

Ansätze zur Steigerung der Verfügbarkeit in Wissenschaftsnetzen

Christian Grimm, Sibylle Schweizer-Jäckle, Stefan Piger

DFN-Verein
Alexanderplatz 1
D-10178 Berlin
{grimmlschweizer|piger}@dfn.de

Abstract: Wissenschaftsnetze leisten einen wichtigen Beitrag zur Sicherung von Standortfaktoren im internationalen Wettbewerb von Wissenschaft und Forschung. Trotz eingeschränkter finanzieller Möglichkeiten ist es notwendig, den Anwendern eine störungsfreie Netzplattform zur Verfügung zu stellen. Am Beispiel des vom DFN-Verein für die deutsche Wissenschaft organisierten Wissenschaftsnetzes X-WiN werden mögliche Ansätze zur Steigerung der Verfügbarkeit auf verschiedenen Ebenen der Netzwerktechnik betrachtet. Mit diesen Maßnahmen wird im Wissenschaftsnetz derzeit eine Verfügbarkeit des DFNInternet-Dienstes von bis zu 99,999% erreicht.

1 Einleitung

Um am globalen Verbund wissenschaftlicher Kooperationen teilhaben zu können, verfügen weltweit alle technologisch entwickelten Nationen über speziell auf die Wissenschaft zugeschnittene Wissenschaftsnetze oder streben – je nach eigenem Entwicklungsstand – deren Aufbau an. Wissenschaftsnetze haben die Zielsetzung, wissenschaftliches Arbeiten zu unterstützen und sind mittlerweile ein integraler Bestandteil der zugehörigen Arbeitsprozesse in Forschung und Lehre. Hierfür müssen sie sich an den spezifischen organisatorischen und strukturellen Randbedingungen und den Bedarfen ihrer Anwender aus dem Wissenschaftsbereich orientieren.

Aufgrund ihrer zentralen Bedeutung für Wissenschaft und Forschung stellen Wissenschaftsnetze bereits heute eine kritische Infrastruktur dar. Dabei ist zu beachten, dass deren Wert gegenwärtig nicht mit Ansätzen wie im kommerziellen Bereich kalkuliert werden kann. So wird dem potentiellen Ausfall eines Wissenschaftsnetzes bisher kein konkreter wirtschaftlicher Schaden gegenüber gestellt, wie es etwa bei Störungen in den IT-Infrastrukturen von z. B. Banken oder Versicherungen längst der Fall ist. Dennoch kommt der Sicherung eines stabilen und zuverlässigen Betriebes auch von Wissenschaftsnetzen eine stetig wachsende Bedeutung zu, insbesondere bei der Unterstützung internationaler Großforschungsprojekte wie in der Hochenergie- (z. B. Large Hadron Collider, LHC) oder Astrophysik (z. B. Low Frequency Array, LOFAR). Hierbei gilt es, trotz eingeschränkter finanzieller Möglichkeiten den – unter anderem wegen Wartungsarbeiten z. T. auch unabdingbaren – Unterbrechungen durch geeignete technische Maßnahmen entgegenzuwirken, um aus Sicht der Anwender einen störungsfreien Betrieb zu gewährleisten.

Im Folgenden werden Aspekte der Verfügbarkeit am Beispiel des vom DFN-Verein für die deutsche Wissenschaft organisierten Wissenschaftsnetzes X-WiN erörtert. Hierfür werden zunächst die grundsätzlich möglichen Ebenen diskutiert, auf denen sich in komplexen Netzinfrastrukturen Ansätze zur Verbesserung der Verfügbarkeit bieten. Danach werden die verschiedenen technischen Ebenen des X-WiN und entsprechende Maßnahmen zur Steigerung der Verfügbarkeit vorgestellt. Den Abschluss bildet eine Evaluation der getroffenen Maßnahmen, basierend auf aktuellen Messungen und Verfügbarkeitsstatistiken aus dem X-WiN.

2 Verfügbarkeit

Grundsätzlich bezeichnet Verfügbarkeit die Wahrscheinlichkeit, dass ein System zu einem betrachteten Zeitpunkt t betriebsfähig ist, d. h. gemäß einer vorgegebenen Spezifikation korrekt arbeitet [BP75]. Sie berechnet sich damit nach der einfachen Formel

$$V = (\text{Gesamtzeit} - \text{Gesamtausfallzeit}) / \text{Gesamtzeit}$$

Daraus folgt, dass sich Angaben zur Verfügbarkeit grundsätzlich auf einen beobachteten Zeitraum beziehen. Differenziertere Betrachtungen der Verfügbarkeit unterscheiden zwischen den Ursachen für die Ausfälle. Die häufig verwendeten inhärenten und erreichbaren Verfügbarkeiten beziehen sich auf Ausfälle innerhalb des betrachteten Systems, sei es verursacht durch fehlerhafte Bauteile oder auch Konfiguration. Im Gegensatz dazu schließt die operationale Verfügbarkeit jegliches Fehlverhalten, d. h. auch Ausfälle verursacht durch äußere Einwirkungen wie Stromausfall, ein: „Die operationale Verfügbarkeit A_0 einer Betrachtungseinheit ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Betrachtungseinheit alle zugesicherten Eigenschaften bei den beschriebenen Umgebungsbedingungen einhält oder fehlerfrei funktioniert.“ [BSI09].

Objektive Fakten bilden die Grundlage jeglichen Diskurses im wissenschaftlichen Umfeld, dies gilt sowohl bei der Publikation wissenschaftlicher Ergebnisse als auch bei der Prüfung und Bewertung technischer Infrastrukturen. Daher wird im Folgenden aus mehreren Gründen ausschließlich die operationale Verfügbarkeit betrachtet:

- Die operationale Verfügbarkeit lässt sich eindeutig und mit geringem Aufwand messen, da nicht nach der Ursache für die Ausfälle unterschieden werden muss.
- Die operationale Verfügbarkeit lässt sich auch von den Anwendern geeignet prüfen, da sie der tatsächlich „wahrgenommenen“ Verfügbarkeit entspricht.
- Die operationale Verfügbarkeit stellt die untere Grenze bzw. den ungünstigsten Wert der Verfügbarkeit dar. Die Angabe besserer Werte wie z. B. der inhärenten Verfügbarkeit müsste stets mit der expliziten Beschreibung der betrachteten Umgebung sowie der Art der berücksichtigten Ausfälle einhergehen, um eine Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gewährleisten zu können [PH01].

Im Folgenden werden die Betrachtungen zur Verfügbarkeit der Netzinfrastruktur am Beispiel des vom DFN-Verein für die deutsche Wissenschaft organisierten Wissenschaftsnetzes X-WiN erörtert.

3 Die Netzplattform im Wissenschaftsnetz

Das Wissenschaftsnetz X-WiN ist die technische Plattform des Deutschen Forschungsnetzes. Über das X-WiN sind Hochschulen, Forschungseinrichtungen und forschungsnahe Unternehmen in Deutschland untereinander, mit den Wissenschaftsnetzen in Europa und auf anderen Kontinenten verbunden. Darüber hinaus verfügt das X-WiN über leistungsstarke Austauschpunkte mit dem allgemeinen Internet.

Mit Anschlusskapazitäten bis zu einem Mehrfachen von 10 Gbit/s pro Teilnehmer-einrichtung und einem Terabit-Kernnetz, das sich zwischen ca. 60 Kernnetz-Standorten aufspannt, zählt das X-WiN zu den leistungsfähigsten Kommunikationsnetzen weltweit.

3.1 Optische Plattform

Mit dem Ende des Jahres 2005 erfolgte der Übergang vom G-WiN zum X-WiN wurde das Wissenschaftsnetz von beschalteten Providerverbindungen auf eine *dark fibre* basierte, d. h. auf unbeschalteten Glasfaserstrecken gegründete Infrastruktur, umgestellt. Daraus resultiert die in Abbildung 1 dargestellte Glasfaserinfrastruktur aus derzeit 89 Einzelstrecken mit einer Gesamtlänge von etwa 10.000 km. Die Topologie des Kernnetzes wird im Wesentlichen aus mehreren Ringen gebildet, die zur Erhöhung der Redundanz einen z. T. deutlich höheren Vermaschungsgrad aufweisen. Damit ist bis auf wenige Ausnahmen, in denen keine redundant geführten Glasfaserstrecken zur Verfügung standen, sichergestellt, dass alle Kernnetzstandorte über mindestens zwei Wege erreichbar sind.

Auf dieser Infrastruktur aufbauend wurde eine optische Veredelung mit DWDM-Technik realisiert, die aktuell bis zu 40 Wellenlängenverbindungen mit einer maximalen Datenübertragungsrate von 10 Gbit/s je Glasfaserstrecke ermöglicht. Neben den für den DFNInternet-Dienst verwendeten Wellenlängen für Router-Verbindungen werden mit dieser Technik auch VPN-Verbindungen auf Layer 2 mit bis zu 10 Gbit/s zwischen Anwendern realisiert.

Die redundante Topologie des X-WiN bietet auch unmittelbar Möglichkeiten zur Erhöhung der Verfügbarkeit von VPN-Strecken auf Layer 2. So kommt bei Bedarf über vollständig disjunkte Alternativwege für nahezu alle Verbindungen zwischen Kernnetzstandorten eine als optische Protection bezeichnete Funktionalität der DWDM-Technik zum Einsatz.

Diese auch aus Netzen auf Basis von Sonet/SDH bekannte Funktionalität nutzt neben dem für den Normalbetrieb geschalteten so genannten Working-Path einen als Protection-Path bezeichneten Zweitweg. Auf diesen wird eine VPN-Strecke bei Ausfall des Working-Path innerhalb von 25 ms automatisch umgeschaltet, so dass selbst zeitkritische Anwendungen ohne Unterbrechung weiter ausgeführt werden können.



Abbildung 1: Topologie der optischen Plattform des X-WiN

3.2 IP-Plattform

Das in Abbildung 2 dargestellte Kernnetz des X-WiN besteht aus vier SuperCore-Standorten (Erlangen, Frankfurt, Hannover, Potsdam), die untereinander vollvermascht über zwei Wellenlängenverbindungen auf der optischen Plattform mit jeweils 2·10 Gbit/s verbunden sind. Über diese zentralen Knotenpunkte werden die Peerings mit anderen Providern, darunter z. B. das Netz der Deutschen Telekom AG redundant mit zweimal je 10 Gbit/s realisiert. Globale Uplinks in die USA erfolgen sogar über zwei verschiedene Provider Telia und Global Crossing mit jeweils 10 Gbit/s.

Über die 55 jeweils mindestens doppelt mit 10 Gbit/s (in wenigen Ausnahmen 1 Gbit/s) angebundenen Kernnetzstandorte werden schließlich die Anwendereinrichtungen an das X-WiN angeschlossen. Zwischen den wenigen Kernnetzstandorten, an denen keine Glasfasern verfügbar sind, kommen beschaltete Providerverbindungen zum Einsatz.

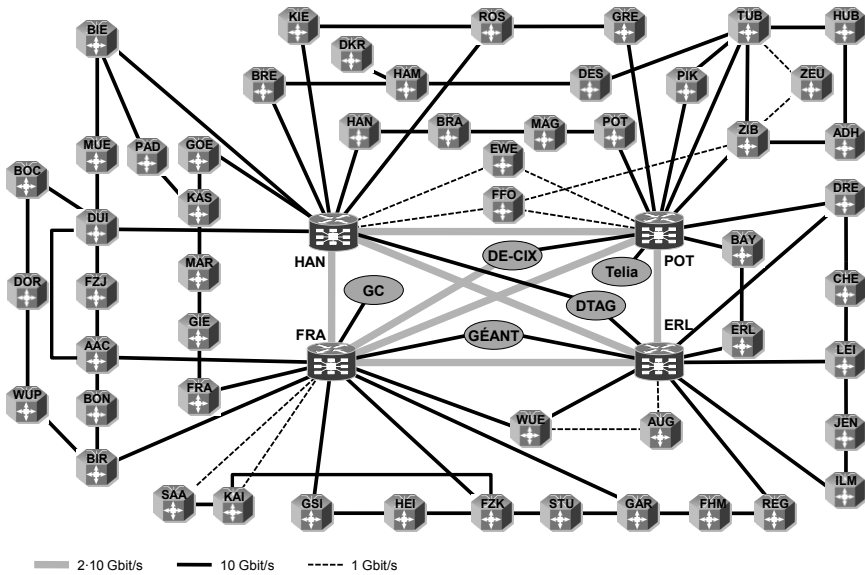


Abbildung 2: IP-Plattform des X-WiN

Durch angemessene Reduktion der unterstützten Anschlusstechniken und Einsatz neuer Geräte konnte auf IP-Ebene von vier Komponenten je Standort im G-WiN auf eine im X-WiN reduziert werden (Abbildung 3). Die verbleibende Netzkomponente ist dabei vollredundant hinsichtlich Stromversorgung, Routing Prozessoren und Interfaces. Im laufenden Betrieb können Hardware-Komponenten getauscht werden; Software Updates verursachen keine längeren Ausfallzeiten. Wartungsarbeiten lassen sich somit weitgehend ohne Beeinträchtigung des Betriebes durchführen.

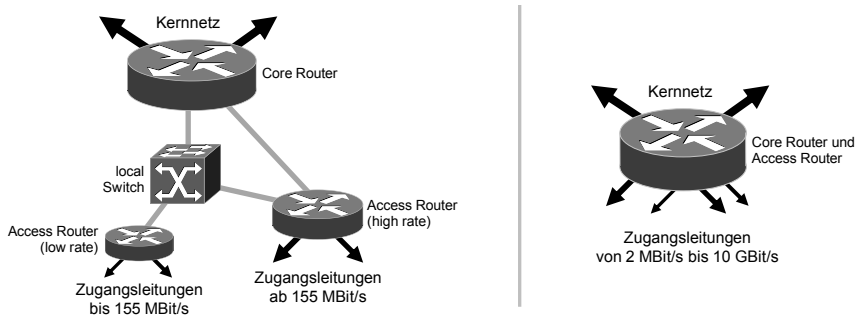


Abbildung 3: Vereinfachung der Kernnetzknuten vom G-WiN (links) zum X-WiN (rechts)

Der gezielte Einsatz von möglichst wenig verschiedenen technischen Komponenten an den Kernnetzstandorten erlaubt zusätzlich ein effizientes Ersatzteilkonzept und vereinfacht die Prozeduren zur Fehlersuche und Fehlerbehebung. Insgesamt 9 über Deutschland verteilte Ersatzteildépôts ermöglichen den Ersatz von defekten Komponenten innerhalb von drei Stunden an jedem Kernnetzstandort.

3.3 Zugangsleitungen

Die oben ausgeführten Betrachtungen zur optischen und IP-Plattform zeigen, dass durch geeignete Topologie und Einsatz technischer Verfahren zur Überbrückung von Ausfällen Störungen im Kernnetz des Wissenschaftsnetzes weitgehend ohne Auswirkungen auf die Anwender bleiben. Weitaus kritischer zu bewerten sind jedoch die Zugangsleitungen zwischen den Einrichtungen und dem Kernnetz. Bisher war es üblich, die Einrichtungen lediglich über eine Zugangsleitung an einen Kernnetzstandort des Wissenschaftsnetzes anzubinden. Entsprechend einfach war es, mögliche Szenarien für Totalausfälle zu konstruieren. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass bei auftretenden Störungen im Netz unmittelbar der gesamte Datenverkehr einer Einrichtung zum Erliegen kommt und dass häufig auch regulär anfallende Wartungsarbeiten zu Ausfällen führen. Entsprechend lag es nahe, Alternativen zur verbesserten Anbindung zu prüfen.

In Abbildung 4 sind die seit Anfang 2009 möglichen Anbindungen von Einrichtungen an das Wissenschaftsnetz dargestellt. Zu unterscheiden sind die Haupt- (durchgehende schwarze Linie) und Nebenleitungen (gestrichelte schwarze Linie) sowie Kunden-Router (KR), Cluster-Router (CR) und X-WiN-Router (XR).

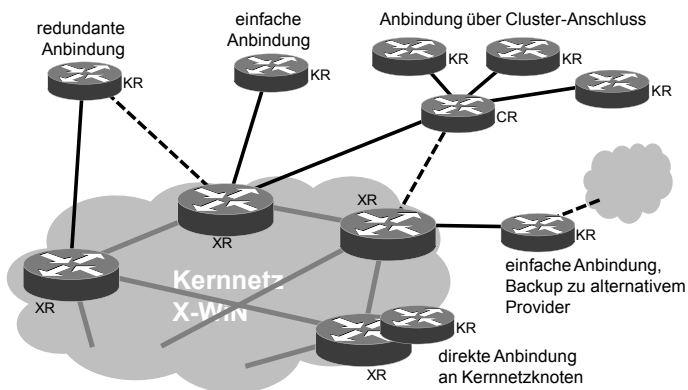


Abbildung 4: Anbindung von Einrichtungen an das Wissenschaftsnetz

Grundsätzlich sind damit fünf verschiedene Typen von Anbindungen möglich. Tabelle 1 fasst diese Typen zusammen und nennt die Häufigkeit der von Anwendern gewählten Anbindung im Wissenschaftsnetz mit Stand Ende 2009.

Entsprechend der Einteilung aus Tabelle 1 lassen sich für jeden Typ potentielle Ausfallszenarien formulieren (Tabelle 2). Hierbei wird unterstellt, dass ein XR stets durch mindestens eine Kernnetzleitung eine Verbindung zu dem gesamten X-WiN aufrecht erhalten kann. Wie die Ausführungen zur Verfügbarkeit der optischen Plattform im Kernnetz in Kapitel 4.1 zeigen, ist diese Annahme gerechtfertigt. Da sich die Kunden-Router und Cluster-Router in der administrativen Domäne der Einrichtungen und damit in deren Verantwortung befinden, sind sie von den folgenden Betrachtungen ausgenommen. Die Übersicht der kritischen Ausfälle in Tabelle 2 liefert somit identische Ergebnisse für redundante Anbindung und Anbindung über Cluster-Anschluss.

	Typ	Beschreibung	Anzahl
1	Einfache Anbindung	Eine Hauptleitung zwischen KR und XR	100
2	Redundante Anbindung	Eine Hauptleitung zwischen KR und XR sowie zusätzlich eine Nebenleitung zwischen KR und einem anderen XR	158
3	Direkte Anbindung an Kernnetzknotten	Diese Einrichtungen befinden sich direkt an einem Kernnetzknotten, die Zugangsleitungen bestehen in der Regel aus einer kurzen Verbindung zwischen zwei Verteilerschränken. Die redundante Anbindung wird implizit durch die Kernnetzleitungen an andere XR übernommen.	48
4	Anbindung über Cluster-Anschluss	Mehrere Einrichtungen teilen sich einen redundant angebundenen Cluster-Anschluss. Die Anbindung des KR an den CR wird von jeder Einrichtung selbstverantwortlich organisiert, d.h. hier ist nicht zwingend eine redundante Anbindung gegeben. Die derzeit 36 CR sind redundant an das Kernnetz angebunden.	114
5	Einfache Anbindung, Backup über alternativen Provider	Eine Hauptleitung zwischen KR und XR sowie zusätzlich Nebenleitung zwischen KR und alternativem Provider	59

Tabelle 1: Verteilung der Anbindungen an das Wissenschaftsnetz

	Typ	Kritische Ausfälle
1	Einfache Anbindung	<ul style="list-style-type: none"> • Zugangsleitung oder • XR
2	Redundante Anbindung	<ul style="list-style-type: none"> • Haupt- und Nebenleitung gleichzeitig oder • beide XR gleichzeitig oder • Hauptleitung und XR der Nebenleitung gleichzeitig oder • Nebenleitung und XR der Hauptleitung gleichzeitig
3	Direkte Anbindung an Kernnetzknotten	<ul style="list-style-type: none"> • lokale Verbindung zwischen KR und XR oder • XR
4	Anbindung über Cluster-Anschluss	<ul style="list-style-type: none"> • Haupt- und Nebenleitung gleichzeitig oder • beide XR gleichzeitig oder • Hauptleitung und XR der Nebenleitung gleichzeitig oder • Nebenleitung und XR der Hauptleitung gleichzeitig
5	Einfache Anbindung, Backup über alternativen Provider	<ul style="list-style-type: none"> • Zugangsleitung oder • XR oder • Anbindung an alternativen Provider

Tabelle 2: Typen von Anbindungen und kritische Ausfälle

Gleichzeitig mit der Etablierung der verschiedenen Anschlusstypen wurde auch die Verfügbarkeit der Einrichtungen aus dem Wissenschaftsnetz intensiver beobachtet. Ziel der Maßnahme ist neben der Erkennung von kritischen Netzsituationen besonders auch die Erfolgskontrolle der Bemühungen für die redundanten Anbindungen. Die Ergebnisse dieser Beobachtungen werden im folgenden Kapitel vorgestellt.

4 Messung der Verfügbarkeit

Nach den Ausführungen in Kapitel 2 zur operationalen Verfügbarkeit werden im Folgenden sämtliche Abweichungen von der spezifizierten Funktion des DFNInternet-Dienstes als Fehlverhalten definiert. Daraus folgt, dass neben z. B. Leitungsunterbrechung auch Fehlfunktionen der technischen Komponenten, Ausfälle durch fehlerhafte Konfiguration sowie Unterbrechungen durch Wartungsarbeiten in die Verfügbarkeit einbezogen werden. Weiterhin gehen auch Störungen in der Betriebsumgebung, wie z. B. Ausfälle der Stromversorgung oder Klimatisierung, die ein Versagen des betrachteten DFNInternet-Dienstes verursachen, in die Bewertung der Verfügbarkeit ein.

Zur Feststellung der Verfügbarkeit wird über die X-WiN-Router im Kernnetz kontinuierlich die Erreichbarkeit der Interfaces auf den Kunden-Routern, die an die Haupt- oder Nebenleitung angeschlossen sind, geprüft. Diese aktiven Messungen werden im Abstand von wenigen Sekunden durchgeführt. Führen drei aufeinander folgende Messungen zu einer Fehlermeldung, wird die Anbindung als fehlerhaft markiert. Somit kann die gemessene Verfügbarkeit zuverlässig mit einer Auflösung von Minuten im jeweils gewählten Beobachtungszeitraum angegeben werden.

4.1 Optische Plattform

Die in der optischen Plattform aufgetretenen Unterbrechungen von Januar bis September 2009 sind in Tabelle 3 aufgeführt. Es zeigt sich, dass sowohl die Summe der Unterbrechungen mit insgesamt 311 Stunden bzw. annähernd 13 Tagen als auch die Dauer der maximalen Unterbrechungen erheblich sind und den Einsatz redundanter Technologie unerlässlich machen. Aufgrund der oben dargestellten Topologie, einhergehend mit optischer Protection, bleiben diese Unterbrechungen jedoch nahezu ohne Auswirkung auf die Verfügbarkeit des DFNInternet-Dienstes.

Art	Anzahl	Dauer gesamt [h]	Dauer mittel [h]	Dauer maximal [h]
Störung	10	116	11,6	37,3
Wartung	34	195	5,7	13,0

Tabelle 3: Unterbrechungen der optischen Plattform im Wissenschaftsnetz

4.2 IP-Plattform

Tabelle 4 fasst Betriebs- und Störungsminuten für den DFNInternet-Dienst im Wissenschaftsnetz im Betriebszeitraum Januar bis September 2009 zusammen. Es wird hier bereits deutlich, dass mit der redundanten Anbindung eine erhebliche Steigerung der Verfügbarkeit einhergeht.

	Betrieb [min]	Störung [min]	mittl. Verfügbarkeit [%]	mittlere Ausfallzeit [min]
Einfach	149.471.881 (87,32%)	50.837 (99,12%)	99,966	133,70
Redundant	21.713.879 (12,68%)	452 (0,88%)	99,998	8,68
Gesamt	171.185.760 (100,00%)	51.289 (100,00%)	99,970	117,78

Tabelle 4: Betriebs- und Störungsminuten für DFNInternet-Dienst im Wissenschaftsnetz

Die in Tabelle 4 dargestellten Werte geben lediglich die aus den Messungen berechneten Mittelwerte bzw. Erwartungswerte wieder. Entscheidend für die einzelne Einrichtung ist jedoch die tatsächliche Verfügbarkeit. Daher kommt für die gewünschte Bewertung des Wissenschaftsnetzes der Verteilung der einzelnen Verfügbarkeiten eine weitaus höhere Bedeutung zu als die in der Tabelle 4 aufgeführten Mittelwerte. Das Diagramm in Abbildung 5 stellt die fallend sortierten Verfügbarkeiten aller an das Wissenschaftsnetz angeschlossenen Einrichtungen dar. Der kritische Bereich mit vergleichsweise geringer Verfügbarkeit befindet sich folglich im rechten Abschnitt des Diagramms. Der hohen Anzahl an weitgehend störungsfrei angebotenen Einrichtungen stehen wenige Einrichtungen mit zum Teil erheblichen Unterbrechungszeiten gegenüber.

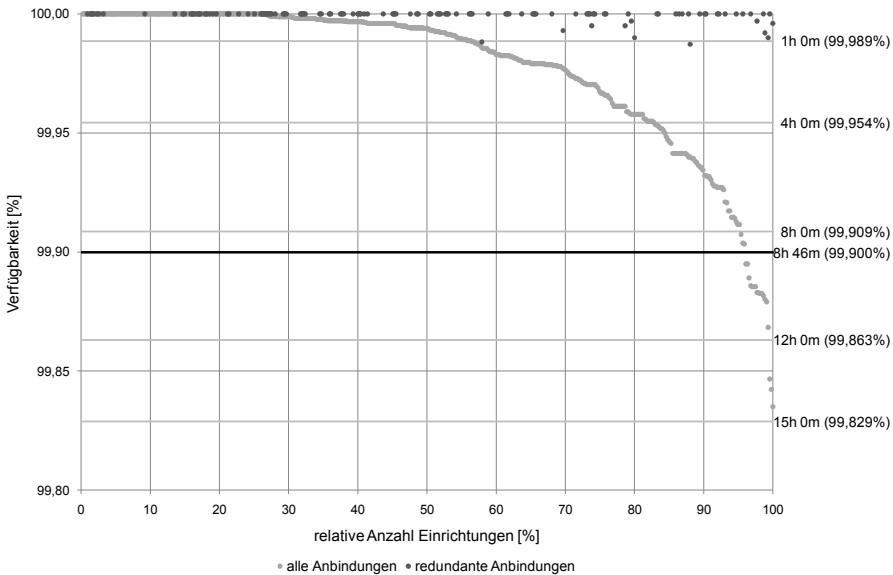


Abbildung 5: Verfügbarkeit aller an den DFNInternet-Dienst angebotenen Einrichtungen

Die dunklen Punkte in dem Diagramm kennzeichnen die Einrichtungen, die während des Beobachtungszeitraumes von der einfachen Anbindung auf die redundante Anbindung wechselten. Während die hellen Punkte die Beobachtungszeit von einfacher und redundanter Anbindung berücksichtigen, repräsentieren die dunklen Punkte ausschließlich den Zeitraum für die redundante Anbindung.

Aus dem Vergleich der Verteilungen für alle Anbindungen gegenüber den redundanten Anbindungen wird die Verbesserung durch die redundante Anbindung deutlich. Besonders im rechten Bereich des Diagramms sind erhebliche Steigerungen der Verfügbarkeit zu erkennen.

Die dargestellte Verteilung der redundant angebotenen Einrichtungen belegt somit noch deutlicher als Tabelle 4 den eindeutigen Gewinn. Nur in zwei Fällen wurde eine Ausfallzeit von einer Stunde (bzw. 99,989%) marginal überschritten. Nähere Untersuchungen zeigten darüber hinaus, dass nahezu sämtliche Störungen auf transiente Vorgänge während der Umschaltung von einfachem auf redundanten Betrieb zurückzuführen sind.

5 Zusammenfassung

Wissenschaftsnetze müssen sich einem in den letzten Jahren erheblich gestiegenen Anspruch an Leistungsfähigkeit und Verfügbarkeit stellen. Die vorgelegten Ergebnisse am Beispiel des DFNInternet-Dienstes zeigen, dass unter Zuhilfenahme neuester Netzwerktechnik und sorgfältiger Planung eine hohe Verfügbarkeit von bis zu 99,999% erreicht werden kann. Erforderlich sind jedoch erhebliche Anstrengungen auf allen Ebenen der Netzwerktechnologie, begleitet von funktionierenden Prozessen für das Fehlermanagement bis hin zur Ersatzteilversorgung.

Das Ziel einer unterbrechungsfreien Verfügbarkeit der Konnektivität wird mit den getroffenen Maßnahmen in beinahe idealer Weise erreicht – die Erwartungen der Anwender an einen jederzeit funktionierenden DFNInternet-Dienst werden nahezu erfüllt. Eine weitere Steigerung ist nach derzeitigem Stand nur noch durch Änderungen an den eingesetzten Routing-Protokollen, insbesondere durch schnellere Reaktions- und Konvergenzzeiten, zu erzielen.

Abschließend sei bemerkt, dass die hohe Verfügbarkeit in Wissenschaftsnetzen nur dann einen erkennbaren Gewinn darstellt, wenn sie bis an die Nutzer weitergegeben werden kann. Eine entsprechende Qualität der Campusnetze ist daher unerlässlich. Hier müssen – sofern noch nicht geschehen –vergleichbare Anstrengungen unternommen werden. Dabei können die in diesem Beitrag vorgestellten Maßnahmen und Betrachtungen zur systematischen Analyse der bestehenden Verfügbarkeit aber auch zu deren Verbesserung als Vorbild und Leitfaden dienen.

Literaturverzeichnis

- [BSI09] BSI: 1.2 Definitionen und Metriken für die Hochverfügbarkeit, Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, 2009
- [BP75] Barlow, R.E.; Proschan, F.: Importance of system components and fault tree events, Stochastic Processes and their Applications, Elsevier, 1975; Vol. 3, Nr. 2, S. 153–173
- [PH01] Piedad, F.; Hawkins, M.: High Availability – Design, Techniques and Processes; Prentice Hall, New Jersey, 2001