

# Bewertung der Netzstrukturgüte des Transportnetzes

Dr.-Ing. Klaus von Sengbusch, FGH e.V., Mannheim  
Dr.-Ing. Klaus Engels, RWE Energy AG, Dortmund  
Dipl.-Ing. Christian Krane, RWTH Aachen

## Kurzfassung

In den vergangenen Jahren stand bei Netzbetreibern vor allem die Kostensenkung im Mittelpunkt des Interesses. Forciert durch weiträumige Stromausfälle in den USA und Europa wird heute jedoch auch in Deutschland verstärkt über Mechanismen diskutiert, die ein unangemessenes Absinken der Netzqualität vermeiden. Diese Ansätze setzen jedoch voraus, dass die Netzqualität quantifiziert werden kann. Auf der Verteilungsebene, deren Aufgabe die unterbrechungsfreie Anbindung der Kunden an das überlagerte Transportnetz ist, ist dies durch eine systematische Erfassung von Versorgungsunterbrechungen oder mittels Zuverlässigkeitsberechnungen heute schon möglich. Im Transportnetz gestaltet sich aufgrund der vielschichtigeren Aufgaben eine Objektivierung der Netzqualität wesentlich schwieriger. Unternehmensintern wird diese Frage bei Netzbetreibern bereits intensiv diskutiert. Ein viel versprechender Ansatz scheint hierbei eine weitgehend separate Bewertung des Komponentenzustandes und der Netzstruktur zu sein. Während heute schon vielfältige Methoden zur Quantifizierung des Komponentenzustandes existieren [1, 2], gibt es bisher keinen systematischen Ansatz zur Bewertung der Netzstruktur. In diesem Beitrag wird daher eine Methode zur Quantifizierung der Strukturgüte von Transportnetzen vorgestellt.

## 1 Einleitung

Vor dem Hintergrund zu erwartender Regulierung und damit einhergehend erhöhtem Kostendruck gewinnt die Qualität elektrischer Netze als Gegenpol zu Kostensenkungsmaßnahmen für den Netzbetreiber zunehmend an Bedeutung.

Grundsätzlich soll unter Qualität eines Netzes hier der Erfüllungsgrad seiner Aufgaben verstanden werden. Basierend auf dieser Definition umfasst der Qualitätsbegriff im Transportnetz mehr Aspekte als die Zuverlässigkeit und die Spannungsqualität. Insbesondere die zentrale Aufgabe des Transportnetzes, Energie weiträumig zu übertragen, muss in die Qualitätsbewertung einbezogen werden.

Im Folgenden wird daher eine Methode vorgestellt, mit deren Hilfe eine objektive Bewertung der Qualität von Transportnetzen in Form einer einfach handhabbaren Kennzahl möglich wird. Mit Hilfe dieser Qualitätskennzahl können ebenfalls Netzausbau- und Instandhaltungsmaßnahmen bewertet und priorisiert werden.

## 2 Ermittlung einer Qualitätskennzahl

Im europäischen Verbundnetz überlagern sich lokale Bedürfnisse von Großkraftwerken, unterlagerten Weiterverteilern oder direkt angeschlossenen Großabnehmern mit Anforderungen des weiträumigen Stromhandels (Bereitstellung von Übertragungskapazität) sowie der allgemeinen Systemsicherheit (z.B.

Stabilität, strukturelle Netzredundanz und Stellung von Leistungsreserve).

Dieser Beitrag konzentriert sich auf eine Bewertung der Netzstruktur. Die speziellen lokalen Bedürfnisse einzelner Kunden werden daher nicht weiter betrachtet. Ebenfalls ausgegrenzt werden Stabilitätsprobleme, die – zumindest im UCTE-Netz – derzeit keine bindenden Grenzen bei der Stromübertragung darstellen. Um den Erfüllungsgrad der übrigen Aufgaben zu quantifizieren, ist es zunächst erforderlich, das Verhalten der Kunden und des umgebenden Netzes in geeigneter Form nachzubilden (Abschnitt 2.1). Im weiteren Verlauf wird die nach den jeweiligen Bedürfnissen erfolgende Nutzung des Netzes (auch durch benachbarte Netze) allgemein als „Kundenverhalten“ bezeichnet.

Anschließend kann im Rahmen einer Simulation bewertet werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Belastungszustand des Netzes zu keiner Verletzung von Belastungsgrenzen der Betriebsmittel führt. In manchen Netzzuständen sind möglicherweise Eingriffe der Netzbetriebsführung (u.a. Umschaltungen, Änderungen der Kraftwerkseinspeisungen, Abbruch von Wartungsmaßnahmen) erforderlich, um einen sicheren Netzbetrieb zu gewährleisten.

Die Qualitätskennzahl Strukturgüte gibt folglich auch die Wahrscheinlichkeit aller Netzzustände an, in denen nach einem planungsrelevanten Ausfall Belastungsgrenzen nicht verletzt werden.

Mit dieser Definition ist keine direkte Aussage über die Zuverlässigkeit des Transportnetzes verbunden. Für eine derartige Bewertung müssten Maßnahmen und Regeln der Betriebsführung – beispielsweise die

zulässige Dauer eines nicht (n-1)-sicheren Systemzustandes – detailliert nachgebildet werden. Aufgrund der langjährigen Betriebserfahrung kann aber davon ausgegangen werden, dass die Beherrschbarkeit der derzeit planungsrelevanten Ausfälle in Kombination mit aktuellen Regeln der Betriebsführung zu einer ausreichenden Netzzuverlässigkeit führt.

## 2.1 Nachbildung des Kundenverhaltens

Grundsätzlich soll sich die Übertragungskapazität des Transportnetzes am Bedarf orientieren, um kostenintensive Überdimensionierungen zu vermeiden. Bei der Nachbildung des Kundenverhaltens ist es daher wünschenswert, Netzbelastungen zu ermitteln, die sich ohne Berücksichtigung von Netzrestriktionen wie beispielsweise Auktionen von Übertragungskapazitäten ergeben.

Um solche Netzbelastungen exakt nachbilden zu können, wäre ein vollständiges Marktmodell erforderlich. Da die verfügbaren Marktmodelle die Realität aber nur stark vereinfacht abbilden, deren Parametrierung kompliziert ist und sich bereits durch geringfügige Kosten für Übertragungskapazitäten an einzelnen Grenzen erhebliche Verschiebungen zwischen Erzeugungsstandorten einstellen, wird dieser Ansatz nicht weiter verfolgt.

Stattdessen werden Kundenmodelle verwendet, die auf Basis historischer Zeitreihen objektiv parametrisiert werden können.

- **Realitätsnahe Nachbildung des Kundenverhaltens**

Mit der separaten Nachbildung jeder einzelnen Übergabestelle im Kundenmodell lassen sich mittels historischer Zeitreihen realitätsnahe Modelle parametrieren. In Simulationen können damit Schwachstellen im derzeitigen Netz ausgewiesen werden.

Wesentlicher Nachteil einer separaten Betrachtung aller Übergabestellen ist der große Aufwand, der für die Parametrierung sowie für eine Berücksichtigung möglicher zukünftiger Entwicklungen betrieben werden muss.

- **Einheitliches Kundenverhalten**

Bei einer einheitlichen Nachbildung aller Übergabestellen oder zumindest verschiedener Arten von Übergabestellen gestaltet sich die Parametrierung der Modelle wesentlich einfacher. Außerdem können einheitliche Modelle verwendet werden, um unterschiedliche Netzbereiche über Benchmarks direkt miteinander zu vergleichen. Diese Vorteile bleiben auch erhalten, wenn kein vollständig korreliertes Verhalten der Kunden unterstellt wird.

Nachteil dieses Ansatzes ist, dass insbesondere weiträumige Energieübertragungen oft aus unter-

schiedlichen Rahmenbedingungen oder Erzeugungsstrukturen in einzelnen Netzregionen resultieren, die sich nur bedingt mit einheitlichen Modellen erfassen lassen.

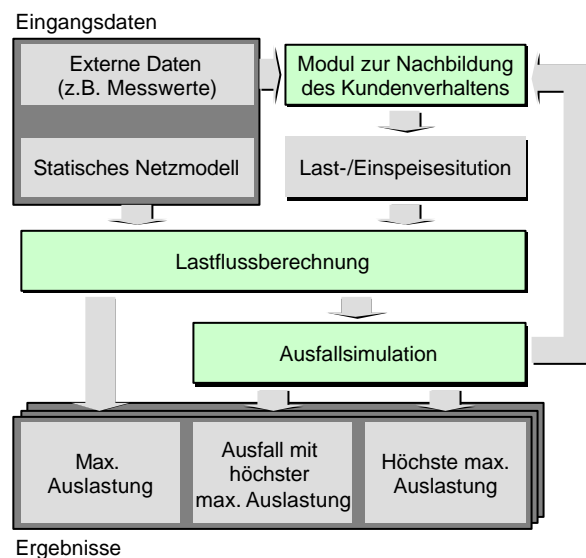
Bei den hier vorgestellten Untersuchungen werden zwei realitätsnahe und zwei einheitliche Kundenmodelle getestet. Durch einen Vergleich der Ergebnisse können Rückschlüsse auf eine geeignete Nachbildung des Kundenverhaltens gezogen werden.

## 2.2 Simulationsverfahren

Zur Quantifizierung der Qualitätskennzahl wird eine probabilistische Lastflussberechnung auf Basis einer Monte-Carlo-Simulation verwendet. In jedem Durchlauf wird zunächst von einem austauschbaren Modell zur Nachbildung des Kundenverhaltens eine Last-/Einspeisesituation eingestellt. Die Last-/Einspeisesituation wird innerhalb des Modells auf Basis von Zufallszahlen berechnet. Anschließend wird eine Lastflussberechnung durchgeführt, bei der die erforderliche Leistungsbilanzierung zwischen externem und internem Netz nach einem vorgegebenen Schlüssel durchgeführt wird (In der vorliegenden Untersuchung wurden 80% des Leistungsdefizits bzw. -überschusses vom externen Netz und 20% von Spitzenlastkraftwerken im internen Netz ausgeglichen.). Abschließend bewertet eine Ausfallsimulation (möglicherweise) kritische Ausfälle.

Als Ergebnis jedes Simulationsdurchlaufs werden

- die höchste Belastung eines Betriebsmittels im Grundlastfall,
- der Komponentenausfall, der zur höchsten Belastung führt (kritischer Ausfall) sowie
- die in diesem Fall auftretende höchste Belastung gespeichert (Bild 1).



**Bild 1** Ablauf der Simulationsrechnungen

Die im Rahmen dieser Untersuchung zur Nachbildung des Kundenverhaltens verwendeten Modelle werden in Abschnitt 3.1 detailliert vorgestellt.

### 3 Exemplarische Untersuchungen

Bei den exemplarischen Untersuchungen wird ein repräsentativer Ausschnitt des deutschen 380/220-kV-Netzes betrachtet. Aus diesem Gebiet wurden für alle Übergabestellen reale Wirk- und Blindleistungsmesswerte im Stundenraster für 1 Jahr bereitgestellt (insgesamt ca. 3 Mio. Messwerte) und in vier verschiedene Arten von Übergabestellen kategorisiert:

- Abspannungen von der 380/220-kV-Ebene auf die 110-kV-Ebene (ABS),
- Kraftwerkseinspeisungen (Grundlastkraftwerke (GKW) und andere Einspeisungen (ES))
- Industriekunden (IK) und
- Kuppelleitungen zu umgebenden Netzbereichen (KPL)

Die Messwerte der einzelnen Übergabestellen bilden die Basis für die Parametrierung der unterschiedlichen Kundenmodelle.

#### 3.1 Modelle zur Nachbildung des Kundenverhaltens

Um die Güte verschiedener Modelle zur Nachbildung des Kundenverhaltens zu bewerten, muss zunächst eine Vergleichsbasis festgelegt werden. Für diese Untersuchungen wurde dazu ein Modell entwickelt, das die Vergangenheit exakt nachbildet (**Referenzmodell**). In 200 Simulationsdurchläufen wurde dann jeweils ein zufällig ausgewählter konsistenter Satz von Messwerten den entsprechenden Übergabestellen in einem Planungsdatensatz zugeordnet.

Die Ergebnisse, die bei der Nutzung dieses Modells durch das in Abschnitt 2.2 beschriebene Simulationsverfahren berechnet wurden, werden im Folgenden als Referenzergebnis bezeichnet.

Diesem Referenzergebnis werden in Abschnitt 3.2 Ergebnisse gegenübergestellt, die mit anderen Kundenmodellen ermittelt wurden. Eine Vorstellung der verwendeten Kundenmodelle geschieht in den folgenden Abschnitten 3.1.1 bis 3.1.3.

##### 3.1.1 Kundenmodell mit einheitlichen Verteilungen

Bei diesem Modell wird an allen Übergabestellen aus den Ganglinien der Messwerte der Erwartungswert und die Standardabweichung von Wirk- und Blindleistungsfluss bestimmt. Anschließend werden durch

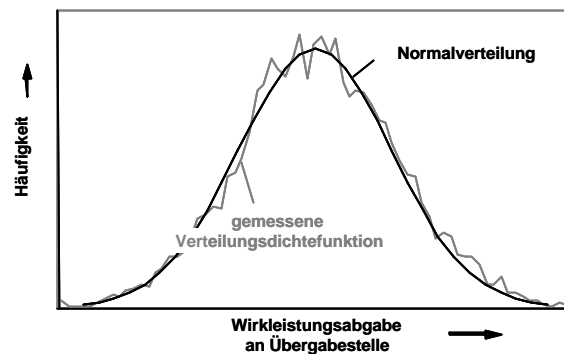
Ziehung normalverteilter, unkorrelierter Zufallszahlen die Wirk- und Blindleistungsflüsse an allen Übergabestationen eingestellt.

Wesentlicher Vorteil dieses Modells ist die einfache Anwendbarkeit. Allerdings kann eine Vernachlässigung

- der Form der realen Verteilung der Messwerte und
- der Korrelationen zwischen dem Verhalten einzelner Kunden

zu Ungenauigkeiten führen.

Eine Analyse der realen Verteilungen zeigt, dass bei den meisten Übergabestellen die Normalverteilung eine durchaus gute Approximation darstellt (Bild 2).



**Bild 2** Verteilung der Wirkleistungsmesswerte einer repräsentativen Übergabestelle

Durch weitere Analysen konnte nachgewiesen werden, dass eine genauere Nachbildung zu keiner nennenswerten Verbesserung der Ergebnisse führt.

##### 3.1.2 Berücksichtigung einheitlicher Korrelationen

Um realitätsnähere Ergebnisse zu erzielen, müssen auch Korrelationen zwischen einzelnen Kunden und Einspeisungen berücksichtigt werden. Hier wird zunächst ein einfach anwendbares Modell getestet. Dabei werden aus realen Ganglinien mittlere Korrelationen zwischen den einzelnen Arten von Übergabestellen ermittelt (Tabelle 1).

	GKW	ES	IK&ABS	KPL
GKW	0,0	0,0	0,1	0,0
ES	0,0	0,3	0,3	0,0
IK&ABS	0,1	0,3	0,4	0,0
KPL	0,0	0,0	0,0	0,0

**Tabelle 1** Mittlere Korrelationen des Kundenverhaltens an den Übergabestellen

Auf Basis dieser mittleren Korrelationen werden  $\alpha$ -neut normalverteilte Zufallszahlen für Wirk- und Blindleistungsflüsse ( $\vec{F}$ ) mit gleichem Erwartungs-

wert und gleicher Standardabweichung wie im Referenzmodell ermittelt.

Die Berechnung der korrelierten Zufallszahlen erfolgt auf Basis des in [3] beschriebenen Verfahrens:

$$F = L(A) \cdot \vec{n} \cdot \vec{s} + \vec{\mu}$$

mit

$L(A)$ : L-Matrix der LR-Zerlegung der Korrelationsmatrix  $A$

$\vec{n}$ : Vektor mit unkorrelierten normalverteilten Zufallszahlen

$\vec{s}$ : Standardabweichungen der Wirk- und Blindleistungsflüsse aller Kunden

$\vec{\mu}$ : Mittelwerte der Wirk- und Blindleistungsflüsse aller Kunden

Problematisch bei diesem Modell ist, dass die sehr uneinheitlichen Korrelationen zwischen Kuppelleitungen und einzelnen Kraftwerken und Verbrauchern durch die Mittelwertbildung nur unzureichend berücksichtigt werden.

### 3.1.3 Berücksichtigung realer Korrelationen

In einem weiteren Kundenmodell wird daher auf Basis der Messwerte eine vollständige Korrelationsmatrix der (Wirk-)Leistungsflüsse aller Übergabestellen berechnet. Mittels dieser Matrix werden erneut normalverteilte Zufallszahlen ermittelt.

Zur Berechnung der korrelierten normalverteilten Zufallszahlen wird - wie im vorherigen Kundenmodell - das in [3] beschriebene Verfahren verwendet. Da die reale Korrelationsmatrix des betrachteten Netzbereichs nicht positiv definit ist, wird zusätzlich noch ein Verfahren der semidefiniten Programmierung [4] eingesetzt, um eine für die LR-Zerlegung geeignete Matrix zu erlangen.

Wenn bei diesem Modell auch die höchste Genauigkeit zu erwarten ist, so bleibt doch festzuhalten, dass der Datenerhebungs- und Modellierungsaufwand erheblich ist.

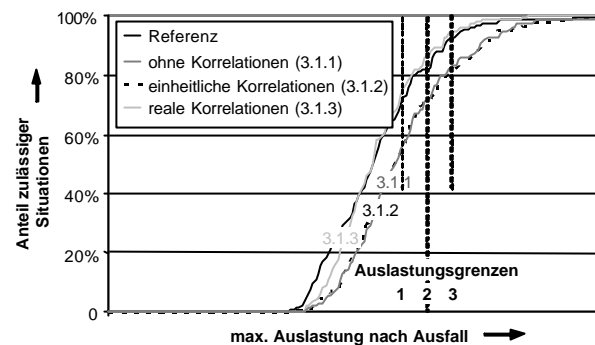
## 3.2 Ergebnisvergleich

Im Folgenden werden die Ergebnisse hinsichtlich

- der maximalen Belastungen, die sich nach kritischen Ausfällen ergeben (Abschnitt 3.2.1), und
- der Komponenten, deren Ausfall zur jeweils maximalen Belastung führt (Abschnitt 3.2.2), verglichen und bewertet.

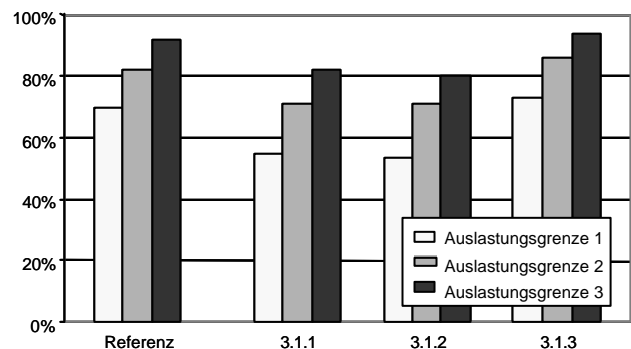
### 3.2.1 Maximale Betriebsmittelbelastung nach einem kritischen Ausfall

In jedem Simulationsdurchlauf wird die maximale Belastung nach einem kritischen Ausfall (vgl. Abschnitt 3.2.2) bestimmt. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden jeweils 200 Simulationsdurchläufe mit allen Kundenmodellen durchgeführt, so dass insgesamt 800 Werte für einen Ergebnisvergleich zur Verfügung stehen. Da die einzelnen Simulationsdurchläufe unabhängig voneinander sind, können die Ergebnisse in Form einer Verteilungsfunktion geordnet dargestellt werden (Bild 3).



**Bild 3** Verteilungsfunktionen der maximalen Belastungen nach kritischem Ausfall

Es ist zu erkennen, dass sich bei allen Berechnungen ein ähnlicher Bereich ergibt, in dem sich die maximale Belastung nach einem kritischen Ausfall einstellt. Der Abstand der Verteilungsfunktionen zu der des Referenzergebnisses ist jedoch unterschiedlich. Gleiches gilt für die Qualitätskennzahl, die sich nach Festlegung einer maximal zulässigen Belastung direkt auf der Ordinate ablesen lässt. Bild 4 zeigt die Qualitätskennzahlen  $Q_S$  (Index  $S$  für Strukturgüte), die sich bei den drei in Bild 3 dargestellten Belastungsgrenzen ergeben.



**Bild 4** Qualitätskennzahl  $Q_S$  in Abhängigkeit von Kundenmodell und Belastungsgrenze

Deutlich ist der Abstand der Verteilungsfunktionen und damit auch der Unterschied der resultierenden Qualitätskennzahlen nur bei Vernachlässigung (vgl.



testet. Alle Modelle wurden mittels realer, historischer Zeitreihen parametrisiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass für die Ermittlung einer validen Qualitätskennzahl bei allen Übergabestellen eine Normalverteilung von Wirk- und Blindleistungsflüssen angenommen werden darf, Korrelationen zwischen den Flüssen an den einzelnen Übergabestellen aber berücksichtigt werden müssen.

Insgesamt zeigt sich, dass die probabilistische Nachbildung des Kundenverhaltens einer – in der heutigen Planungspraxis üblichen – deterministischen deutlich überlegen ist, um die Nutzung des Netzes realistisch nachzubilden.

Die Bandbreite an Betriebsmitteln, deren Ausfall zu kritischen Netzzuständen führt und die sich bei der Simulation historischer Netzzustände ergab, kann mit allen getesteten Modellen zur Nachbildung des Kundenverhaltens in ähnlicher Form ermittelt werden.

Damit existiert eine plausible und eingängige Qualitätskennzahl, mit der die Struktur des Transportnetzes beschrieben werden kann, um nicht zuletzt einen Bewertungsmaßstab zu haben, der Kostensenkungen entgegen gehalten werden kann.

Darüber hinaus erlauben die Ergebnisse eine Priorisierung von Betriebsmitteln, die insbesondere zur Optimierung der Instandhaltung verwendet werden kann.

## 5 Literatur

- [1] Balzer, G.; Montebaur, A.: Zuverlässigkeitsorientierte Instandhaltung am Beispiel eines regionalen Netzbetreibers, Konferenz-Einzelbericht: ETG-Fachberichte, Band 92 (2003), Seite 67-71
- [2] Junglas, K.-J.; Haschke, J.; Vennegeerts, H.: Effiziente Instandhaltungsplanung, Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Band 50 (2000), Heft 3, Seite 164-169
- [3] Frühwirth, R.; Regler, M.: Monte-Carlo-Methoden, Bibliographisches Institut AG, Zürich 1983, ISBN 3-411-01657-4
- [4] Gosh, S.; Henderson, S.: Chessboard Distributions and Random Vectors with Specified Marginals and Covariance Matrix, University of Michigan, Ann Arbor 2000