicht-modularen Systemen (Einzeller). Die fossilen Reste dieser Organismen zeigen, dass sie Schalen, Tentakel, Münder, Arme, Greifer und eine Vielzahl weiterer komplizierter Gebilde entwickelten. Einige wuchsen sogar zu erstaunlicher Größe

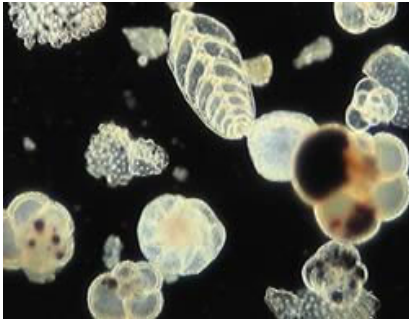


Photo courtesy David Walker, Brian Darnton

*Komplexe einzellige frühe Lebensformen*

heran und erreichten Durchmesser von bis zu 15 Zentimetern. Diese komplexen monolithischen Einzellerorganismen dominierten während Milliarden von Jahren die wesentliche Nahrungskette der Erde.

Dann entstanden vor etwa 500 Millionen Jahren mehrzellige Organismen. In nur zehn Millionen Jahren machten sie eine so schnelle Entwicklung durch, dass sie die drei Milliarden Jahre Entwicklung der komplizierten einzelligen Organismen aufholten und diese als vorherrschende Konstruktion ablösten.

## Der modulare Vorteil bei mehrzelligen Organismen

Warum hat sich die modulare mehrzellige Konstruktion gegen die festgefahrene monolithische Konstruktion durchgesetzt?

- **Die Fähigkeit zu Skalierbarkeit und Wachstum.** Systemwachstum im Hinblick auf Größe und neue Funktionen wurde einfach durch das Hinzufügen neuer Module (Zellen) erreicht, die mit den vorhandenen Modulen (Zellen) über Standardschnittstellen zusammenwirken konnten.
- **Einfacherer Duplikationsprozess.** Es war einfacher, schneller und zuverlässiger, einige kleinere, weniger komplizierte Zellen zu duplizieren, als eine komplizierte Einzelzelle.
- **Die Fähigkeit zur Spezialisierung der Modulfunktion.** Die Zuweisung und Spezialisierung von Zellaufgaben ermöglichte die gleiche Effektivität und Effizienz wie sie bei der Teamarbeit charakteristisch ist. In den frühen mehrzelligen Organismen war eine Zellart für die Bewegung zuständig, eine andere für den Schutz, eine weitere für das Aufspüren von Nahrung usw.



*Mehrzellige frühe Lebensformen*

- **Rasche Anpassung an die Umgebung.** Durch Hinzufügen, Entfernen oder Modifizieren von Zellen konnten schrittweise Konstruktionsänderungen schneller erprobt und anschließend übernommen oder verworfen werden.
- **Fehlertoleranz.** Aufgrund der Zellredundanz konnten einzelne Zellen ausfallen, ohne das System zu beeinträchtigen, während gleichzeitig eine Zellreparatur ohne Systemausfallzeit (in diesem Fall Behinderung oder Tod) durchgeführt werden konnte.

Die oben zuletzt angeführte Eigenschaft, die Fehlertoleranz, ist im Hinblick auf die Zuverlässigkeit ein entscheidender Vorteil modularer Systeme gegenüber monolithischen Systemen. Die Modularität „zerlegt“ ein System in kleinere Komponenten und erleichtert dadurch die Redundanz von Bestandteilen, sodass der Ausfall einer oder sogar mehrerer Komponenten den Systembetrieb nicht zwangsläufig beeinträchtigen muss. Durch einen einfachen Kratzer kann die menschliche Haut Hunderte von Zellen verlieren. Dennoch kommt es durch einen solchen Verlust nicht zum Versagen der Körperfunktionen. Andere Zellen übernehmen die Aufgaben, während die Reparatur durchgeführt wird. Die Modularität wurde nicht von Menschen erfunden, sondern Menschen *sind* modular. Bei Billionen von Modulen (Zellen) pro Mensch profitiert jeder von uns täglich von den Vorteilen der Fehlertoleranz.

## Fallstudie aus dem IT-Bereich: Plattenlaufwerke

In den Mainframe-Zeiten der Datencenter waren Speicherkomponenten große proprietäre Festplatten mit Stapeln von 14-Zoll-Metallplatten, komplizierten Schreib-Lesefunktionen und Gehäusen in Waschmaschinengröße. 1978 ließ sich IBM die Verwendung kleinerer Platten-Arrays patentieren, verfolgte dieses Konzept jedoch nicht weiter, weil das Unternehmen davon überzeugt war, dass dieses Konzept niemals so zuverlässig sein könne wie die herkömmlichen monolithischen Konstruktionen.

Theorie und Praxis der Fehlertoleranz steckten noch in den Kinderschuhen und waren in erster Linie auf die Luft- und Raumfahrtindustrie beschränkt, einem Bereich, in dem ein Komponentenausfall in den elektronischen Systemen Menschenleben kosten konnte.<sup>1</sup>



IBM 3370 Mainframe-Plattenspeicher

Photo © IBM Archives, permission pending

<sup>1</sup> Da heute in nahezu jeder Branche, einschließlich des Gesundheits- und des Militärbereichs, IT-Abläufe von zentraler Bedeutung sind, können Datencenter durchaus zu betriebskritischen Anlagen werden, deren Ausfall Menschenleben kosten könnte. Aus diesem Grund nimmt die Fehlertoleranz für Datencenter an Bedeutung zu, selbst über ökonomische Interessen hinaus.

1987 konstatierten Wissenschaftler der Universität Berkeley die sich vergrößernde Kluft zwischen Rechengeschwindigkeit und Speicherzugriffsgeschwindigkeit und sahen im Aufkommen von externen Plattenlaufwerken für PCs die Möglichkeit, diese als Bausteine für ein System mit schnellerer Datenübertragung zu nutzen. Ein Jahr später legten sie das wegweisende Dokument „A Case for Redundant Arrays of Inexpensive Disks (RAID)“ vor, in dem mehrere Datenschreibverfahren („RAID-Ebenen“) vorgeschlagen wurden, die von solchen Arrays zum Speichern, Abrufen *und Wiederherstellen* von Daten genutzt werden könnten. Die Nutzung der 5,25-Zoll-Platten der PC-Branche markierte das Zusammentreffen von Theorie und Hardware im Jahr 1990. Diese Platten waren so weit entwickelt, dass sie die erforderliche Kapazität, Leistung und Zuverlässigkeit zur Verwendung in den ersten RAID-Arrays aufwiesen. Diese neuen modularen Speicherkomponenten ermöglichten eine Reihe von Kompromissen zwischen Redundanz und Schreib-Lese-Geschwindigkeit und beanspruchten nur einen Bruchteil der Bodenfläche der Mainframe-Speicherkomponenten, die sie ersetzen.

## Der modulare Vorteil bei RAID-Arrays

Warum haben sich modulare RAID-Arrays gegenüber den alten monolithischen Speicherkomponenten durchgesetzt?



RAID-Array

- **Die Fähigkeit zu Skalierbarkeit und Wachstum.** Die Speicherkapazität lässt sich problemlos erhöhen, indem die Anzahl der Module pro Array erhöht wird oder indem Arrays hinzugefügt werden.
- **Einfacherer Duplikationsprozess.** Es ist wesentlich einfacher, die vielen kleinen Laufwerke, die als RAID-Module dienen, herzustellen, als die bisherigen komplizierten großen Laufwerke.
- **Die Fähigkeit zur Spezialisierung der Modulfunktion.** Die einzelnen Laufwerke eines Arrays können für zusätzliche Speicherkapazität, höhere Zugriffsgeschwindigkeit oder größere Redundanz genutzt werden, je nach der für das Array definierten RAID-Ebene. Darüber hinaus können die RAID-Arrays selbst als Module auf einer höheren Ebene betrachtet werden, wobei jedem RAID-Array eine andere Anwendung zugeordnet werden kann.
- **Rasche Anpassung an die Umgebung.** Laufwerke können hinzugefügt oder entfernt werden, und die RAID-Ebene kann problemlos für die gewünschten Kompromisse im Hinblick auf Kapazität, Geschwindigkeit und Redundanz geändert werden.
- **Fehlertoleranz.** RAID-Datenschreibverfahren enthalten Redundanzen, sodass Daten wiederhergestellt werden können, wenn eines der Laufwerke ausfällt.

Zur Überraschung der Entwickler war der Grund für die begeisterte Annahme von RAID auf dem Markt nicht so sehr die höhere Geschwindigkeit, die das ursprüngliche Konstruktionsziel war, sondern die höhere Zuverlässigkeit aufgrund der Fehlertoleranz. Bevor die Autoren des 1988 veröffentlichten Dokuments die Möglichkeiten der Fehlertoleranz aufzeigten, indem sie bei Live-Präsentationen einfach ein Laufwerk entfernten und das Array dennoch seinen Betrieb ordnungsgemäß fortsetzte, war die vorherrschende Meinung die zwar weit verbreitete, jedoch falsche Auffassung im Hinblick auf Zuverlässigkeit: Dass ein System mit mehreren Laufwerken zwangsläufig weniger zuverlässig ist, weil es mehr Teile umfasst.

## Fallstudie aus dem IT-Bereich: Blade-Server

Blade-Server stehen im Mittelpunkt des Übergangs zu einem modularen Konzept, ein Prozess, der bereits in Gange ist, während dieses Dokument verfasst wird. Viele Jahre lang sind herkömmliche Standalone-Server immer größer und schneller geworden und haben mit der zunehmenden Verbreitung des Netzwerk-



*Herkömmliche Server*

Computings immer mehr Aufgaben übernommen. Neue Server wurden in Datacentern bei Bedarf hinzugefügt, häufig als Schnellmaßnahme ohne große Koordination oder Planung. Tatsächlich war es nicht ungewöhnlich, dass der für ein Datacenter verantwortliche Operator feststellen musste, dass ohne sein Wissen Server hinzugefügt worden waren. Die sich daraus ergebende komplexe Mischung aus Gehäusen und Verkabelungen öffnete Tür und Tor für Verwirrung, Fehler und mangelnde Flexibilität.

Die erstmals 2001 in Erscheinung getretenen Blade-Server sind ein sehr einfaches und klares Beispiel für modulare Architektur: die Blades in einem Blade-Server-Gehäuse sind physisch identisch, verfügen über identische Prozessoren und können für jeden vom Benutzer gewünschten Zweck konfiguriert und genutzt werden. Ihre Einführung brachte viele Vorteile der Modularität in die Serverlandschaft ein: Skalierbarkeit, problemloses Duplizieren, Funktionsspezialisierung und Anpassungsfähigkeit

Diese klassischen Vorteile der Modularität haben zwar dazu geführt, dass Blade-Server in zunehmend größerer Zahl in Datacentern vertreten sind. Ihr volles Potenzial kann jedoch erst genutzt werden, wenn eine weitere Fähigkeit der modularen Konstruktion auf breiter Ebene implementiert wird: die Fehlertoleranz. Fehlertolerante Blade-Server, d. h. Blade-Server mit integrierter Failover-Logik, die die Übergabe des Betriebs von fehlerhaften an ordnungsgemäß arbeitende Blades ermöglicht, sind erst seit kurzer Zeit erhältlich und erschwinglich geworden. Mit diesen fehlertoleranten Servern lässt sich eine ungleich höhere Zuverlässigkeit erreichen als durch die aktuellen Verfahren mithilfe von redundanter Software und Clustern von Einzelservern. Dadurch können Blade-Server zur dominierenden Serverarchitektur für Datacenter werden. Angesichts der Entwicklung der automatisierten Fehlertoleranz prognostizieren Branchenbeobachter eine rasche Umstellung auf Blade-Server innerhalb der nächsten fünf Jahre.

## Der modulare Vorteil bei Blade-Servern

Warum werden sich modulare Blade-Server gegenüber größeren Standalone-Servern durchsetzen?

- **Die Fähigkeit zu Skalierbarkeit und Wachstum.** Die Rechenkapazität lässt sich problemlos erhöhen, indem mehr Module (Blades) hinzugefügt werden.
- **Einfacherer Duplikationsprozess.** Es ist wesentlich einfacher, viele kleine Blades herzustellen, als ganze Server. Stromversorgung, Lüfter für die Kühlung, Netzwerkverbindungen und andere Unterstützungskomponenten befinden sich zentral im Gehäuse und werden von den Blades gemeinsam genutzt. Dies vereinfacht die Blade-Struktur.
- **Die Fähigkeit zur Spezialisierung der Modulfunktion.** Einzelne Blades können nach Benutzerwunsch mit Software-Anwendungen konfiguriert werden.
- **Rasche Anpassung an die Umgebung.** Blades können nach geschäftlichen oder finanziellen Anforderungen hinzugefügt oder entfernt werden. Außerdem können Blades für die Ausführung verschiedener Anwendungen neu konfiguriert werden.
- **Fehlertoleranz.** Der Ausfall eines Blades kann automatisch von der integrierten Failover-Logik bewältigt werden, die den Betrieb nahtlos auf andere Blades überträgt.



*Blade-Server  
(10 Blades im Gehäuse)*

## Die sich ändernde Definition des Ausfallbegriffs bei IT-Systemen

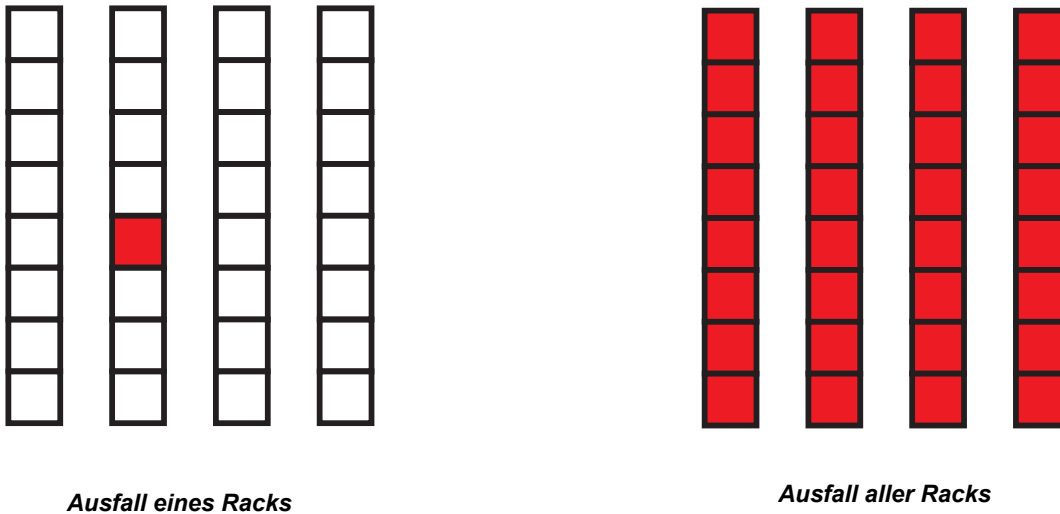
Die angeführten Fallstudien zeigen, dass modulare Konstruktionen sich gegenüber komplexen monolithischen Konstruktionen durchsetzen, und zwar aus fundamentalen Gründen, die dem Wesen der Modularität verinnerlicht sind. Einer dieser Gründe, die Fehlertoleranz, hat eine umfassende Bedeutung für die Zukunft des Datacenters. Wenn Server und Speicherkomponenten über das gesamte Datacenter hinweg fehlertolerant werden, wird dies die Art und Weise verändern, wie Ausfälle im IT-Bereich definiert werden.

Gehen wir von zwei unterschiedlichen Ausfallszenarien in einem Datacenter (**Abbildung 1**) aus. In der Abbildung rechts betrifft der Ausfall alle Racks, wie dies der Fall wäre, wenn eine einzelne große USV für den Schutz des gesamten Datacenters ausfallen und ein Spannungsabfall auftreten würde. In der Abbildung links betrifft der Ausfall nur ein einzelnes Rack. In herkömmlichen Datacenters würden beide Szenarien von IT-Manager als gleichartige Ausfälle betrachtet, da der Ausfall eines Racks aufgrund der gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen Servern, Platten-Arrays, Switches und Routern mit großer Wahrscheinlichkeit einen Dominoeffekt auslösen würde, der den Ausfall des gesamten Datacenters verursachen könnte.

In dem Maße, in dem die neuen modularen Array-Konstruktionen an Boden gewinnen, wird der Ausfall eines einzelnen Racks wie in der linken Abbildung von IT-Managern mit der Zeit als der „bessere“ Ausfall betrachtet werden, da hier aufgrund der Redundanz von Ressourcen der ordnungsgemäße Weiterbetrieb des Datacenters möglich ist, selbst wenn einzelne Komponenten ausfallen. Die zunehmende Verbreitung von fehlertoleranten Architekturen wird es ermöglichen, dass Datacenter den Ausfall einer größeren Anzahl von Komponenten bewältigen können, ohne dass es zu einem totalen Systemausfall kommt. Wenn die Blade-Server ihr frühes Versprechen der nahtlosen Fehlertoleranz einlösen, wird der Ausfall von einem, zwei, drei oder sogar noch mehr Racks ein Ereignis sein, bei dem der ordnungsgemäße Betrieb aufrechterhalten werden kann.

**Abbildung 1 – Zwei Ausfallszenarien im Datacenter**

*Draufsicht, vier Reihen zu jeweils acht Racks*



## Implikationen für die NCPI

Dieses neue Paradigma für das Ausfallmanagement, d. h. die Erwartung, dass einige Module zwangsläufig ausfallen werden, kombiniert mit einer soliden Vorsorge für diesen Fall, hat Auswirkungen auf die Art und Weise, wie die neue IT-Architektur durch die physikalische Infrastruktur für hochverfügbare Netzwerke (NCPI) geschützt werden sollte. Wenn Datacenter in ihrer IT-Schicht fehlertoleranter werden, wird der Schutz durch eine große USV zu einer weniger optimalen Lösung, da der Ausfall dieser USV einen totalen Systemausfall bewirkt. In einem fehlertoleranten Datacenter, das den Ausfall eines Racks ohne Beeinträchtigung bewältigen kann, ist dies kein notwendiges Resultat. Wenn USVen über das gesamte Datacenter verteilt sind und jedes Rack durch eine USV geschützt ist, betrifft der Ausfall einer einzelnen USV nur das betreffende Rack und nicht das gesamte System. Selbst wenn bei einer größeren Anzahl von USVen die Wahrscheinlichkeit steigt, dass eine einzelne USV ausfällt, kann ein solcher Ausfall vom System bewältigt werden. Wenn für einen totalen Systemausfall der Ausfall von drei Racks erforderlich ist, müssen alle drei dieser USVen *gleichzeitig* ausfallen, damit das gesamte System ausfällt. Dies ist ein äußerst unwahrscheinliches Ereignis, weit unwahrscheinlicher als der Ausfall einer einzelnen großen USV. Angesichts der zunehmenden Fehlertoleranz der IT-Systeme favorisiert die Zuverlässigkeitstheorie aus diesem Grund in starkem Maße eine modulare verteilte Stromversorgungs- und Kühlungsarchitektur.

### Monolithische und modulare NCPI im Vergleich

Die Architektur der physikalischen Infrastruktur für hochverfügbare Netzwerke (NCPI) ist während der 30-jährigen Geschichte der Datacenter weitgehend unverändert geblieben. Vom kleinsten Computerraum bis hin zu den größten Anlagen war und ist das dauerhafte Modell für die physikalische Infrastruktur eine zentrale „Anlage“ für die Stromversorgung und Kühlung. Die technische Umsetzung dieser Art von Infrastruktur führt zu einer monolithischen, individuellen Konfiguration von Geräten und Verbindungen. Wenn eine solche Architektur durch eine modulare Konstruktion ersetzt wird, kann die NCPI nicht nur modulare, fehlertolerante IT-Geräte ordnungsgemäß unterstützen, sondern die NCPI selbst kann von den Vorteilen der Modularität profitieren, einschließlich der für die Zuverlässigkeit wesentlichen Vorteile der Fehlertoleranz.



*Zentrale monolithische USV*

## Der modulare Vorteil bei der NCPI

Warum wird die modulare NCPI die herkömmliche monolithische NCPI ablösen?

- **Die Fähigkeit zu Skalierbarkeit und Wachstum.** Die modulare NCPI kann so dimensioniert werden, dass sie den aktuellen IT-Anforderungen des Datacenters entspricht, und sie kann neuen Anforderungen entsprechend wachsen. Dieser Vorteil ist für die NCPI von besonderer Wichtigkeit, da bei der herkömmlichen Methode eine einmalige Implementierung der Stromversorgung und Kühlung erfolgt, und zwar im Hinblick auf die Unterstützung der voraussichtlich maximalen IT-Anforderungen. Dies führt zu einer erheblichen Verschwendung von Kapital- und Betriebskosten.
- **Einfacherer Duplikationsprozess.** Modulare Konstruktion bedeutet die Herstellung einer großen Anzahl von kleinen Einheiten anstatt einer kleinen Anzahl von großen Einheiten. Ein größeres Produktionsvolumen bedeutet weniger Fehler, eine kleinere, einfachere Konstruktion bedeutet mehr Automatisierung und weniger manuelle Arbeit bei der Herstellung, und dies wiederum bedeutet weniger Fehler.
- **Die Fähigkeit zur Spezialisierung der Modulfunktion.** Stromschutz- und Kühlsysteme können in einer Vielzahl von Konfigurationen hergestellt werden, um den besonderen Verfügbarkeits- und Kühlanforderungen verschiedener Teile des Datacenters zu entsprechen.
- **Rasche Anpassung an die Umgebung.** Durch neue Komponenten, die hinzugefügt werden, und IT-Komponenten, die sich alle 2 bis 3 Jahre ändern, sind die Inhalte im Datacenter einer ständigen Änderung unterworfen. Neue Komponenten können unterschiedliche Größen oder Formen, unterschiedliche Stromversorgungs- oder Kühlanforderungen, unterschiedliche Anschlüsse haben usw. Eine modulare NCPI kann problemlos skaliert oder neu konfiguriert werden, um diesen sich ändernden IT-Anforderungen zu entsprechen.
- **Fehlertoleranz.** Genauso wie fehlertolerante IT-Komponenten einen unterbrechungsfreien Datacenter-Betrieb ermöglichen, wenn eine IT-Komponente ausfällt, ermöglichen fehlertolerante NCPI-Komponenten den unterbrechungsfreien Betrieb der Stromversorgung und Kühlung, wenn eine NCPI-Komponente ausfällt. Fehlertoleranz kann durch die Redundanz von NCPI-Einheiten erreicht werden, oder durch die interne Redundanz von Komponenten *innerhalb* von NCPI-Einheiten, beispielsweise durch zusätzliche Leistungsmodule in einer USV.



Modulare USV auf Rack-Ebene

Wie in den vorhergehenden Fallstudien zur modularen Konstruktion sind die ersten vier der obigen Eigenschaften für den Erfolg dieser Konstruktion förderlich, die fünfte Eigenschaft, die Fehlertoleranz, ist jedoch entscheidend. Da der Betrieb eines Datacenters voll und ganz von der Stromversorgung und Kühlung abhängig ist, ist die fehlertolerante Zuverlässigkeit bei der NCPI von genau so entscheidender Bedeutung, wie bei der IT-Komponente, die Sie schützt. Ein fehlertolerantes Datacenter ohne fehlertolerante NCPI ist ungefähr genau so sinnvoll wie eine Hängebrücke mit einer starken Verankerung, jedoch schwacher Kabelaufhängung.

# Schlussfolgerung

Der Übergang von der monolithischen zur modularen Konstruktion stellt bei komplexen Systemen - durch die Vorteile im Hinblick auf Effizienz, Flexibilität und Zuverlässigkeit- eine natürliche Entwicklung dar. Anhand von Erfolgsgeschichten lässt sich einfacher erkennen, welches Potenzial die Modularität zur Erreichung signifikanter, ja sogar revolutionärer Verbesserungen bei Systemen bietet, die seit jeher monolithisch waren und nie anders betrachtet wurden. Die Fehlertoleranz und andere wichtige Eigenschaften der Modularität, wie die Fähigkeit zu Skalierbarkeit, Anpassung, Spezialisierung und Duplizierung, sind in von Menschen gemachten modularen Systemen genauso offenkundig und zwingend erforderlich wie in natürlichen Systemen.

Die IT-Welt kennt diese Vorteile bereits durch die Entwicklung von modularen Konstruktionen für Speicher- und Computing-Lösungen in Form von RAID-Arrays und Blade-Servern. Noch wichtiger ist jedoch, dass Datacenter jetzt im Begriff sind, dem Beispiel von Branchen wie die Luft- und Raumfahrtindustrie zu folgen und denjenigen Vorteil der Modularität zu implementieren, der bereits seit den 70er Jahren in unternehmenswichtigen Systemen genutzt wird: *die Fehlertoleranz*. Die Fehlertoleranz basiert auf der Erkenntnis, dass die sorgfältige Steuerung der Komponentenqualität nur der erste Schritt hin zur Systemzuverlässigkeit ist, und dass der unterbrechungsfreie Systembetrieb bei einem Komponentenausfall die oberste Zuverlässigkeitsstrategie darstellt.

Da Modularität und Fehlertoleranz zunehmend zum neuen Modell für die Datacenterplanung werden, muss sich auch die physikalische Infrastruktur für hochverfügbare Netzwerke in diese Richtung bewegen, und zwar sowohl für einen effektiven Schutz der Datacenter als auch, um selbst die Vorteile der Modularität für ihre eigene Effizienz, Flexibilität und Zuverlässigkeit zu nutzen.

## Weitere White Papers zum Thema

APC White Paper Nr. 117, „Physikalische Infrastruktur für hochverfügbare Netzwerke: Optimierung des Geschäftswerts“

APC White Paper Nr. 116, „Standardisierung und Modularität in der physikalischen Infrastruktur für hochverfügbare Netzwerke“

## Über die Autoren:

**Neil Rasmussen** ist Chief Technical Officer und einer der Gründer von American Power Conversion (APC). Er leitet bei APC das weltweit größte Budget im Bereich Forschung und Entwicklung, das Stromversorgungs- und Kühlungssystemen sowie der Rack-Infrastruktur hochverfügbarer Netzwerke gewidmet ist. Die wichtigsten Produktentwicklungszentren befinden sich in Massachusetts, Missouri, Rhode Island, Taiwan, Dänemark und Irland. Zurzeit leitet Neil Rasmussen die APC-Initiative zur Entwicklung von modular skalierbaren Datacenterlösungen.

Vor der Gründung von APC im Jahre 1981 erwarb Neil Rasmussen am MIT (Massachusetts Institute of Technology) den Bachelor und Master in Elektrotechnik. Hier schrieb er auch seine Dissertation zur Analyse einer 200 MW-Stromversorgung des Tokamak-Fusionsreaktors. Von 1979 bis 1981 arbeitete er bei den MIT Lincoln Laboratories an der Entwicklung von Schwungrad-Energiespeichersystemen und Solarstromsystemen.

**Suzanne Niles** ist als White Paper-Autorin im NCPI Science Center von APC tätig. Sie studierte Mathematik am Wellesley College und erwarb am MIT den Bachelor in Informatik. Thema ihrer Abschlussarbeit war die Erkennung von handschriftlichen Zeichen. Sie unterrichtet seit über 25 Jahren die unterschiedlichsten Zielgruppen und verwendet dabei eine Vielfalt von Medien, von Softwarehandbüchern über Fotos bis hin zu Kinderliedern.