

# EMT-MODELLANFORDERUNGEN UND BEDARF AN STANDARDISIERTEN SCHNITTSTELLEN FÜR INTERAKTIONS- STUDIEN

Positionspapier der deutschen Übertragungsnetzbetreiber

## BEDARFE FÜR INTERAKTIONSTUDIEN

Die steigende Durchdringung mit Stromrichtern auf allen Spannungsebenen im elektrischen Energieversorgungssystem führt zum zunehmenden Einfluss der stromrichter-getriebenen Stabilität auf das Gesamtsystem. Die damit zusätzlich einhergehenden Stabilitätsphänomene, hervorgerufen z.B. durch Reglerinteraktionen [1], unterscheiden sich signifikant von den klassischen Stabilitätsphänomenen im Verbundsystem. Diese waren bzw. sind maßgeblich von konventioneller Erzeugung, d.h. durch die Physik der Synchronmaschinen und durch ihre Regelkreise, bestimmt. Die über Stromrichter angeschlossenen Betriebsmittel weisen Regelkreise mit sehr hoher Regeldynamik auf, so dass ihr Netzverhalten bereits im Kurzzeitbereich wesentlich durch die Regelung geprägt ist. Zur Simulation von Reglerinteraktionen sind deshalb sehr detaillierte Modelle der Stromrichter und die Betrachtung eines größeren Frequenzbereichs notwendig.

Bisher übliche Interaktionsstudien im EMT<sup>1</sup>-Zeitbereich beschränken sich typischerweise auf sehr begrenzte, vereinzelte Netzregionen und beinhalten aufgrund der Komplexität und des Rechenaufwands nur wenige Stromrichtermodelle. Zukünftige Netzszenarien weisen allerdings viele Netzgebiete mit einer hohen Anzahl von Stromrichtern verschiedener Technologie und unterschiedlicher Hersteller in geringer elektrischer Distanz zueinander auf (siehe Abbildung 1). Um die sichere und schnelle Integration der Erneuerbaren Energien auch bei hohen Anteilen von stromrichterbasierter Erzeugung zu ermöglichen, ist es notwendig, systemische Interaktionsstudien durchzuführen. Dafür ist ein umfassender EMT-Datensatz notwendig, der hinreichend genaue Modelle der relevanten Betriebsmittel sowie Herstellermodelle beinhaltet. Aus diesem Datensatz können dann gezielt Netzmodelle zur Durchführung von Interaktionsstudien ausgekoppelt werden.

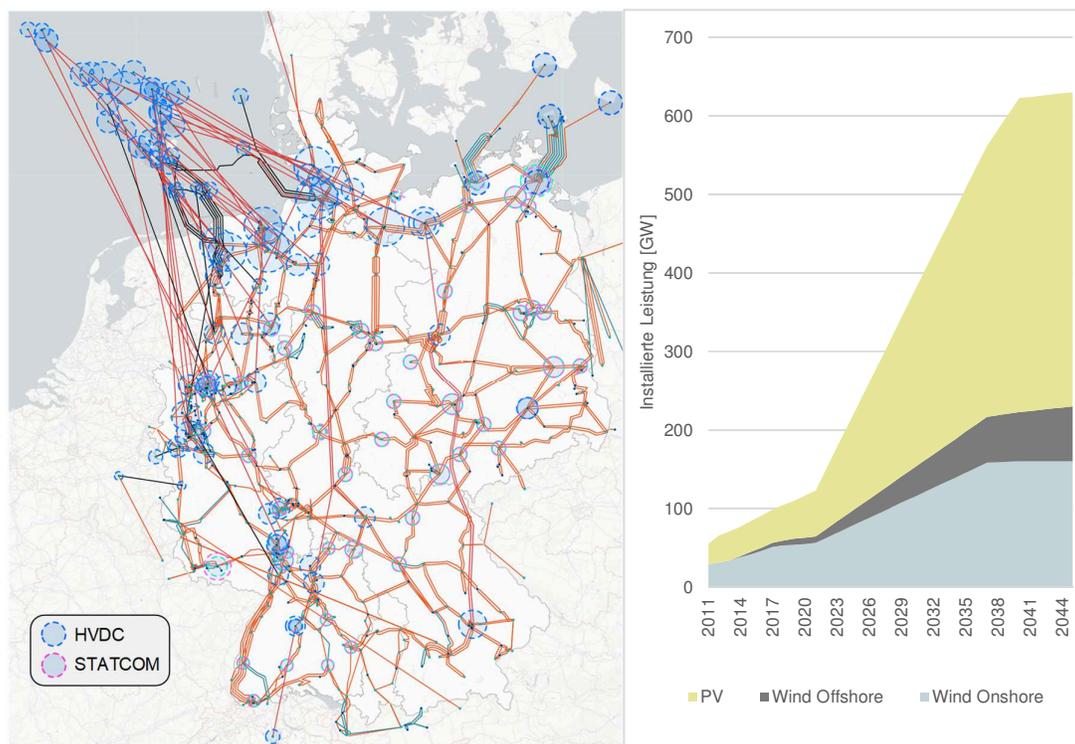


Abbildung 1: Übersicht der Stromrichterdurchdringung mit STATCOM und HGÜ in 2045 (NEP-Szenario C2045) und die prognostizierte Entwicklung der installierten Leistung bei stromrichterbasierten Erneuerbaren Energien.

<sup>1</sup> EMT – Electro-Magnetic Transients (Elektromagnetische Vorgänge) bezogen auf eine Momentanwert-Simulation im Zeitbereich

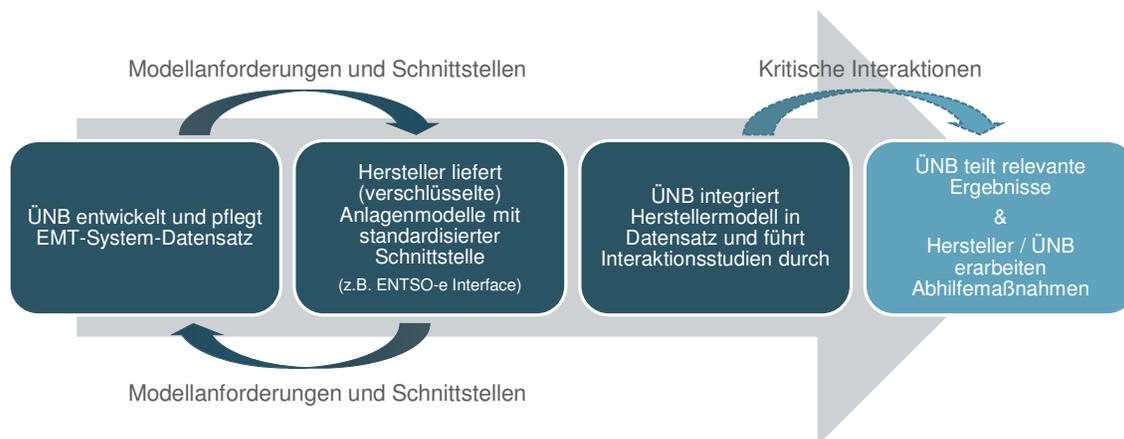


Abbildung 2: Prozessentwurf zukünftiger systemischer Interaktionsstudien

Der durch die ÜNB angestrebte Prozess zur Erstellung eines EMT-Datensatzes und zur Durchführung von Interaktionsstudien ist in Abbildung 2 dargestellt. Die durch die Hersteller zu liefernden Anlagenmodelle („erste Versionen“) sollten bereits frühzeitig in einem Netzanschlussprojekt bereitgestellt werden, so dass mögliche Risiken bzgl. der Interaktion von Stromrichtern auch frühzeitig erkannt werden können. Sobald neue Versionen der Modelle aufgrund von z.B. Regelungsanpassungen verfügbar sind, sollten diese zeitnah bereitgestellt werden, sodass der Prozess wiederholt werden kann. Somit ist dieser vorgeschlagene Prozess iterativ über die gesamte Projektlaufzeit und Anlagenlebensdauer zu verstehen.

Ziel der ÜNB ist es, einen Datensatz zu entwickeln, welcher EMT-Simulationen für systemische Interaktionsstudien ermöglicht. Dies ist die Voraussetzung, um Interaktionsrisiken in Netzanschlussprojekten frühzeitig zu erkennen und damit die Systemstabilität auch in Szenarien mit hoher Stromrichterdurchdringung sicherzustellen. Des Weiteren sind für die Vielzahl an zukünftigen Multi-Terminal-/Multi-Vendor-HGÜ-Verbindungen Untersuchungen mit verschiedenen Herstellermodellen unabdingbar. Hierfür sind entsprechende Modellierungsanforderungen und eine standardisierte Schnittstelle notwendig.

## AKTUELLE INTERAKTIONSPHÄNOMENE

Selbst bei vergleichsweise geringer Stromrichterdurchdringung im heutigen Übertragungsnetz, kam es in der Vergangenheit bereits zu verschiedenen unerwünschten Interaktionsphänomenen. Diese sind bisher vor allem bei bestehenden HGÜ-Verbindungen (z.B. INELFE) oder bei Offshore-Windparks in Erscheinung getreten:

- Bei einer Umschaltung der Sammelschienenkonfiguration des onshore-seitigen Stromrichters einer Offshore-HGÜ-Verbindung kam es zu einer Interaktion mit dem Onshore-Netz im Bereich von 1,5-1,8 kHz. Die kritische Frequenz wurde mit Hilfe einer Messung identifiziert und daraufhin eine Impedanzuntersuchung des Netzes bei unterschiedlichen Schaltzuständen durchgeführt. Dadurch konnte eine verringerte Dämpfung von Resonanzen in dem beobachteten Frequenzbereich identifiziert und daraufhin eine Anpassung der HGÜ-Regelung durch den Hersteller durchgeführt werden. [2]
- Ein vergleichbares Phänomen trat beim INELFE HGÜ-Link zwischen Frankreich und Spanien mit einer Resonanzfrequenz von 1,7 kHz auf. Besonderheit bei diesem Vorfall war, dass das Verhalten mit dem Offline-Simulations-Modell auf Grund von Vereinfachungen und Regelungsupdates nicht reproduziert werden konnte. [3]

- Offshore-Netzanbindungen von Windparks sind besonders relevant für Interaktionsphänomene, da diese immer eine hohe Stromrichterdurchdringung mit vergleichsweise schwachen Netzanbindungen kombinieren. Darüber hinaus führt die Verkabelung zu einer Verschiebung der Resonanzen zu kleineren Frequenzen, was die Gefahr von Reglerinteraktionen mit dem Offshore-Netz weiter erhöht. [4]

Alle diese Phänomene haben gemein, dass diese nur mit Hilfe von realitätsnahen EMT-Modellen reproduziert und analysiert werden können, um geeignete Abhilfemaßnahmen zu identifizieren. Dafür ist es unablässig, dass geeignete Anforderungen an die Interoperabilität der herstellereigenen EMT-Modelle gestellt werden, wie es teilweise schon bei anderen Netzbetreibern auch für Netzanschlussnehmer durchgeführt wird [5].

## HERAUSFORDERUNGEN BEI AKTUELLEN SIMULATIONSMODELLEN

Aktuell werden seitens der Hersteller Netzstudien auf Basis von Netzdaten der ÜNB und ggf. generischen Modellen von benachbarten stromrichter-basierten Anlagen durchgeführt, um projektspezifisch nachzuweisen, dass der anzuschließende Stromrichter die Netzanschlussregeln bzw. technischen Spezifikationen erfüllt. Diese Vorgehensweise ist bei aktuellen Projekten meist auf Grund der vergleichsweise geringen Anzahl oder hohen elektrischen Distanz der Stromrichter zueinander hinreichend. Allerdings ist diese Voraussetzung in den aktuellen Zukunftsszenarien nicht mehr gegeben.

Die Durchführung von (weiträumigeren) System- und Interaktionsstudien unter Einbeziehung mehrerer Stromrichter ist Aufgabe des ÜNB. Darüber hinaus ist ein Austausch von verschlüsselten herstellereigenen Modellen zwischen verschiedenen Herstellern aus Geheimhaltungsgründen in der Regel nicht möglich, d.h. die herstellereigenen Modelle unterschiedlicher Hersteller liegen nur dem relevanten ÜNB vor. Jedoch sind die verschlüsselten Modelle häufig nicht in einer gemeinsamen Simulationsumgebung lauffähig, da diese Modelle dabei von spezifischen Compiler-Versionen, Versionen der Simulationsumgebung und anderen Laufzeitumgebungen und deren Versionen abhängig sind. Zusätzlich wird eine adäquate Genauigkeit der Modelle oft nur für eine feste Schrittweite des Simulationstools gewährleistet. Die Simulationsschrittweite variiert dabei oftmals zwischen den Herstellermodellen, was zu einer weiteren Inkompatibilität führen kann.

Damit in Zukunft Interaktionsstudien mehrerer Stromrichteranlagen durchführbar sind, müssen die oben beschriebenen Kompatibilitätsprobleme der herstellereigenen Modelle vermieden werden. Eine nachträgliche Anpassung bzw. Neubereitstellung der herstellereigenen Modelle verursacht zusätzliche Kosten und ist unter Umständen aus verschiedenen Gründen überhaupt nicht mehr umsetzbar.

Die Festlegung einer einheitlichen Simulationsumgebung und vorgeschriebenen Compilern bzw. Softwareversionen ist langfristig nicht zielführend, da eine Modellkompatibilität mit anderen Herstellermodellen über die gesamte Anlagenlebensdauer (> 20 Jahre) gewährleistet sein muss und die dauerhafte Verwendung veralteter Softwareversionen auch aus IT-Sicherheitsgründen und Betriebssystemabhängigkeiten nicht möglich ist.

## STANDARDISIERTE REGLERSCHNITTSTELLE UND EMT-MODELLANFORDERUNGEN

Die Tool- und Compilerunabhängigkeit muss sichergestellt sein, um Modelle verschiedener Hersteller über die gesamte Lebensdauer der Anlagen in ein Netzmodell integrieren zu können. Dafür ist es notwendig, dass die **Möglichkeit der Portierung in andere Simulationsumgebungen durch den ÜNB oder Dritte gegeben ist**. Daraus ergeben sich folgende Anforderungen:

- Die Modelle müssen so aufgebaut sein, dass alle elektrischen Komponenten (im Fall von HGÜ-Systemen ggf. außerhalb der Submodulebene) strikt getrennt von den Regelungsfunktionen sind und der Signalaustausch zwischen den elektrischen Komponenten und den jeweils relevanten Regelungsfunktionen anhand definierter Übergabepunkte geschieht.
- Die Regelung – mit realem, originalem Regelungscode - ist anhand von Bibliotheken mit definierten Schnittstellen umzusetzen (z.B. in einer DLL). Die eingebetteten Bibliotheken (bspw. Regelungsfunktionen als DLL, etc.) müssen unabhängig von der verwendeten Softwareumgebung sein (sowohl Simulationssoftware- als auch weitestgehend Compiler-unabhängig). Vorkompilierter Code muss für verschiedene Betriebssysteme (z.B. Windows, Linux, MacOS in 64bit) bereitgestellt werden, z.B. in Form einer DLL für Windows. Die Modelle dürfen keinen vorkompilierten Fortran-Code enthalten.
- Es bestehen definierte Schnittstellen zwischen DLL und Simulationssoftware (z.B. PSCAD, PowerFactory) in Form eines offenen Wrappers. Die Schnittstellen (Funktionen und Übergabeparameter) der DLL-Dateien sind in einem Header definiert und unmissverständlich dokumentiert.
- Eine Mehrfachinstanziierung der Modelle und Bibliotheken muss möglich sein. Die Instanzen der Bibliotheken dürfen sich keine Arbeitsspeicheradressen teilen.
- Die definierten Schnittstellen zwischen DLL und Simulationssoftware sollten grundsätzlich mit HIL-Anwendungen kompatibel sein.

Beispielsweise ist ein „Type 3“ oder „Type 4“ Modell nach CIGRÉ [6] als elektrisches Modell der einzelnen Konverterarme eines MMC möglich, dessen Ansteuerung wiederum durch eine softwareumgebungsunabhängige DLL-Datei geschieht.

**Modellgültigkeit für Untersuchungen im Frequenzbereich 0 – 9 kHz ist zwingend erforderlich.**

- Die Regelungsimplementierung im Modell verwendet den originalen Regelungscode (ggf. ohne Redundanzen und vereinfachten/beschleunigten Hoch- und Herunterfahrsequenzen) unter Berücksichtigung der Eigenschaften der realen Hardware.
- Zusätzlich müssen die EMT-Modelle zur Analyse langsam veränderlicher Überspannungen<sup>2</sup> für einen erweiterten Frequenzbereich 9 – 20 kHz tauglich sein.
- Der Aufbau der EMT-Modelle muss gewährleisten, dass die Modelle bei variabel einstellbarer Netzfrequenz ausführbar sind und in einem definierten Einstellbereich variabler Simulationsschrittweite gültig sind. Typische Schrittweiten liegen im Bereich 1 - 20 µs. Der DLL-Aufruf erfolgt entsprechend dem realen Regelungszyklus und muss somit unabhängig von der Simulationsschrittweite der Simulationssoftware sein.

Bei allen oben genannten Anforderungen ist angenommen, dass ein **angemessener Schutz des „Geistigen Eigentums“ sichergestellt werden kann**.

- Regelungscode darf verschlüsselt werden, während primärtechnische Betriebsmittel und Anlagenkomponenten nicht verschlüsselt sein dürfen.
- Dokumentation der Schnittstellen etwaiger verschlüsselter Modelle muss bereitgestellt werden. Dabei ist eine Unterteilung der Regelungsebenen beispielhaft wie bei der Definitionen „grid level control“, „station

<sup>2</sup> Vgl. Slow-Front Overvoltages aus der CIGRÉ-Publikation [9]

level control“ und „converter-near control“ aus [7] vorzusehen. Weitere technologiespezifische Signale, die für Interaktionsstudien notwendig sind, sollten mit dem ÜNB abgestimmt werden.

Eine Implementierungsmöglichkeit der oben genannten Anforderungen ist das *ENTSO-E standardized control interface* [8]. Die Machbarkeit wurde in unterschiedlichen Anwendungen verifiziert:

- HGÜ-Systeme in einem Multi-Stromrichter SIL / HIL Prüfstand (Projekt: DemAnDS – Demonstration of Interoperability of future AC/DC-Systems)
- Windmodelle in einer SIL-Umgebung (internes ÜNB Projekt)
- Generisches geregeltes Umrichtermodell in HIL / CHIL-Testumgebung [7]

Die dargestellten Anforderungen der ÜNB an die EMT-Modellierung und an eine standardisierte Regelungsschnittstelle sind eine grundlegende Voraussetzung, um systemische Interaktionsstudien durchführen zu können und damit die sichere Integration von Stromrichtern in dem geplanten Umfang und der notwendigen Umsetzungsgeschwindigkeit zu gewährleisten.

## LITERATURVERZEICHNIS

- [1] N. Hatziaargyriou, J. V. Milanović, C. Rahmann, V. Ajarapu, C. Cañizares, I. Erlich, D. Hill, I. Hiskens, I. Kamwa, B. Pal, P. Pourbeik, J. J. S.-. Gasca, A. Stanković, T. V. Cutsem, V. Vittal und C. Vournas, „Stability Definitions and Characterization of Dynamic Behavior in Systems with High Penetration of Power Electronic Interfaced Technologies,“ IEEE PES, 2020.
- [2] M. K. ZADEH, T. RENDEL, C. RATHKE und A. MENZE, „Operating experience of HVDC links – Behaviour during faults and switching events in the onshore grid,“ CIGRÉ Winnipeg 2017 Colloquium Study Committees A3, B4 & D1, Winnipeg, 2017.
- [3] H. SAAD, Y. VERNAY, S. DENNETIERE, P. RAULT und B. CLERC, „Real-Time, System Dynamic Studies of Power Electronics Devices with Simulation - A TSO operational experience,“ CIGRE C4-314, Paris, 2018.
- [4] C. Buchhagen, C. Rauscher, A. Menze und D. J. Jung, „BorWin1 – First Experiences with harmonic interactions in converter dominated grids,“ International ETG Congress, Bonn, 2015.
- [5] „Expert Group Interaction Studies and Simulation Models (EG ISSM), Final Report,“ 2021.
- [6] C. W. G. B4.57, „Guide for the Development of Models for HVDC Converters in a HVDC Grid,“ Cigre, 2014.
- [7] A. Mahaan, B. Stickan, A. Salman, C. Gasser, F. Kulenkampff, R. Singer, S. Rogalle, T. Schaupp, C. Schoell, M. Lindner und T. Rollkowski, „ENTSO-E Standardized control interface for HVDC SIL/HIL conformity tests,“ *Wind Integration Workshop*, 2022.
- [8] ENTSO-E, „Standardized control interface for HVDC SIL/HIL conformity tests,“ 2020.
- [9] A. Bilock, L. Arevalo und D. Wu, „A novel approach to statistical analysis of slow front overvoltages in HVDC converter stations,“ CIGRE C4-210, 2018.