

Insulation failures in LHC superconducting magnet circuits

DISSERTATION

ZUR

ERLANGUNG DES AKADEMISCHEN GRADES

DOKTOR-INGENIEUR (DR.-ING.)

DER FAKULTÄT FÜR INFORMATIK UND ELEKTROTECHNIK

DER UNIVERSITÄT ROSTOCK

vorgelegt von:

Marvin Janitschke

Geboren am 12.05.1996 in Templin, Deutschland

Gutachter:

Gutachter 1

Gutachter 2

Gutachter 3

January 27, 2026

Abstract

Superconducting accelerator magnets are crucial to the Large Hadron Collider (LHC), where long-term electrical integrity directly affects machine availability, operational safety, and luminosity performance. Among insulation degradations, inter-turn short circuits pose a particular risk: they can develop silently, disturb magnetic-field quality, and, if sufficiently low in resistance, cause local overheating. Historically, such faults in the LHC have mainly been identified after damage had occurred, highlighting the lack of reliable early indicators of developing insulation failures.

This thesis addresses this challenge by developing a physics-based diagnostic framework based on frequency- and time-domain impedance analysis. Impedance techniques probe internal electrodynamic couplings and are sensitive to small inductive and capacitive variations, enabling early detection of electrical degradations. Because frequency-domain measurements are highly sensitive but operationally demanding, while Fast Power Abort (FPA) data are abundant but more challenging to interpret, both domains are combined into a complementary diagnostic toolkit. Although this work focuses on the LHC main dipole magnet, the underlying concepts and modelling approaches apply to other superconducting magnet circuits.

The thesis delivers three main achievements. First, the electromagnetic and thermal impacts of inter-turn short circuits are quantified to define the sensitivity requirements for monitoring techniques. For the LHC main dipole, faults below a few ohms can become thermally significant, while higher-resistance faults remain benign. Second, dominant impedance characteristics governing superconducting magnets are identified through a physics-based analysis of multi-year impedance data. The methodology is applied to the full LHC main dipole ensemble, grouping magnets into 24 families based on dominant frequency-dependent mechanisms, including persistent currents, beam-screen eddy currents, manufacturer-related differences, and capacitive coupling effects. This establishes a robust baseline for anomaly detection. Third, characteristic fault signatures are established using a validated physics-based lumped-element modelling framework. The model is benchmarked against standalone and LHC in-situ measurements and applied to both the LHC main dipole and the HL-LHC recombination dipole. Mid-plane faults are expected to be detectable below approximately $1\ \Omega$, pole-region faults below approximately $0.1\ \Omega$, and very low-resistance faults ($< 10\ \text{m}\Omega$) are likely to trigger quench protection.

A long-term comparison of impedance measurements with operational FPA data shows no evidence of developing electrical degradations within measurement accuracy, confirming the stability of the LHC dipole circuit. The modelling-measurement framework provides a structured basis for detecting and interpreting insulation failures and may support future monitoring strategies for the LHC and next-generation superconducting accelerators.

Zusammenfassung

Supraleitende Beschleunigermagnete sind für den Large Hadron Collider (LHC) von entscheidender Bedeutung, da ihre langfristige elektrische Integrität sich direkt auf die Verfügbarkeit der Maschine, die Betriebssicherheit und die Luminositätsleistung auswirkt. Unter den verschiedenen Arten der Isolationsfehler stellen Kurzschlüsse zwischen den Windungen ein besonderes Risiko dar: Sie können unbemerkt entstehen, die Qualität des Magnetfelds beeinträchtigen und, wenn ihr Widerstand ausreichend gering ist, zu lokaler Überhitzung führen. In der Vergangenheit wurden solche Fehler im LHC meist erst nach dem Auftreten von Schäden festgestellt, was den Mangel an zuverlässigen Frühindikatoren für sich anbahnende Isolationsfehler deutlich macht.

Diese Arbeit befasst sich mit dieser Herausforderung, indem sie einen Diagnoseansatz entwickelt, der auf der Impedanzanalyse im Frequenz- und Zeitbereich basiert. Impedanzmessungen untersuchen interne elektrodynamische Kopplungen und reagieren empfindlich auf kleine induktive und kapazitive Veränderungen, wodurch Isolationsfehler frühzeitig erkannt werden können. Da Messungen im Frequenzbereich zwar sehr empfindlich, aber auch zeitlich anspruchsvoll sind, sind Fast Power Abort (FPA)-Daten im Zeitbereich zwar reichlich vorhanden, aber schwieriger zu interpretieren. Beide Bereiche werden zu einem komplementären Diagnoseansatz kombiniert. Obwohl sich diese Arbeit auf den Hauptdipol des LHC konzentriert, sind die zugrunde liegenden Konzepte und Modellierungsansätze auch auf andere supraleitende Magnetschaltungen anwendbar.

Die Dissertation liefert drei wesentliche Ergebnisse. Erstens werden die elektromagnetischen und thermischen Auswirkungen von Kurzschlüssen zwischen den Windungen quantifiziert, um die Empfindlichkeitsanforderungen für Überwachungstechniken zu definieren. Für den Hauptdipol des LHC können Fehler unterhalb von wenigen Ohm thermisch signifikant werden, während sie bei höherem Widerstand harmlos bleiben. Zweitens werden die dominanten Impedanzcharakteristika, die die supraleitenden Magnete bestimmen, durch eine physikalisch basierte Analyse mehrjähriger Impedanzdaten identifiziert. Die Methodik wird auf alle LHC-Hauptdipole angewendet. Dabei werden die Magnete auf der Grundlage dominanter frequenzabhängiger Mechanismen, darunter Magnetisierung, Wirbelströme, herstellerbezogene Unterschiede und kapazitive Kopplungseffekte, in 24 Familien gruppiert. Damit wird eine robuste Grundlage für die Anomalieerkennung geschaffen. Drittens werden charakteristische Fehlersignaturen mithilfe eines validierten, physikalisch basierten Simulationsmodells ermittelt. Das Modell wird anhand von Messdaten evaluiert und sowohl am LHC-Hauptdipol als auch am HL-LHC-Rekombinationsdipol angewendet. Es wird erwartet, dass Fehler in der Mittelebene unterhalb von etwa $1\ \Omega$, Fehler im Polbereich unterhalb von etwa $0.1\ \Omega$ erkennbar sind und Fehler mit sehr geringem

Widerstand ($< 10 \text{ m}\Omega$) wahrscheinlich die Quench-Erkennung auslösen.

Ein Langzeitvergleich der Impedanzmessungen zeigt keine Anzeichen für eine Verschlechterung der elektrischen Eigenschaften aller LHC-Hauptdipole innerhalb der Messgenauigkeit, was die Stabilität der LHC-Magneten bestätigt. Der Rahmen für die Modellierung und Messung bietet eine strukturierte Grundlage für die Erkennung und Interpretation von Isolationsfehlern und kann zukünftige Überwachungsstrategien für den LHC und supraleitende Beschleuniger der nächsten Generation unterstützen.