

# **Transmission Capacity Management (TCM): Netzanschlussmanagement für Offshore Windparks an HGÜ- Netzanschlussssystemen – Technische Grenzen und verfügbare Anschlusskapazität**

---

## **1 Hintergrund**

Die Planung des Offshore-Netzanschlussystems erfolgt gemäß den gesetzlichen Auflagen und Anforderungen und hat das Ziel ein bedarfsgerecht dimensioniertes, elektrisches Übertragungssystem für einen effizienten Transport der Offshore erzeugten elektrischen Energie in das Onshore-Netz zu schaffen. Diese Forderung nach einem effizienten und bedarfsgerechten Netzanschluss der Offshore-Windparks (OWP) an das Übertragungsnetz beeinflusst wesentlich die Eigenschaften der Netzanbindungssysteme (NAS) und ihre auslegungstechnische Dimensionierung. Die Auslegung der NAS auf die geplante Erzeugungsleistung in Verbindung mit einer fehlenden Überlastbarkeit bei HGÜ-Systemen (Hochspannungs-Gleichstromübertragung) führt dazu, dass nur unter bestimmten Voraussetzungen ein Anschluss weiterer, über die ursprünglich vorgesehene Anschlussleistung hinausgehende, OWP-Leistung möglich ist. Dieser Umstand ist für folgende zwei Fälle relevant:

- Temporären Anschlüsse, bei denen im Falle der verzögerten Fertigstellung des ursprünglich geplanten NAS ein OWP vorübergehend an ein existierendes NAS angeschlossen wird
- Nutzung der 155-kV-AC-Längskupplung zur direkt benachbarten Plattformen (z. B. BorWin alpha und BorWin beta), um im Falle eines NAS-Ausfalles eine Redundanz für den Teillastbetrieb zu erreichen.

In beiden Fällen wird u.U. an das NAS zeitlich begrenzt eine über dessen Nennleistung hinausgehende installierte Windleistung angeschlossen. Um eine Überlastung zuverlässig zu verhindern sind daher sowohl für temporäre als auch für betriebliche Interim-Anschlüsse (nachfolgend temporäre Anschlüsse genannt) geeignete Methoden zu entwickeln und zu implementieren.

## **2 Leistungsgrenzen des Netzanschlusssystems**

Die wesentlichen, die Leistungsübertragung begrenzenden, Betriebsmittel der HGÜ-Netzanschlussysteme sind der Umrichter sowie die zum Leistungstransport eingesetzten Kabel.

### **2.1 HGÜ-Umrichter**

Die Übertragungsfähigkeit der HGÜ-Umrichter wird im Wesentlichen durch zwei Faktoren begrenzt:

1. Die maximale Stromtragfähigkeit der IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor).
2. Die maximale Gleichspannung im Zwischenkreis. Diese ist durch die Auslegung der Isolation des Umrichters und der zur Verfügung stehenden Kabeltechnik bestimmt und stellt dadurch keine Regelgröße für die Übertragungsleistung dar.

Für den Anschluss der OWPs werden HGÜ-Umrichter in VSC-Technologie (Voltage Source Converter-Technologie) eingesetzt. Hier werden abschaltbare Halbleiter verbaut (IGBTs), die offshoreseitig die erzeugte Energie gleichrichten. Abhängig von der offshoreseitig erzeugten Leistung werden die IGBTs hierbei vom Strom durchflossen, der diese erwärmt. Die Dimensionierung der IGBTs und der zugehörigen Kühlung erfolgt basierend auf der geplanten Erzeugungsleistung, also der Nennübertragungsleistung des NAS. Eine höhere Leistungsübertragung über die IGBTs, wie sie z.B. durch eine unkontrollierte Überspeisung im Falle von temporären Anschlüssen auftreten könnte, ist nicht zulässig und führt zur augenblicklichen Abschaltung des NAS über in die Umrichtersteuerung integrierte Schutzfunktionen. Hier ist insbesondere das geringe thermische Speichervermögen der IGBTs zu beachten, die bereits durch kurzzeitige Überschreitungen des zulässigen maximalen Stromes zerstört werden können.

Um einen störungsfreien Betrieb des NAS zu gewährleisten, muss daher für alle Betriebszustände und zu jedem Zeitpunkt die Leistungseinspeisung so erfolgen, dass die maximale Übertragungsleistung der HVDC nicht überschritten wird.

## 2.2 Kabelauslegung

Alle Seekabel werden durch die aus der transportierten Energie verursachten Verluste erwärmt. Die technologische Grenze ist hierbei – abhängig vom konkreten Kabeltyp – die maximal zulässige Leitertemperatur bzw. die höchste zulässige Temperatur des Isolationsmaterials. Darüber hinaus sind alle Seekabel in der Deutschen Bucht entsprechend den genehmigungsrechtlichen Auflagen zur Einhaltung des sogenannten 2K-Kriteriums ausgelegt. Die aus naturschutzfachlicher Sicht geltende Grenztemperaturänderung von 2 K gilt hierbei in einer Aufpunkttiefe von 20 cm innerhalb der AWZ bzw. 30 cm innerhalb der 12sm-Zone unterhalb der Meeresbodenoberfläche und limitiert den zulässigen Energietransport unter die aus technischer Sicht möglichen Werte.

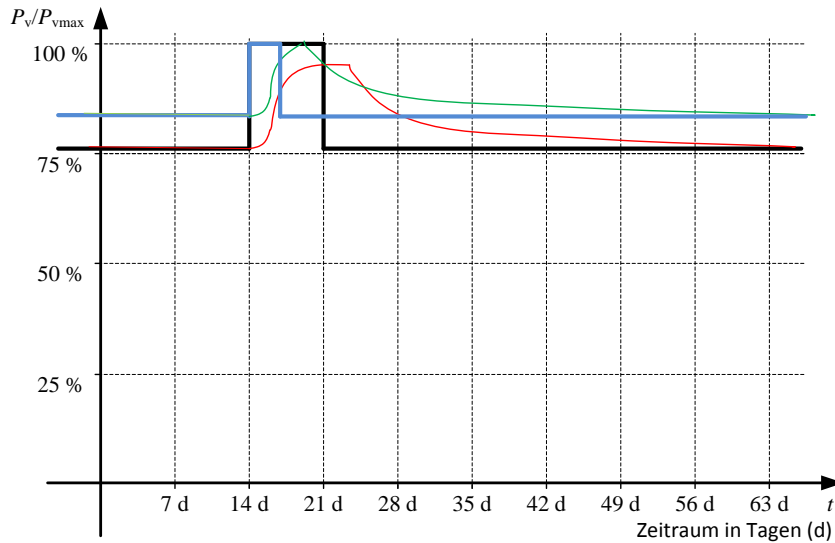
Bei der Berechnung der Aufpunkttemperatur wird entsprechend der IEC 60287 zunächst, ausgehend vom Zeitmittelwert der Kabelverluste, der Zeitmittelwert der Aufpunkterwärmung bestimmt. Gemäß dem BSH-Standard „Konstruktive Ausführung von Offshore-Windenergieanlagen“<sup>1</sup> sind dabei sowohl die fluktuierende Einspeiseleistung der angeschlossenen Windparks, als auch die konkrete Auslegung der Übertragungsleitung (einschließlich der Lage und Dimensionierung der Kompensationsanlagen bei Drehstrom-Kabeln), zu berücksichtigen. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 1 mit der schwarzen Linie für den Grundfall (ohne temporäre Überspeisung) bzw. blau (mit temporär angeschlossenen OWP) im Zeitbereich 0 – 14 d (d = Tage) dargestellt.

Hiervon abgeleitet ist der mittleren Aufpunkterwärmung, zur Berücksichtigung mehrtägiger Vollastphasen der Windparks, eine transiente Erwärmung zu überlagern. Für den transienten Erwärmungsvorgang wird, ausgehend von der sich stationär einstellenden mittleren Kabelerwärmung als stationäre Ausgangstemperatur, der in Abbildung 1 dargestellte Sprung der Kabelverluste vom Zeitmittelwert auf ihren Höchstwert angenommen (schwarze Kurve). An die Höchstlastphase von 7 Tagen Dauer schließt sich eine Abkühlungsphase von 45 Tagen mit mittleren Kabelverlusten an. Die rote Kurve illustriert die Aufpunkttemperatur unter diesen Annahmen.

Diese Berechnungen beruhen auf der Annahme, dass die installierte Leistung der WEA der Nennleistung der HGÜ entspricht. Wird mehr installierte Leistung an die HGÜ angeschlossen, wird insbesondere im Teillastbereich mehr Energie transportiert, was zu einer höheren Erwärmung des Kabels bzw. des Erdbodens führt als in diesen Annahmen berücksichtigt. Zur Verdeutlichung der Auswirkungen eines temporär angeschlossenen OWPs dient die blaue Kurve in Abbildung 1: Bedingt durch die höher Anzahl der WEAs und damit einer größeren installierten und betriebsbereiten Nennleistung erzeugt das gleiche Windprofil mehr elektrische Energie (blaue Kurve in Abbildung 1, Zeitraum 0-14 d) und in der Folge auch eine höhere Verlustenergie im Kabel, die auch zu einer höheren mittleren Aufpunkttemperatur führt (grüne Kurve in Abbildung 1, Zeitraum 0-14 d). Ausgehend von dieser höheren mittleren Aufpunkttemperatur ist dann ggf. bereits nach weniger als 7 Tagen Vollast die max. zulässige Aufpunkttemperatur erreicht und die Leistungsübertragung entsprechend einzuschränken (Abbildung 1, blaue und grüne Kurve, Zeitraum etwa 17 d – 63 d).

---

<sup>1</sup> **Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie:** Standard – Konstruktive Ausführung von Offshore-Windenergieanlagen. Hamburg und Rostock, Ausgabe 12. Juni 2007.



**Abbildung 1:** Transienter Sprung der Verlustleistung (schwarz: ohne Interimsanschlüsse; blau mit) und daraus resultierender qualitativer Verlauf der Aufpunktemperatur (rot: ohne Interimsanschlüsse; grün mit).

Entscheidend für die tatsächliche Belastbarkeit ist in der Praxis die thermische Vorbelastung des betrachteten Kabels. So können nach einer längeren Schwachlastphase auch unter Einhaltung des 2K-Kriteriums thermische Reserven vorhanden sein, während nach einer längeren Teil- bzw. Starklastphase zur Einhaltung der Genehmigungsauflagen keine Überlastung des Kabels zugelassen werden kann, ggf. wäre die Übertragungskapazität sogar zu verringern.

Die thermische Belastbarkeit der Kabel entspricht nach diesem Planungsgrundsatz nicht der technisch maximal zulässigen Dauerstrom-Belastbarkeit, welche üblicherweise in den Kabeldatenblättern angegeben wird. Im Gegensatz zu dem oben beschriebenen Berechnungsverfahren würde diese dadurch bestimmt, dass bei dauerhaft anliegender Kabelverlustleistung nicht die maximal zulässige Leitertemperatur überschritten wird. Diese liegt für DC-VPE-Kabel bei 70 °C, bei AC-VPE-Kabel bei 90 °C.

Damit existieren faktisch technische Reserven, die aber aufgrund der bestehenden Genehmigungsauflagen (2K-Kriterium) nicht bzw. nur begrenzt für eine temporäre Überlastung genutzt werden können.

### 3 Auswirkungen der Systemgrenzen auf temporäre Anschlüsse

Ausgehend von den beschriebenen zwei wesentlichen, die Leistungsübertragung begrenzenden, Faktoren sind im Falle von temporären Anschlüssen folgende Randbedingungen einzuhalten und entsprechende Möglichkeiten zur Kontrolle der Einspeisung vorzusehen:

1. Eine permanente Limitierung der eingespeisten Leistung auf maximal den Nennwert der HGÜ-Übertragungsleistung zum Schutz der Halbleiterventile, die auch nicht nur kurzzeitig überlastet werden dürfen.
2. Ein Monitoring und ggf. eine Begrenzung der übertragenen Energie zur Einhaltung der genehmigungsrechtlichen Vorgaben hinsichtlich der Erwärmung des Erdbodens.

D.h. im konkreten Fall von temporären Anschlüssen ist ggf. die zulässige eingespeiste Leistung zu begrenzen, um den Umrichter zu schützen bzw. eine unzulässige Erwärmung des Erdbodens zu vermeiden. Mögliche geeignete Maßnahmen, genannt Transmission Capacity Management (TCM), werden nachfolgend erläutert.

## 3.1 Organisatorische Massnahmen

Im Falle eines temporären Anschlusses kann es nominal zu einer Überlastung des NAS kommen. Ob es im konkreten Fall zu einer Überlastung des Systems im Betrieb kommen wird, hängt jedoch wesentlich vom Baufortschritt, der Einspeisebereitschaft der Windturbinen der OWP und dem Winddargebot ab.

Die folgenden Fälle und technischen Lösungsansätze bezüglich der Leistungsreduktion sind zu unterscheiden.

### 3.1.1 Installierte OWP Leistung kleiner/gleich HGÜ Übertragungsleistung

Im frühen Ausbaustadium sowohl der regulär angeschlossenen OWPs als auch der temporären Anschlüsse kann es Fälle geben, in denen die Summe der Nennleistungen der in Betrieb genommenen und einspeisebereiten WEA zusammen kleiner bzw. max. gleich der HGÜ Übertragungsleistung bleibt. In diesem Falle entspricht der Betriebsfall des Systems dem Auslegungsfall, d. h. eine Überlastung der HGÜ ist in keinem Betriebszustand zu keinem Zeitpunkt möglich und es sind keine weiteren technischen Massnahmen notwendig.

Organisatorisch ist jedoch sicherzustellen, dass sowohl von den regulär angeschlossenen OWPs als auch von den Interimsanschlüssen ein verbindlicher, anlagenscharfer und tagesaktueller Inbetriebnahmeplan aller OWPs am betroffenen Netzanschlusssystem im Voraus an TenneT übermittelt wird.

### 3.1.2 Installierte OWP Leistung größer HGÜ Übertragungsleistung (TCM I)

Im weiteren Projektverlauf wird die installierte OWP-Leistung die zur Verfügung stehende HGÜ-Übertragungsleistung nominell übersteigen. Ab diesem Zeitpunkt entspricht der Betriebsfall nicht mehr dem Auslegungsfall und zusätzliche Massnahmen sind zu implementieren um den sicheren ungestörten Betrieb zu garantieren. Es ist sicherzustellen, dass keine Überlastungen der Umrichter auftreten und auch keine Verletzung des 2K-Kriteriums hervorgerufen wird.

Ohne weitere technische Anpassungen ist dies nur möglich, solange gewährleistet wird, dass zu jedem Zeitpunkt gilt:

Einspeisebereite **OWP - Nennleistung** *ist kleiner/gleich* **HGÜ - Nennleistung**.

Dieses lässt sich im ersten Schritt nur durch die **Übermittlung der verbindlichen, anlagenscharfen und tagesaktuellen Verfügbarkeitsmeldungen aller OWPs** am betroffenen NAS organisatorisch realisieren. Analog dem Inbetriebnahmeplan wird so die Information über betriebsbereite installierte Generatorleistung bzw. Anzahl der betriebsbereiten WEAs aller Netzteilnehmer bereitgestellt. Hieraus kann dann die für den Interimsanschluss noch zur Verfügung stehende Kapazität wie folgt ermittelt werden:

$$P_{\text{nenn-interim}} = P_{\text{nenn-HGÜ}} - P_{\text{nenn-reg-betr}}$$

Mit:

- $P_{\text{nenn-temp}}$ : Für den Interimsanschluss zur Verfügung stehende Summe der Nennleistung
- $P_{\text{nenn-HGÜ}}$ : Nennübertragungsleistung der HGÜ
- $P_{\text{nenn-reg-betr}}$ : Summe der Nennleistungen der betriebsbereiten (einspeisebereiten) WEAs des regulären Anschlusses

Praktisch bedeutet dies, dass z.B. für eine nicht verfügbare Anlage mit der Leistung  $P_{\text{nenn-reg-betr}}$  eine gleichgroße WEA des temporären Anschlusses in Betrieb genommen werden kann. Eine Ausnutzung etwaig freier Kapazität im Teillastbereich durch den temporären Anschlussnehmer ist nicht zulässig:

Nur über die Limitierung der Nennleistung am NAS und damit der Erzeugung gemäß Windprofil kann ohne zusätzliche Maßnahmen eine Überschreitung des 2K-Kriteriums sicher ausgeschlossen werden.

TenneT übermittelt die dem Anschlussnehmer am Interimsanschluss zur Verfügung stehende Summe der Nennleistung über vorhandene Schnittstellen. Dieser hat zu jedem Zeitpunkt sicherzustellen, dass die Summe der Nennleistung seiner am NAP angeschlossenen einspeisebereiten Anlagen kleiner oder gleich der zur Verfügung stehenden Kapazität ist.

### 3.2 Optimierung der Kabelauslastung (TCM II)

Eine weitere Optimierung der zu übertragenden Energie lässt sich durch die Ausnutzung der faktisch vorhandenen technischen Reserven der Kabelverbindung erreichen, die aber aufgrund der bestehenden Genehmigungsaufgaben nicht bzw. nur begrenzt für eine temporäre Überlastung genutzt werden können. Durch geeignete Verfahren des Kabelmonitorings und ggf. Anpassung der auslegungstechnischen Grenzwerte könnte so die Energieübertragung im Teillastbereich erhöht werden. Nichtsdestotrotz ist eine kurzzeitige Überlastung des Umrichters zuverlässig auszuschließen. Daher ist bei drohender oder sich abzeichnender Überlastung des Übertragungssystems die Einspeiseleistung des temporär angeschlossenen OWPs ggf. bis auf 0 MW stufenlos zu reduzieren. Ggf. muss die max. Übertragungsleistung der HVDC um einen Sicherheitsfaktor limitiert werden. Die Sollwertvorgabe erfolgt seitens TenneT weiterhin vorzugsweise über vorhandene Schnittstellen.

Die notwendigen Schritte zur Unterstützung des Verfahrens sind nachfolgend dargestellt.

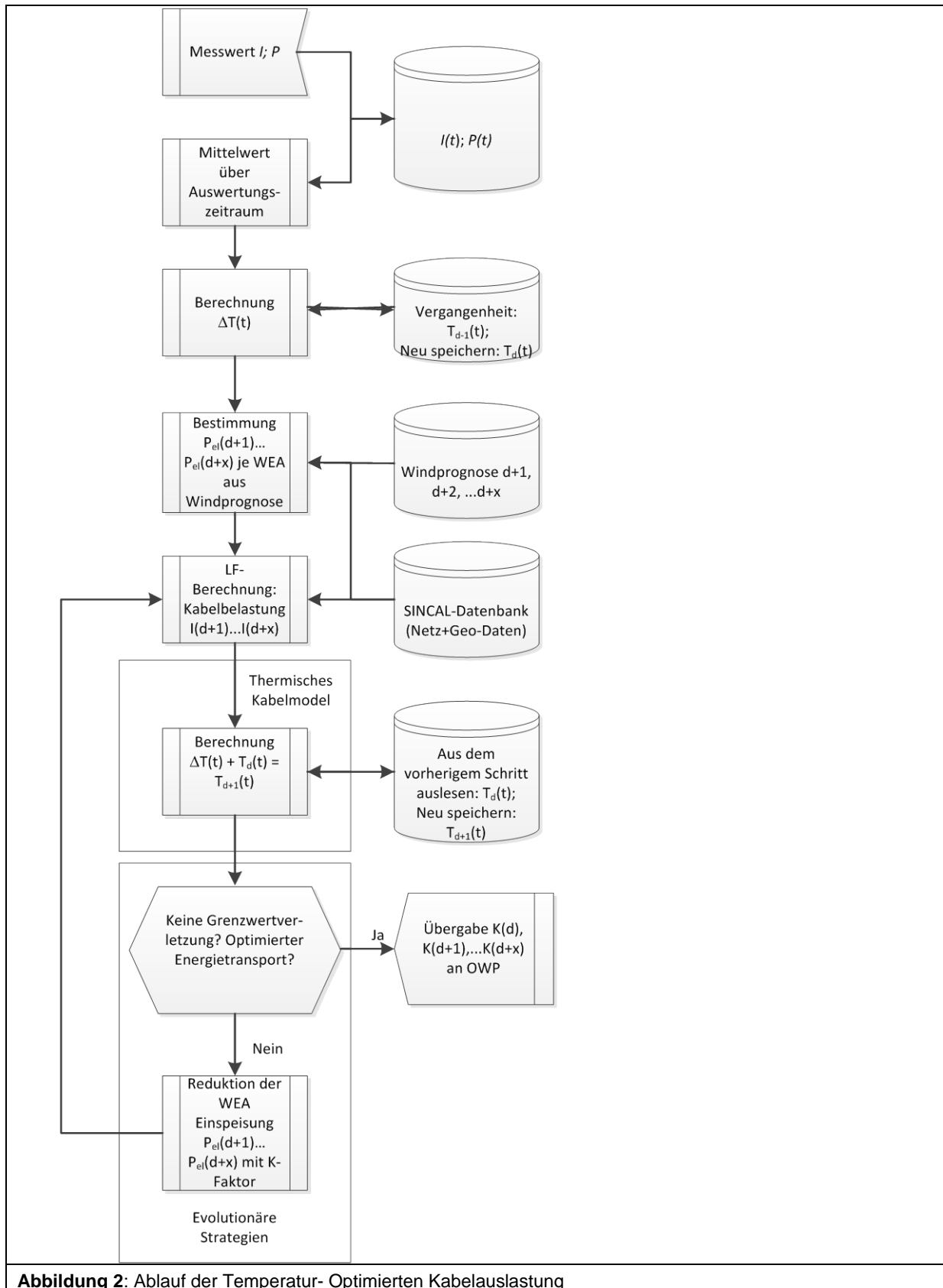
Um die aus der historischen Belastung des Kabels die Aufpunkttemperatur zu bestimmen, werden aus dem vorhandenen Archiv die bekannten Strom bzw. Leistungswerte des OWPs benutzt um die Aufpunkttemperatur zu berechnen. Um den zukünftigen Verlauf der Temperatur berechnen zu können, wird die erwartete Einspeiseleistung aus einer Windprognose und einem Einspeisemodell des OWPs bestimmt. Hierzu ist ein Einspeisemodell entwickelt worden, welches die Leistungsabgabe des Offshore-Windparks aus der Windprognose berechnet unter Berücksichtigung der Wake-Effekte und der:

- Windgeschwindigkeit und -richtung
- Windparkgeometrie
- Eigenschaften / Regelung der eingesetzten WEA

Im zweiten Schritt wird eine stationäre Leistungsflussberechnung (z. B. in PSS SINCAL) durchgeführt um die Berechnung der Verluste unter Berücksichtigung aller eingesetzten Betriebsmittel zu ermitteln. Hierzu zählen im Wesentlichen:

- WEA-Generator
- WEA-Umrichter
- WEA-Maschinentransformator
- 33-kV-Kabelnetz
- OWP-Transformator
- Eigenbedarfsanlagen der WEA und der OWP-Plattform
- Kompensationsanlagen
- ...

Es erfolgt eine Überprüfung der zukünftig erwarteten Aufpunkttemperatur. Wird eine Überschreitung des Grenzwertes von 2K erwartet, erfolgt eine optimierte Reduktion der OWP Einspeisung. Hierfür wird unter Benutzung von evolutionären Strategien ein Reduktionsfaktor K derart bestimmt, dass bei Einhaltung des 2K Kriteriums unter Berücksichtigung des zukünftigen Windaufkommens zu einer maximalen Übertragung der vom OWP erzeugten Energie kommt (siehe Abbildung 2).



**Abbildung 2:** Ablauf der Temperatur- Optimierten Kabelauslastung

### 3.3 Regelung der temporären Anschlussnehmer (TCM III)

Eine Zuregelung der temporär angeschlossenen Anschlussnehmer, auf Grundlage der in den NAR und ASN definierten Anforderungen an Erzeugungsanlagen, kann voraussichtlich realisiert werden. Zwingende Voraussetzung ist jedoch die Einhaltung der Anforderungen hinsichtlich der Anpassung der Wirkleistungsabgabe gemäß 3.3.2 der NAR und 4.6 der ASN. Die entsprechenden **Signale und Reaktionen sind OWP-seitig im Betrieb unverzüglich an die WEAs zu verteilen und hier verzögerungsfrei umzusetzen**. Ergänzend zur NAR und ASN sind in einem solchen Fall auch projektabhängig maximale Änderungsgeschwindigkeiten sowohl für Leistungsabnahme als auch Leistungszunahme definiert, die unter keinen Umständen überschritten werden dürfen.

Für den Fall, dass die Anforderungen nicht erfüllt werden können, muss die max. Übertragungsleistung der HVDC um einen Sicherheitsfaktor limitiert werden. Der Sicherheitsfaktor entspricht einem Regelband der Einspeiseleistung in dem ein Leistungsanstieg bis zur Ausführung einer notwendigen Leistungsreduktion sicher beherrscht werden kann. OWP seitig kann die notwendige Größe des Regelbandes durch Minimierung der Reaktionszeit und eine Vergrößerung des Steigerungswinkels minimiert werden.

## 4 Zusammenfassung

Im Bericht wurden die technischen Einflussfaktoren auf die Übertragungsleistung der NAS dargestellt. Das hinreichende Kriterium für den störungsfreien Betrieb des Offshore-Netzes ist die maximale Einspeiseleistung der OWPs, die maximal gleich oder kleiner der maximalen Übertragungsleistung des NAS, an dem die betreffenden OWPs angeschlossen sind, sein darf.

Temporäre Anschlüsse und Interimsanschlüsse bedeuten den nominellen Betrieb eines Netzanschlusssystems außerhalb seiner Auslegungsparameter. Die wesentlichen, die Leistungsübertragung bestimmenden Parameter, sind daher laufend durch geeignete zusätzliche organisatorische und/oder technische Maßnahmen einzuhalten. Diese Maßnahmen betreffen nicht ausschließlich den Netzbetreiber sondern erfordern die Mitwirkung des Anschlussnehmers. Neben den Austausch der erforderlichen Informationen hat dieser insbesondere die Konformität der einzelnen WEAs, aber auch des gesamten OWPs inkl. eventuell vorhandener übergeordneter Regelungen und Steuerung mit den geltenden NAR und ASN, sowie den zusätzlich vereinbarten Parametern, sicherzustellen. Die ordnungsgemäße Implementierung aller Maßnahmen und die Konformität der Anlagen sind durch den OWP spätestens zur Inbetriebnahme nachzuweisen und werden von TenneT auch während des laufenden Betriebs überprüft.

Um einen Ausfall des Netzanschlusssystems zu verhindern müssen zusätzliche Mechanismen entwickelt werden, mit denen im Falle einer drohenden Überlastung der HGÜ eine schnelle Leistungsreduktion der angeschlossenen Windparks erreicht werden kann. Um diese entwickeln zu können, wird bei TN ein Modell für die Leistungseinspeisung der Windparks erstellt.

Dieses Modell dient hauptsächlich dazu:

1. Der Einsatz von Einspeisemanagement (EISMAN) zu einer Reduzierung der eingespeisten Leistung und somit zu einem wirtschaftlichen Schaden auf Seiten des OWP Betreibers führt. Die Höhe der möglichen erzeugten Leistung muss ermittelt werden, um die Kompensation festzulegen zu können (infeed estimation).
2. Ausgehend vom aktuellen Betriebspunkt des OWPs und der einzelnen Anlagen können durch das Auftreten von Böen ggf. Leistungserhöhungen mit Überschreitung der Nennleistung auftreten. Bei Überschreitung der max. zulässigen Windgeschwindigkeit droht weiterhin auch eine vollständige oder teilweise Abschaltung des Windparks