Power Quality

*Abbildung 1: Supercomputer JUPITER (Rechenzentrum) © Forschungszentrum Jülich / Sascha Kreklau*

# Kontinuierliche Netzüberwachung im Data Center des Forschungszentrums Jülich bei JUPITER - dem schnellsten Supercomputer Europas

Das Forschungszentrum Jülich betreibt eine der größten Forschungsinfrastrukturen Europas. Mit JUWELS* und JUPITER, Europas erstem Exascale-Supercomputer und aktuell schnellstem Rechner Europas**, steigen die Anforderungen an Netzstabilität, Verfügbarkeit und normkonforme Spannungsqualität deutlich an. Der JUPITER-Booster erreicht 793,40 PFLOPS und wird mit Ökostrom betrieben. Diese Leistungsdichte erzeugt hochdynamische Lastwechsel, die sich unmittelbar auf die Spannungsqualität auswirken können. Das Campusnetz in Mittel- und Niederspannung integriert parallel Forschungseinrichtungen, Labore, Blockheizkraftwerke, PV-Anlagen, Batteriespeicher, V2G-Ladesäulen und die Rechenzentren.

* (Platz 7 der TOP 500, 2020)
** (Europa: Platz 1 der TOP500, Weltweit: Rang 4, 2025)

Applikationsbericht

## 1. Ausgangssituation

Bereits vor JUPITER wurden campusweit über 120 Messgeräte eingesetzt, unter anderem in JUWELS. Darunter **PQI-DA smart** und **PQI-DE**, mit zentraler Auswertung und latenzarmem Datenzugriff für Simulationsserver um einen virtuellen Zwilling des Campuseigenen MS-Netzes zu erzeugen.

**Ausgangssituation – Kurzüberblick**

- Exascale-Betrieb mit sehr hohen Anforderungen an Spannungsqualität und Verfügbarkeit
- Campusnetz mit gemischten Last- und Einspeiseprofilen
- Über 120 Messstellen als Basis, erweiterbar für JUPITER (weitere 17 Messstellen)
- Latenzarmer Datenzugriff zur Forschung und Modellvalidierung

## 2. Typische Herausforderungen für Rechenzentren

Rechenzentren reagieren empfindlich auf Spannungseinbrüche, Flicker, transiente Ereignisse, Oberschwingungen und Supraharmonische. GPU-intensive Jobs und Kühlung erzeugen schnelle Lastsprünge. Die Integration von BHKW, PV, Speichern und V2G verändert Lastflüsse und Spektren bis 20 kHz. Neben der technischen Beherrschung sind normkonforme Erfassung und Dokumentation nach IEC 61000-4-30 Klasse A und EN 50160 erforderlich. Gleichzeitig muss das Monitoring wirtschaftlich skalieren.

Besonders in HPC-Infrastrukturen wie JUPITER treten hochfrequente Stromänderungen durch Takt- und Lastsprünge der GPU-Cluster auf. Diese führen zu kurzzeitigen Oberwellen-Überhöhungen und frequenzselektiven Kopplungseffekten zwischen Mittel- und Niederspannungsebene. Eine kontinuierliche, hochauflösende PQ-Erfassung ermöglicht es, solche transienten Phänomene zu identifizieren, bevor sie sich auf empfindliche IT-Stromversorgungen oder USV-Systeme auswirken.

**Herausforderungen – Kurzüberblick**

- Hohe Lastdynamik durch HPC-Jobs und Kühlung
- PQ-Einflüsse bis 20 kHz durch Leistungselektronik
- Pflicht zur normkonformen Erfassung und Dokumentation
- Skalierbares Monitoring bei vertretbaren Opex

## 3. Projektziel

Zentral sind vollständige Transparenz über Lastflüsse, Validierung von Simulations- und Netzmodellen, ein wirksames Frühwarnsystem für kritische Ereignisse sowie Flexibilität für spätere Erweiterungen.

**Projektziele – Kurzüberblick**

- Transparenz, Validierung, Frühwarnung, Flexibilität, Compliance
- 10-Minuten-Mittelwerte plus eventbasierte Störschriebe
- Präzise Zeitbasis und zentrale, rollenbasierte Auswertung

Die erhobenen Messdaten dienen nicht nur der Betriebsüberwachung, sondern fließen direkt in die Validierung digitaler Zwillinge des Campusnetzes ein. So kann das Forschungszentrum Reaktionszeiten, Spannungsstabilität und Netzrückwirkungen realitätsnah simulieren und die Ergebnisse mit den Live-Daten aus den PQI-Systemen abgleichen.

## 4. Technische Lösung von A. Eberle

Das FZJ setzt ein abgestuftes Konzept aus **PQI-DE**, **PQI-DA smart** und **WebPQ®** ein. An wichtigen Knotenpunkten sind **PQI-DE** installiert, deren großes Display direkten Live-Zugriff auf Messdaten erlaubt. In der Tiefe des Netzes wurden **PQI-DA smart** auf Hutschienen eingesetzt, die kompakt, kosteneffizient und für flächendeckende Überwachung optimiert sind. **WebPQ®** bündelt alle Messstellen, Reports und Alarme in einer zentralen Browseroberfläche.

Das implementierte Messsystem ist zeitsynchronisiert über GPS- oder NTP-basierte Zeitserver. Dadurch lassen sich Ereignisse über mehrere Spannungsebenen präzise korrelieren. Diese Synchronität ist entscheidend, um Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge, etwa zwischen Mittelspannungs- und Niederspannungsnetz, eindeutig zuzuordnen.

### 4.1 PQI-DE an kritischen Knoten

*Abbildung 2: **PQI-DE** – Monitoring an kritischen Knoten im Rechenzentrum*

**PQI-DE – Überblick**

- Klasse-A Messung für kritische Netzknoten
- Großes Display für direkten Zugriff auf Messdaten
- Ereignisgetriggerte Störschriebe und hohe Abtastraten
- Synchronisation und großer lokaler Speicher

## 4.2 PQI-DA smart in der Fläche

*Abbildung 3: **PQI-DA smart** – zur Skalierung der Messpunkte in der Tiefe des Netzes*

**PQI-DA smart – Überblick**

- Kompakte Bauform zur Hutschienenmontage
- Fokussiert auf skalierbare Sub-Messungen
- Klasse-A Erfassung für Spannung, Strom, Oberschwingungen
- Wirtschaftlich einsetzbar in der Netzfläche

## 4.3 Messkonzept und Datenpfad

Campusweit sind über 140 Messstellen aktiv, davon rund 15 **PQI-DE** im JUPITER-Umfeld. Ergänzend zahlreiche **PQI-DA smart** an sekundären Knoten.

## 4.4 Softwareplattform WebPQ®

**WebPQ® – Überblick**

- Zentrale Analyse im Browser mit Rollen und Rechten
- Live-Daten, Alarme, Normreports, Exporte
- Modbus TCP/IP und OPC UA für Systemintegration

*Abbildung 4: **WebPQ®** – Zentrale PQ-Analyse für alle Messstellen im JUPITER-Netz*

## 4.5 IT-Security in WebPQ®

Gerade im Kontext von Hochleistungsrechenzentren ist die IT-Sicherheit der Monitoringplattform von zentraler Bedeutung. **WebPQ®** erfüllt aktuelle Anforderungen an Datensicherheit und Cyber-Resilienz:

- Verschlüsselte Kommunikation über HTTPS und TLS
- Rollenbasierte Benutzer- und Rechteverwaltung
- Sichere Authentifizierungsmechanismen (inkl. 2FA-Optionen)
- Audit-Trails und revisionssichere Protokollierung
- Optionale Segmentierung in geschützten Netzwerken

Damit ist gewährleistet, dass kritische PQ-Daten manipulationssicher erfasst und verarbeitet werden – ein Muss für Betreiber von Datacentern und Forschungsinfrastrukturen. Darüber hinaus unterstützt **WebPQ®** optional die Anbindung an bestehende Security-Information-and-Event-Management-Systeme (SIEM). Damit können sicherheitsrelevante Ereignisse und Alarmmeldungen in das übergeordnete Sicherheitskonzept des Forschungszentrums integriert werden. Ein entscheidender Punkt bei der Absicherung kritischer Forschungs- und Energieinfrastrukturen.

# 5. Messergebnisse und Erkenntnisse

## 5.1 Lastflüsse und Trendanalysen

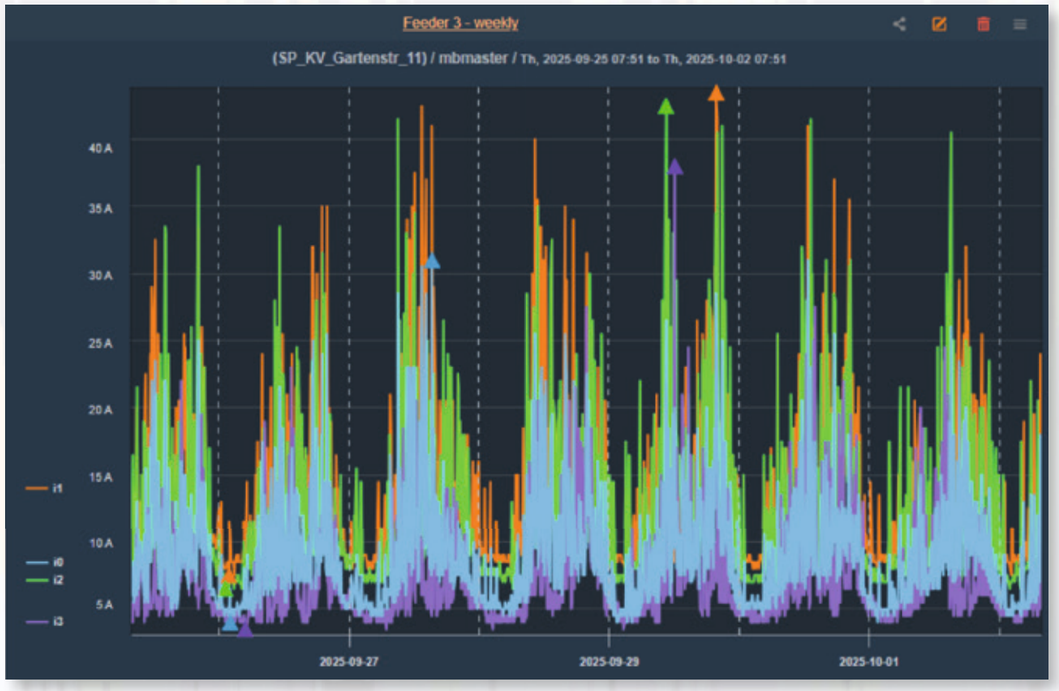


*Abbildung 5a: Stromverläufe (I1, I2, I3) im Wochenraster eines ausgewählten Feeders. Die Darstellung zeigt beispielhaft typische Tageslastprofile und markante Lastspitzen, wie sie auch im Umfeld des HPC-Betriebs am Forschungszentrum Jülich auftreten.*

*Abbildung 5b: Leistungsverläufe (P, Q, S) im Monatsraster. Hier werden beispielhaft wiederkehrende Muster von Grund- und Spitzenlast sowie Unterschiede im Blindleistungsverhalten sichtbar – vergleichbar mit den dynamischen Profilen im JUPITER-Rechenzentrum.*

*Abbildung 5c: Spannungsverläufe (U1, U2, U3) im Monatsraster. Die Darstellung dokumentiert beispielhaft typische Schwankungen und Spannungseinbrüche, wie sie auch bei starker Lastdynamik in HPC-Umgebungen beobachtet werden können.*

Die Auswertung der Strom- und Spannungsverläufe erlaubt eine präzise Bewertung der Netzsymmetrie und Phasenbelastung. Durch Langzeittrends lassen sich schleichende Veränderungen im Lastverhalten, etwa durch Softwareupdates, Servererweiterungen oder geänderte Kühlstrategien, frühzeitig erkennen.

## 5.2 Transienten und Reaktionszeiten

*Abbildung 6a: Transientenaufnahme beim parallelen Start mehrerer HPC-Jobs. Deutlich sichtbar ist beispielhaft ein kurzzeitiger Spannungseinbruch sowie eine Frequenzabweichung, die durch die hohe Einschaltleistung verursacht wurden.*

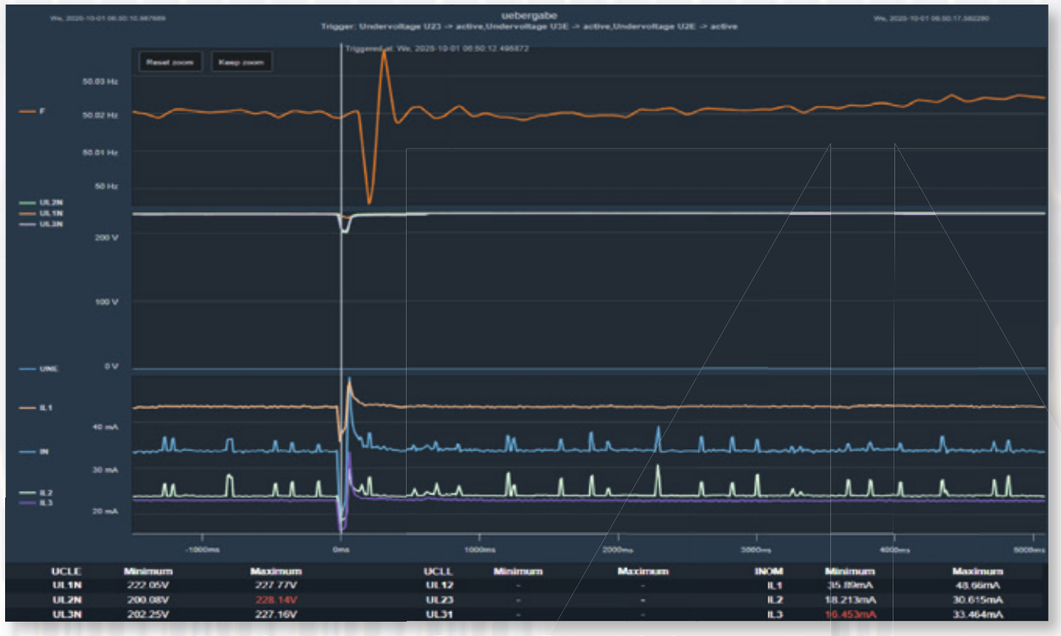


*Abbildung 6b: Hochauflösende Darstellung derselben Transiente im Zeitbereich. Die Spannungs- und Stromverläufe zeigen beispielhaft die dynamischen Einschaltströme der Server-Netzteile und verdeutlichen die Netzbelastung während der Anfahrphase.*

Die Kombination aus ereignisgetriggerter Aufzeichnung und hoher Abtastrate (bis zu 200 kHz pro Kanal) ermöglicht es, Spannungseinbrüche im Millisekundenbereich präzise zu erfassen und deren Einfluss auf nachgeschaltete USV-Systeme oder empfindliche Verbraucher zu quantifizieren.

## 5.3 Oberschwingungen und Supraharmonische

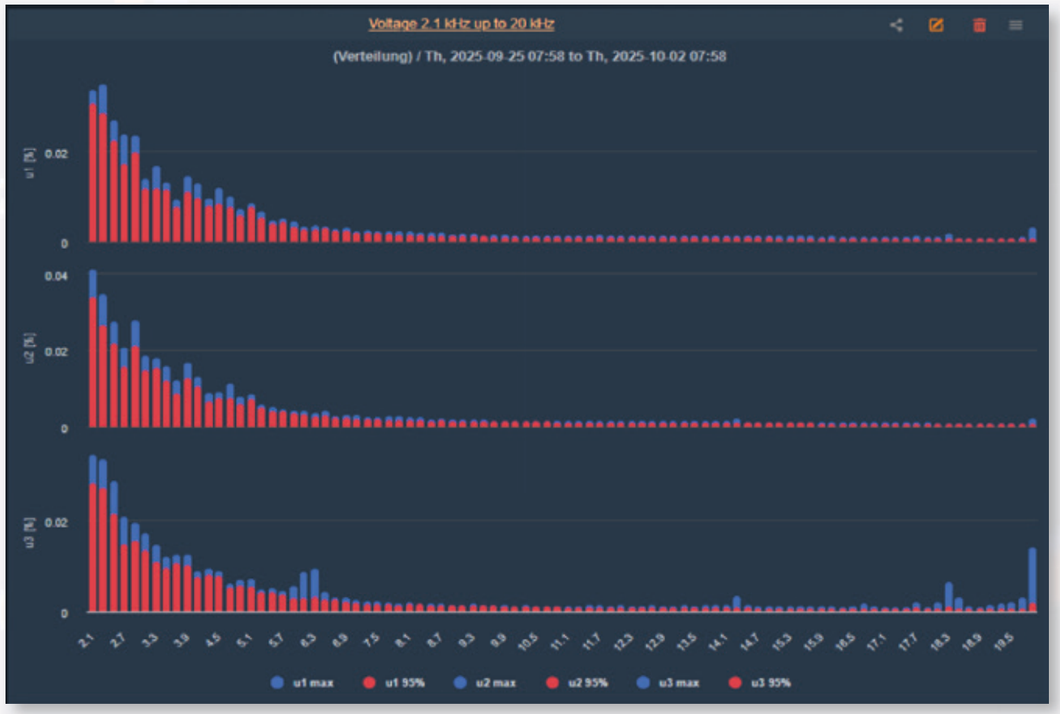


*Abbildung 7: Oberwellen- und Supraharmonische-Analyse bis 20 kHz. Die Verteilungen zeigen beispielhaft spektrale Schwerpunkte, wie sie durch die Schaltnetzteile der Server entstehen. Identifiziert wurden frequenzselektive Effekte und mögliche Resonanzbereiche, die in die Maßnahmenplanung für Filter- und Drosselkonzepte einfließen.*

Durch die Analyse der Supraharmonischen bis 20 kHz konnten spektrale Cluster identifiziert werden, die auf Schaltfrequenzen bestimmter Netzteile hinweisen. Diese Erkenntnisse sind Grundlage für gezielte Filterdimensionierung und EMV-Optimierung der Stromversorgung.

## 6. Nutzen für den Betreiber

Das kombinierte **PQI-DE**-**PQI-DA smart**-**WebPQ®**-Konzept schafft Transparenz von der Zuleitung bis zur Unterverteilung, belegt Normkonformität und liefert robuste Entscheidungsgrundlagen.

Zudem liefert das System wertvolle Kennzahlen für das Energiemanagement und die Kapazitätsplanung. Durch die kontinuierliche Analyse von Blindleistung und Spannungsasymmetrien lassen sich Betriebskosten senken und Netzkomponenten gezielt nachlastoptimiert betreiben.

## 7. Fazit und Ausblick

Das Projekt zeigt, wie Exascale-Anforderungen und Energiewende gemeinsam beherrscht werden können: mit Klasse-A-Messung, abgestufter Architektur und zentraler Auswertung. Der Ansatz ist auf andere Rechenzentren und Campusnetze übertragbar. Nächste Schritte sind mehr Automatisierung, prädiktive Analytik und engere Kopplung von Monitoring, Simulation und Regelung.

Perspektivisch können durch Machine-Learning-Modelle innerhalb von **WebPQ®** wiederkehrende Muster automatisch erkannt und Frühwarnungen generiert werden. Ein Schritt hin zum autonomen Energiemonitoring in Hochleistungsrechenzentren.

## 8. Normen, Messverfahren und Integration in Simulationsumgebungen

Messungen nach IEC 61000-4-30 Ed. 4 Klasse A. Harmonische nach IEC 61000-4-7, Flicker nach IEC 61000-4-15. Supraharmonische im Bereich 2 bis 20 kHz. Dokumentation gemäß EN 50160. 10-Minuten-Mittelwerte für Trendreports, eventbasierte Störschriebe für transiente Vorgänge. Präzise Zeitbasis und Synchronisation für verteilte Messpunkte. **WebPQ®** als zentrale Datenquelle für Leitwarte und Forschung, Integration über Modbus TCP IP.

Über standardisierte Schnittstellen (CSV, OPC UA, REST API) werden die Messdaten direkt in Simulations- und Forschungsumgebungen wie MATLAB®/Simulink® oder DIgSILENT PowerFactory® importiert. Dies ermöglicht den Abgleich zwischen realem und modelliertem Netzverhalten sowie die Kalibrierung von Lastfluss- und Stabilitätsmodellen.

## 9. Produktneuheit: PQI-LV

**Kürzlich veröffentlicht wurde das PQI-LV.**

Dieses Messgerät ist besonders kosteneffizient für Anwendungen in der Niederspannung konzipiert, bei denen eine große Zahl an Messpunkten mit hoher Genauigkeit und zu einem attraktiven Preis überwacht werden muss. Damit ergänzt es das bestehende Portfolio perfekt und eröffnet neue Möglichkeiten für Betreiber, die PQ flächendeckend und budgetschonend erfassen möchten.

Im Kontext ähnlicher Projekte wie der Anwendung in Rechenzentren wie bei FZ Jülich eignet sich das **PQI-LV** besonders für die lückenlose Überwachung der Niederspannungsebene innerhalb der Serverräume und Laborbereiche, wo Platz und Budget begrenzt sind, aber eine präzise Spannungsüberwachung entscheidend bleibt.

*Abbildung 8: **PQI-LV** – neue kosteneffiziente Lösung für Niederspannungsnetze*

## Autoren

**Fabian Leppich**

Produktmanager »PQSys«
A. Eberle GmbH & Co. KG

**Maximilian Sefz**

Marketingleitung
A. Eberle GmbH & Co. KG

**Wolfgang Reitmeier**

Vertrieb
A. Eberle GmbH & Co. KG

JÜLICH
Forschungszentrum

*Abbildung 9: Supercomputer JUPITER (Rechenzentrum) © Forschungszentrum Jülich / Sascha Kreklau*

**Haben Sie Fragen oder wünschen Sie eine Beratung zu unseren Lösungen zum kontinuierlichen Netzmonitoring für Rechenzentren, Energieversorger oder industrielle Campusnetze?**

**Dann scannen Sie einfach den QR-Code oder schreiben Sie uns an: vertrieb@a-eberle.de**

**Wir freuen uns auf Ihre Nachricht!**

A. Eberle GmbH & Co. KG
Frankenstraße 160
D-90461 Nürnberg
Tel +49(0)911 628108-0
Fax +49(0)911 628108-99
info@a-eberle.de
www.a-eberle.de

11/25