

## **Bericht zur Bestimmung der Qualitätselemente 2021 bis 2023**

Anlage zu den Festlegungen

Bund:	BK8-20/00003-A
OL Berlin:	BK8-20/00004-A
OL Brandenburg:	BK8-20/00005-A
OL Bremen:	BK8-20/00006-A
OL Schleswig-Holstein:	BK8-20/00007-A

Stand: 14.10.2020

## Inhalt

1	Vorbemerkung .....	1
2	Datengrundlage .....	2
3	Kennzahlen zur Beschreibung der Netzzuverlässigkeit.....	5
4	Gebietsstrukturelle Unterschiede .....	7
5	Statistische Analyse .....	11
5.1	Grundlegung .....	11
5.2	Explorative Datenanalyse .....	12
5.3	Geschlossene Referenzfunktionen.....	17
5.4	Einfluss der Lastdichte auf die Netzzuverlässigkeit der Niederspannung.....	18
5.4.1	Einfluss der Anschlussdichte auf die Netzzuverlässigkeit der Niederspannung	20
5.4.2	Einfluss der Letztverbraucherichte auf Netzzuverlässigkeit der Niederspannung	20
5.4.3	Einfluss der Lastdichte auf die Netzzuverlässigkeit der Mittelspannung .....	21
5.4.4	Einfluss der Anschlussdichte auf die Netzzuverlässigkeit der Mittelspannung.	22
5.4.5	Multivariate Analysen Mittelspannung.....	23
5.4.6	Zwischenfazit .....	25
6	Robustheit des gewählten Modells .....	27
7	Zusammenfassung.....	30
7.1	Referenzwert für die Mittelspannungsebene .....	30
7.2	Referenzwert für die Niederspannungsebene .....	30
8	Literaturverzeichnis .....	31
A	Sonstige Einflussfaktoren auf die Netzzuverlässigkeit der Mittelspannung.....	33

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 4-1: Erwartete Funktionsverläufe und Wertebereiche ausgewählter Modelle. ....	10
Tabelle 5-1: Regressionsergebnis SAIDI, Lastdichte NS. ....	19
Tabelle 5-2: Regressionsergebnis SAIDI, Anschlussdichte NS.....	20
Tabelle 5-3: Regressionsergebnis SAIDI, Letztverbraucherdichte NS.....	21
Tabelle 5-4: Ergebnisse geschlossene Referenzfunktion ASIDI und MS-Lastdichte.....	21
Tabelle 5-5: Ergebnis der geschlossenen Referenzfunktion ASIDI, Anschlussdichte Mittelspannung. ....	23
Tabelle 5-6: Korrelationskoeffizienten als Ergebnis der Korrelationsanalyse.....	24
Tabelle 5-7: Ergebnis des multivariaten Zusammenhangs ASIDI, Lastdichte (x), und Verkabelungsgrad (z) Mittelspannung. ....	25
Tabelle 6-1: Schätzwerte der Koeffizienten zur Robustheitsanalyse.....	28
Tabelle 7-1: Erwartete Funktionsverläufe und Wertebereiche ausgewählter Modelle bei Berücksichtigung endogener Strukturgrößen.....	33
Tabelle 7-2: Koeffizienten und Statistik verschiedener Modelle der Mittelspannung.....	34

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 5-1: Bivariater Zusammenhang SAIDI und Lastdichte, gewichtet mit der Letztverbraucheranzahl. ....	13
Abbildung 5-3: Bivariater Zusammenhang SAIDI und Anschlussdichte, gewichtet mit den Letztverbrauchern.....	14
Abbildung 5-4: Bivariater Zusammenhang SAIDI und Letztverbraucherichte, gewichtet mit den Letztverbrauchern.....	15
Abbildung 5-4: Bivariater Zusammenhang ASIDI und Lastdichte, gewichtet mit den Letztverbrauchern.....	15
Abbildung 5-6: Bivariater Zusammenhang ASIDI und Anschlussdichte, gewichtet mit den Letztverbrauchern.....	16
Abbildung 5-7: Bivariater Zusammenhang ASIDI und Scheinleistungsdichte, gewichtet mit den Letztverbrauchern.....	17
Abbildung 5-8: Grafische Darstellung zum Regressionsergebnis SAIDI, Lastdichte der Niederspannung.....	19
Abbildung 5-9: Grafische Darstellung zum Regressionsergebnis ASIDI, Lastdichte der Mittelspannung.....	22
Abbildung 5-10: Grafische Darstellung zum Regressionsergebnis ASIDI, Anschlussdichte der Mittelspannung.....	23
Abbildung 6-1: Ergebnisse der Regressionen für Robustheitsanalyse.....	29
Abbildung 7-1: Bivariater Zusammenhang ASIDI und Jahreshöchstlast je Stromkreislänge, gewichtet mit den Letztverbrauchern.....	35
Abbildung 7-2: Bivariater Zusammenhang ASIDI und Anzahl der Anschlusspunkte (LV & nachgelagerte eigene Umspannenenen MS/NS) je Stromkreislänge, gewichtet mit den Letztverbrauchern.....	35
Abbildung 7-3: Bivariater Zusammenhang ASIDI und Bemessungsscheinleistung (LVT & ONT) je Stromkreislänge, gewichtet mit den Letztverbrauchern.....	36

## **1 Vorbemerkung**

Dieser Bericht beschreibt die Bestimmung der Methodik für die Ermittlung der Qualitätselemente hinsichtlich der Netzzuverlässigkeit von Elektrizitätsverteilernetzen in den Kalenderjahren 2021 bis 2023.

Die einzelnen, individuellen Qualitätselemente werden ab dem Kalenderjahr 2021 unter Berücksichtigung jährlich aktualisierter Daten, d. h. jeweils zum 01.01. des folgenden Kalenderjahres festgelegt (rollierende Anpassung). Die hier beschriebene Methodik sowie die Auswahl der Parameter zur Abbildung der relevanten gebietsstrukturellen Unterschiede werden für die Qualitätselemente bis einschließlich zu dem Kalenderjahr 2023 festgehalten.

## 2 Datengrundlage

Den Analysen werden Daten aus den Kalenderjahren 2017, 2018 und 2019 zugrunde gelegt. Aufgrund der Festlegung BK 8-20/00001-A vom 26.02.2020 wurden für die Mittel- und Niederspannungsebenen Strukturparameter zur Beschreibung gebietsstruktureller Unterschiede sowie Kenngrößen zur Beschreibung der Netzzuverlässigkeit erhoben.<sup>1</sup> Aufgrund der Maßnahmen zur Eindämmung des Corona-Virus wurde die ursprüngliche Frist zur Übermittlung der Daten vom 30.04.2020 auf den 29.05.2020 verschoben.<sup>2</sup>

Unter Beteiligung der betroffenen Netzbetreiber, der zuständigen (Landes-) Regulierungsbehörden und weiterer Stellen hat die Bundesnetzagentur die im Zusammenhang mit der Festlegung BK 8-20/00001-A vom 26.02.2020 übermittelten Daten verschiedenen Plausibilitätskontrollen unterzogen.<sup>3</sup> Nach einer ersten Vollzähligkeits- und Vollständigkeitsprüfung verglich die Bundesnetzagentur die Daten netzbetreiberindividuell mit vorliegenden Daten aus anderweitig erhobenen Abfragen, bspw. aus den vorausgegangenen Erhebungen zur Bestimmung der Qualitätselemente oder Effizienzwerte. Ebenso führte sie einen Abgleich mit Datenmeldungen zu den Versorgungsunterbrechungen nach § 52 EnWG der Jahre 2017, 2018 und 2019 durch. Neben dem Abgleich der Daten waren auch Logik- und Kennzahlenprüfungen Teil des Plausibilisierungsprozesses, der sich insgesamt über den Zeitraum vom 29.05.2020 bis zum 30.09.2020 erstreckt hat. Die Plausibilisierung endete mit der Übermittlung einer Datenquittung. Bis zum 30.09.2020 erhielten die Netzbetreiber den von ihnen zuletzt übermittelten – und aus Sicht der Bundesnetzagentur plausiblen – Datensatz mit der Aufforderung, diesen einer abschließenden Prüfung zu unterziehen und ggf. letzte Änderungen oder Korrekturen am Datensatz der Bundesnetzagentur mitzuteilen. Ab dem 05.10.2020 lag eine valide Datengrundlage vor, welche für die folgenden Analysen verwendet wurde.

Die Datengrundlage umfasst Daten von 202 Nieder- und Mittelspannungsnetzen, für die in der dritten Regulierungsperiode eine Genehmigung zur Teilnahme am vereinfachten Verfahren nach § 24 Abs. 4 ARegV nicht vorliegt oder bei denen es sich nicht um geschlossene Verteilernetze im Sinne des § 110 EnWG handelt. Von der überwiegenden Anzahl der Nieder- und Mit-

---

<sup>1</sup> Vgl. BK8-20-00001-A, 26.02.2020.

<sup>2</sup> Vgl. [https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Service-Funktionen/Beschlusskammern/BK08/BK8\\_01\\_Aktuell/BK8\\_Aktuell\\_node.html](https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Service-Funktionen/Beschlusskammern/BK08/BK8_01_Aktuell/BK8_Aktuell_node.html) (letzter Abruf am 30.09.2020).

<sup>3</sup> Beispielsweise: Deutscher Wetterdienst, Landes- und Kommunalämter oder Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes.

telspannungsnetze liegen die nach BK 8-20/00001-A angeforderten Daten für die drei Kalenderjahre 2017, 2018 und 2019 vollständig vor. Lediglich in einem Fall wird zwar die Mittel-, nicht aber die Niederspannungsebene betrieben. Bei 6 Nieder- und Mittelspannungsnetzen konnten die betroffenen Betreiber keine Daten für drei Kalenderjahren übermitteln. Die in Rede stehenden Netze gingen aus Netzübergängen hervor. Die Daten aus Vorjahren zu diesen Netzen sind somit in aller Regel noch in den Daten der abgebenden Netzbetreiber enthalten.

Entsprechend der o. g Festlegung. BK 8-20/00001-A vom 26.02.2020 werden folgende Strukturgrößen untersucht:

- Installierte Bemessungsscheinleistungen der Ortsnetz- und Letztverbrauchertransformatoren in MVA;
- Anzahl der direkt an das betrachtete Nieder- (NS) bzw. Mittelspannungsnetz (MS) angeschlossenen Letztverbraucher sowie die Anzahl der Letztverbraucher, die an den Umspannebenen Mittel- zu Niederspannung (MS/NS) und Hoch- zu Mittelspannung direkt angeschlossen (HS/MS) sind;
- Geografische sowie versorgte Fläche in km<sup>2</sup>;
- Zeitgleiche Jahreshöchstlasten aller Entnahmen sowie die zeitgleichen Jahreshöchstlasten abzüglich der Entnahmen von fremden Netzbetreibern, die an die gleiche Netzebene angeschlossen sind in kW;
- Stromkreislängen, differenziert nach Kabel- und Freileitungen in km;
- Anzahl der Anschlusspunkte, differenziert nach Anzahl der Anschlusspunkte an Letztverbraucher, Straßenbeleuchtungen, Netzen auf gleicher Netzebene und nachgelagerten MS/NS-Umspannebenen.

Darüber hinaus konnten aus den Daten zu den Versorgungsunterbrechungen bzw. zur Netzzuverlässigkeit der

- Average System Interruption Duration Index (ASIDI) für die Mittelspannungsebenen und
- System Average Interruption Duration Index (SAIDI) für die Niederspannungsnetzebene

ermittelt werden. Hierzu waren die Kundenminuten in min und Bemessungsscheinleitungsminuten in MV Amin zu übermitteln.



### 3 Kennzahlen zur Beschreibung der Netzzuverlässigkeit

Für die Bewertung der Netzzuverlässigkeit sind nach § 20 Abs. 1 ARegV Kennzahlen festzulegen. Hierzu eignen sich insbesondere die Dauer von sowie die Häufigkeit der Unterbrechung der Energieversorgung. Entsprechend der Vorschrift kann eine Kombination und Gewichtung dieser Kennzahlen vorgenommen werden. Für die ausgewählten Kennzahlen sind Kennzahlenwerte für die einzelnen Nieder- bzw. Mittelspannungsnetze zu ermitteln. Dabei werden Versorgungsunterbrechungen verwendet, die den Störungsanlässen:

- atmosphärische Einwirkung
- Einwirkung Dritter
- Zuständigkeitsbereich des Netzbetreibers/kein erkennbarer Anlass
- sonstiges (geplante/angekündigte Versorgungsunterbrechungen)

zuzuordnen sind. Vorgaben zur Erfassung von Versorgungsunterbrechungen sind der Allgemeinverfügung mit dem Az. 605/8135 vom 22.02.2006 zu entnehmen.<sup>4</sup>

Des Weiteren werden Gewichtungen vorgenommen. Mit dem Faktor 1 werden Versorgungsunterbrechungen – bzw. aus diesen gebildeten Kennzahlenwerte – gewichtet, die den Störungsanlässen atmosphärische Einwirkung, Einwirkung Dritter und Zuständigkeitsbereich des Netzbetreibers/kein erkennbarer Anlass zugeordnet wurden. Mit dem Faktor  $\frac{1}{2}$  werden Versorgungsunterbrechungen gewichtet, die dem Störungsanlass Sonstiges (geplante/angekündigte) Versorgungsunterbrechungen zugeordnet wurden.

Wie in Abschnitt 2 (Datengrundlage) beschrieben, werden für die Nieder- und die Mittelspannungsebene unterschiedliche Kennzahlen verwendet. Für die Niederspannungsebene ist dies der System Average Interruption Duration Index (*SAIDI*) und für die Mittelspannungsebene der Average System Interruption Duration Index (*ASIDI*). Beide Kennzahlen sind entsprechend der Formel (1) und Formel (2) definiert.<sup>5</sup> Sie geben die durchschnittliche Nichtverfügbarkeit je Letztverbraucher (in der Niederspannungsebene) bzw. der durchschnittlichen Nichtverfügbarkeit je Einheit Bemessungsscheinleistung (in der Mittelspannung) an und bilden sich aus der Kombination aus Dauer und Häufigkeit der Unterbrechung der Energieversorgung.

---

<sup>4</sup> Vgl. Az. 605/8135, 22.02.2006.

<sup>5</sup> Vgl. IEEE Standard 1366-2012, 15.11.2012.

$$SAIDI = \frac{\sum r_i \cdot N_i}{N_T} \quad (1)$$

$$ASIDI = \frac{\sum r_i \cdot L_i}{T_i} \quad (2)$$

Mit:

$r_i$	Dauer [min] der Versorgungsunterbrechung i
$N_i$	Anzahl der von der Versorgungsunterbrechung i in der Niederspannungsebene unterbrochenen Letztverbraucher
$N_T$	Anzahl der an der Niederspannungsebene angeschlossenen Letztverbraucher
$L_i$	Summe der durch die Versorgungsunterbrechung i unterbrochenen Bemessungsscheinleistung [MVA] der Orts- und Letztverbrauchertransformatoren in der Mittelspannungsebenen
$L_T$	Summe der installierten Bemessungsscheinleistung [MVA] von Orts- und Letztverbrauchertransformatoren in der Mittelspannungsebenen.

## 4 Gebietsstrukturelle Unterschiede

§ 20 Abs. 2 ARegV legt fest, dass bei der Ermittlung von Kennzahlvorgaben (Referenzwerten) gebietsstrukturelle Unterschiede zu berücksichtigen sind. Bereits im Ausgangsgutachten wurde untersucht und beschrieben, wie eine solche Berücksichtigung erfolgen kann.<sup>6</sup> Die darin gefundenen Zusammenhänge zwischen der Netzzuverlässigkeit und den Gebietsstrukturgrößen sowie die daraus abzuleitenden Ergebnisse wurden im aktuellen Gutachten zum Qualitätselement (Stand: Januar 2020) von der E-Bridge Consulting GmbH et al. aufgegriffen und grundsätzlich bestätigt.<sup>7</sup> Dieses Gutachten ist neben den vorausgegangenen Gutachten zur Qualitätsregulierung auf der Homepage der Bundesnetzagentur veröffentlicht.<sup>8</sup> Demnach ist der Quotient aus den Strukturgrößen zeitgleiche Jahreshöchstlast [kW] und Fläche [km<sup>2</sup>], die Lastdichte [kW/km<sup>2</sup>] am besten geeignet, die gebietsstrukturelle Unterschiede abzubilden.<sup>9</sup> Aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht ist die Lastdichte allen weiteren Strukturparametern gegenüber vorzugswürdig, um gebietsstrukturelle Unterschiede im Sinne der o. g. Vorschrift zu berücksichtigen.<sup>10</sup> Dies wird u. a. damit begründet, dass die anzuschließende Leistung maßgeblich den Ausbau der Netze bestimmt. Auch die Anzahl und indirekt die Länge der Netzabgänge wird durch die anschließende Leistung determiniert. Dies gilt solange, wie sich die Last nicht auf sehr wenige Letztverbraucher mit einer ungleich hohen Anschlussleistung konzentriert. Der formale Zusammenhang zur Erklärung der Netzzuverlässigkeitskennzahlenwerte durch die Lastdichte ist mittels eines hyperbolischen Verlaufs gegeben.<sup>11</sup> Dieser ist mit der Formel (3) wiedergegeben.

$$\hat{y} = f(x) = a + \frac{b}{x^c} \quad (3)$$

Mit:

- |           |   |
|-----------|---|
| $y$       | Zu erklärende Variable, Erwartungswerte für die Zuverlässigkeitskennzahl, Referenzwert. |
| $a, b, c$ | Zu schätzende Regressionskoeffizienten.   |
| $x$       | Erklärende Variable, beobachteter Strukturparameter (z. B. Lastdichte).                 |

---

<sup>6</sup> Vgl. Consentec Consulting für Energiewirtschaft und -technik GmbH u.a. (2010) S. 52 ff.

<sup>7</sup> Vgl. E-Bridge Consulting GmbH u.a. (2020) S. 46, 95.

<sup>8</sup> Vgl. <https://www.bundesnetzagentur.de> → Elektrizität und Gas → Netzentgelte Strom → Qualitätselement.

<sup>9</sup> Vgl. E-Bridge Consulting GmbH u.a. (2020) S. 99.

<sup>10</sup> Vgl. Consentec Consulting für Energiewirtschaft und -technik GmbH u.a. (2010) S. 61.

<sup>11</sup> Vgl. E-Bridge Consulting GmbH u.a. (2020) S. 50.

Dem zu schätzenden Exponenten  $c$  kommt dabei aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht eine besondere Rolle zu; er sollte idealerweise Werte im Bereich zwischen 0,5 und 1 annehmen.<sup>12</sup> Für die Koeffizienten  $a$  und  $b$  gilt die Restriktion, dass diese nur Werte größer 0 annehmen können.

Bisher wurden die Qualitätselemente– zumindest im Fall der Mittelspannung – unter Berücksichtigung der Lastdichte als Merkmal zur Beschreibung der gebietsstrukturellen Besonderheiten festgelegt.

Als weiterer potenzieller Parameter zur Abbildung gebietsstruktureller Unterschiede ist die Anschlussdichte ingenieurwissenschaftlich begründet.<sup>13</sup> Die Anschlussdichte [ $1/\text{km}^2$ ] ist definiert als das Verhältnis aus der Anzahl von Anschlusspunkten und Fläche [ $\text{km}^2$ ]. Für die Mittelspannung ist die Anzahl der Anschlusspunkte von Letztverbrauchern und der Anzahl der Anschlusspunkte an eigene Stationen additiv zu verwenden.<sup>14</sup> Im Fall der Niederspannung werden nur die Anschlusspunkte von Letztverbrauchern herangezogen. Auch der Zusammenhang aus Anschlussdichte als erklärende Variable  $x$  und den Werten der Zuverlässigkeit als zu erklärende Variable  $y = f(x)$  folgt einem hyperbolischen Verlauf (vgl. Formel (3)). Der Wertebereich des Exponenten  $c$  liegt dabei zwischen -0,5 und 0,5. Hinsichtlich der Koeffizienten  $a$  und  $b$  gelten die für die Lastdichte aufgestellten Restriktionen, d. h. diese dürfen nur positive Werte annehmen.

Last- und Anschlussdichte zeichnen sich insbesondere durch ihren exogenen Charakter aus. Weitgehend endogene potenzielle Einflussvariablen wie der Verkabelungsgrad, die Scheinleistungsdichte sowie auf die Stromkreislänge bezogene Kennzahlen sind bei der Bestimmung von Qualitätselementen grundsätzlich auszublenden.<sup>15</sup> Sie sind selbst dann nicht zu berücksichtigen, wenn ein hoher Erklärungsgrad für die Netzzuverlässigkeit nachweisbar sein sollte.<sup>16</sup> Die Abbildung von Struktureinflüssen hebt auf die Versorgungsgebiete und ihre Strukturmerkmale ab, denen jedoch jeder Netzbetreiber gleichermaßen ausgesetzt ist. Qualitätselemente sollen

---

<sup>12</sup> Vgl. Consentec Consulting für Energiewirtschaft und -technik GmbH u.a. (2010) S. 61; E-Bridge Consulting GmbH u.a. (2020) S. 40.

<sup>13</sup> Vgl. Consentec Consulting für Energiewirtschaft und -technik GmbH u.a. (2010) S. 55.

<sup>14</sup> Vgl. Consentec GmbH (2017) S. 40; E-Bridge Consulting GmbH u.a. (2020) S. 45.

<sup>15</sup> Vgl. Consentec Consulting für Energiewirtschaft und -technik GmbH u.a. (2010) S. 47.

<sup>16</sup> Vgl. Consentec GmbH (2017) S. 13.

gerade nicht die Wirkungen der für die Netzzuverlässigkeit relevanten Entscheidungen abbilden, sondern nur die durch äußere Einflüsse bedingten Niveauunterschiede reflektieren.<sup>17</sup> Des Weiteren sind Verzerrungen potenzieller exogener Einflussvariablen durch das Berücksichtigen endogener Faktoren nicht auszuschließen.<sup>18</sup> Aus informatorischen Gründen werden diese Parameter dennoch betrachtet.

Aus der aktuellen Datenerhebung können weitere potenzielle Parameter wie die Elementarlast [1/kW], Anzahl der Letztverbraucher je Anschluss) gebildet und deren Einfluss auf die Zuverlässigkeit überprüft werden. Bei diesen potenziellen Parametern besteht jedoch bereits ein hoher Zusammenhang mit der Last- bzw. Anschlussdichte. Im Rahmen der Analysen des E-Bridge-Gutachtens 2020 wurden weitere Variablen hinsichtlich ihrer Eignung untersucht (bspw. Einfluss der Erzeugungsleistungsdichte, Zersiedelung oder erneuerbaren Energien). Dabei konnten jedoch keine plausiblen oder im Vergleich zur Lastdichte verbesserten Ergebnisse erzielt werden. Für andere vom Gutachter untersuchte potenzielle Einflussgrößen wäre eine weitergehende Datenerhebung erforderlich gewesen, wobei nicht sichergestellt werden konnte, dass die erforderlichen Daten im gegebenen Zeitrahmen von den betroffenen Netzbetreibern hätten ermittelt werden können. Insofern wurde auf die Erhebung der entsprechenden Strukturgrößen verzichtet.

Tabelle 4-1 fasst die zu analysierenden Einflussgrößen und die sich aus ingenieurwissenschaftlichen Analysen abgeleiteten Annahmen hinsichtlich der funktionalen Zusammenhänge und Wertebereiche zusammen.<sup>19</sup> Sie dienen als Blaupause zur Überprüfung anhand der statistischen Analysen. Zu beachten ist, dass die angegebenen Wertebereiche für  $c$  nicht als harte Grenzwerte zu verstehen sind und auch nicht unmittelbar als quantitativer Maßstab für die Interpretation der Koeffizienten heranzuziehen sind.<sup>20</sup>

---

<sup>17</sup> Vgl. OLG Düsseldorf, Beschluss v. 26.02.2020, Az. VI-3 Kart 75/17 [V].

<sup>18</sup> Vgl. Consentec Consulting für Energiewirtschaft und -technik GmbH u.a. (2010) S. 52.

<sup>19</sup> Vgl. Consentec GmbH (2017) S. 18.

<sup>20</sup> Vgl. E-Bridge Consulting GmbH u.a. (2020) S. 73.

<i><b>Strukturparameter</b></i>	<i><b>Plausibler Funktionsverlauf</b></i>	<i><b>Wertebereich der Koeffizienten <math>a</math> und <math>b</math></b></i>	<i><b>Wertebereich des Exponenten <math>c</math></b></i>
Lastdichte	Hyperbolisch	Nicht negativ	0,5 bis 1
Anschlussdichte	Hyperbolisch	Nicht negativ	-0,5 bis 0,5
Letztverbraucherdichte	Hyperbolisch	Nicht negativ	-0,5 bis 1
Bemessungsscheinleistungsdichte	Hyperbolisch	Nicht negativ	0,5 bis 1

Tabelle 4-1: Erwartete Funktionsverläufe und Wertebereiche ausgewählter Modelle.<sup>21</sup>

Neben diesen auf die geografische Fläche (Mittelspannung) bzw. versorgte Fläche (Niederspannung) bezogenen Strukturparameter werden auch Strukturgrößen analysiert, die sich auf die Stromkreislänge beziehen. Dies ist auf einzelne Stellungnahmen zur Festlegung der Datenerhebung zurückzuführen, die die Analyse dieser Einflussgrößen forderten. Deshalb werden sie aus informatorischen Gründen analysiert. Aus regulatorischer Sicht sind endogene Strukturparameter jedoch grundsätzlich nicht anzuwenden.<sup>22</sup>

<sup>21</sup> Vgl. Consentec GmbH (2017) S. 18.

<sup>22</sup> Vgl. E-Bridge Consulting GmbH u.a. (2020) S. 43.

## 5 Statistische Analyse

### 5.1 Grundlegung

Das Ziel der statistischen Analyse besteht in der Bestätigung ingenieurwissenschaftlich festgestellter, funktionaler Zusammenhänge zwischen der Netzzuverlässigkeit, repräsentiert durch die SAIDI- bzw. ASIDI-Werte, und Strukturparametern zur Beschreibung gebietsstruktureller Merkmale. Hierzu sind die ingenieurwissenschaftlich hergeleiteten Modellansätze zu berücksichtigen, die sowohl im Ausgangsgutachten als auch im aktuellen Gutachten der E-Bridge Consulting GmbH et al. beschrieben sind.<sup>23</sup> Basis der statistischen Analysen sind die Datenmeldungen, die aufgrund der Festlegung BK8-20-00001-A abgefragt und plausibilisiert wurden. Die Ergebnisse der statistischen Analyse können gegenüber den ingenieurwissenschaftlichen Überlegungen abweichen. Ursächlich hierfür sind bspw. Überlagerungen der betrachteten Einflüsse, Stochastik der SAIDI- bzw. ASIDI-Werte in Abhängigkeit von Strukturparametern (z. B. Lastdichte), nicht beobachtbare Einflüsse oder die Interpretation komplexer Funktionsverläufe.<sup>24</sup>

Die im weiteren Verlauf dargestellte Vorgehensweise orientiert sich am Gutachten der E-Bridge Consulting GmbH et al. vom 10.01.2020.<sup>25</sup> Demzufolge ist im ersten Schritt eine explorative Datenanalyse bivariater Zusammenhänge durchzuführen (vgl. Abschnitt 5.2). Anschließend sind mittels Regressionsanalyse geschlossen-funktionale Zusammenhänge zu bestimmen. Die Koeffizienten (a, b und c) werden dabei regressionsanalytisch geschätzt (vgl. Abschnitt 5.3). Danach erfolgt anhand der gefundenen funktionalen Zusammenhänge die Modellauswahl. Die Referenzwerte sind aus dem geeignetsten Modell abzuleiten. Der Einfluss atypischer Beobachtungen auf die Stabilität der Ergebnisse wird abschließend anhand von Robustheitsanalysen bewertet (vgl. Abschnitt 6).

In Teilen weicht diese Vorgehensweise von der Praxis ab, wie sie die Bundesnetzagentur in den bisherigen Verfahren zur Bestimmung der Qualitätselemente angewandt hat. Insbesondere betrifft dies den Kolmogorow-Smirnow-Test (KS-Test) zur Überprüfung von Unterschieden der SADI- bzw. ASIDI-Werte bei verschiedenen Ausprägungen der Strukturparameter. Das aktu-

---

<sup>23</sup> Vgl. Consentec Consulting für Energiewirtschaft und -technik GmbH u.a. (2010) S. 50 ff.; E-Bridge Consulting GmbH u.a. (2020) S. 40 ff.

<sup>24</sup> Vgl. E-Bridge Consulting GmbH u.a. (2020) S. 62.

<sup>25</sup> Vgl. E-Bridge Consulting GmbH u.a. (2020) S. 73 ff.

elle Gutachten der E-Bridge Consulting GmbH et al. bewertet den KS-Test methodisch als willkürlich gewählt und in seiner Anwendung zu restriktiv.<sup>26</sup> Dem aktuellen Gutachten folgend, werden stattdessen nun die explorativen Datenanalysen eingesetzt (vgl. Abschnitt 5.2). Die Regressionsanalysen folgen demgegenüber der bisherigen Praxis. Ebenfalls neu aufgenommen wird die konkrete Beschreibung der Robustheitsanalyse.

## 5.2 Explorative Datenanalyse

Die erste Stufe der Analyse beinhaltet eine explorative Datenanalyse lokaler Polynomfunktionen ersten, zweiten oder dritten Grades, welche sich abschnittsweise an die jeweils zu untersuchenden Größen anpassen. Dadurch können monotone, d. h. durchgehend monotone Einflüsse der erklärenden Variable (bspw. die Lastdichte) auf die Werte der SAIDI- bzw. ASIDI-Werte untersucht werden. Für die hier dargestellten Modelle wird eine Gewichtung vorgenommen. Im Fall der Niederspannung wird die Anzahl der Letztverbraucher der Niederspannungsebene und der Umspannebene Mittel- zu Niederspannung als Gewichtungsfaktor verwendet. Bei der Mittelspannung wird die Anzahl der Letztverbraucher aus beiden Netzebenen (Nieder- und Mittelspannung) sowie aus den beiden Umspannebenen Hoch- zu Mittelspannung sowie Mittel- zu Niederspannung verwendet. Diese Vorgehensweise dient einerseits der Skalierung und anderseits der Forderung des § 20 Abs. 2 ARegV nach einer gewichteten Betrachtungsweise.

Wie bereits ausgeführt, haben die ingenieurwissenschaftlichen Untersuchungen, insbesondere bei den Dichteparametern,<sup>27</sup> hyperbolische Zusammenhänge ergeben. Die Ergebnisse der explorativen Analysen sind für die Netzzuverlässigkeitskennzahlen (ASIDI- bzw. SAIDI-Werte), welche gegen die potenziellen Einflussfaktoren (bspw. Lastdichte) der Nieder- bzw. Mittelspannung aufgetragen wurden, in den folgenden Abbildung 5-1 bis Abbildung 5-6 dargestellt. Die erwarteten hyperbolischen Verläufe sind insbesondere in der Niederspannung nicht immer klar erkennbar. Dieser Befund bestätigt die gewonnenen Erkenntnisse aus den vorangegangenen Bestimmungen von Qualitätselementen. Auch die Verfasser der verschiedenen Gutachten zum Qualitätselement gelangten in ihren Untersuchungen stets zu dem Schluss, dass belastbare Zusammenhänge der SAIDI-Werte und der Dichteparameter (oder anderer Strukturparameter) nicht in jedem Fall nachweisbar sind.<sup>28</sup>

---

<sup>26</sup> Vgl. E-Bridge Consulting GmbH u.a. (2020) S. 73.

<sup>27</sup> Dichteparameter sind Verhältnisse aus Strukturgrößen, welche auf die Fläche bezogen.

<sup>28</sup> Vgl. Consentec GmbH (2017) S. 29; E-Bridge Consulting GmbH u.a. (2020) S. 59 ff.



### ***Ergebnisse der Einflussfaktoren und Netzzuverlässigkeitskennzahlen der Niederspannung***

Abbildung 5-1 zeigt das Ergebnis der explorativen Datenanalyse für das Modell „Lastdichte“, um einen durchgängigen Einfluss auf die SAIDI-Werte abschätzen zu können. Das Modell ist mit der Anzahl der Letztverbraucher der Niederspannungsebene und der MS-/NS-Umspannebene gewichtet. Der Verlauf ist mit den Ergebnissen des Gutachtens vergleichbar.<sup>29</sup> Ein systematischer Zusammenhang zwischen der Lastdichte und den SAIDI-Werten ist nicht erkennbar. Die Werte der Netzzuverlässigkeitskennzahl SAIDI weisen innerhalb einer vergleichsweise schmalen Bandbreite von rd. 0,5 bis 8 min/a eine hohe Streuung auf. In Teilbereichen ist ein sinkender bzw. steigender Verlauf der Netzzuverlässigkeitskennzahlen zu beobachten (vgl. rote Regressionslinie in der Punktwolke der Abbildung 5-1). Somit liegen mehrere Wendepunkte über dem gesamten Wertebereich der Lastdichtewerte vor, so dass nicht von einem durchgängig monotonen Einfluss der Lastdichtewerte ausgegangen werden kann. Darüber hinaus ist – wie bereits erwähnt – der Wertebereich der Netzzuverlässigkeitskennzahlen pro Jahr sehr gering. Die hier dargestellten Beobachtungen sind mit denen der bisher ermittelten Qualitätselemente sowie den Erkenntnissen aus dem E-Bridge-Gutachten vergleichbar.<sup>30</sup>

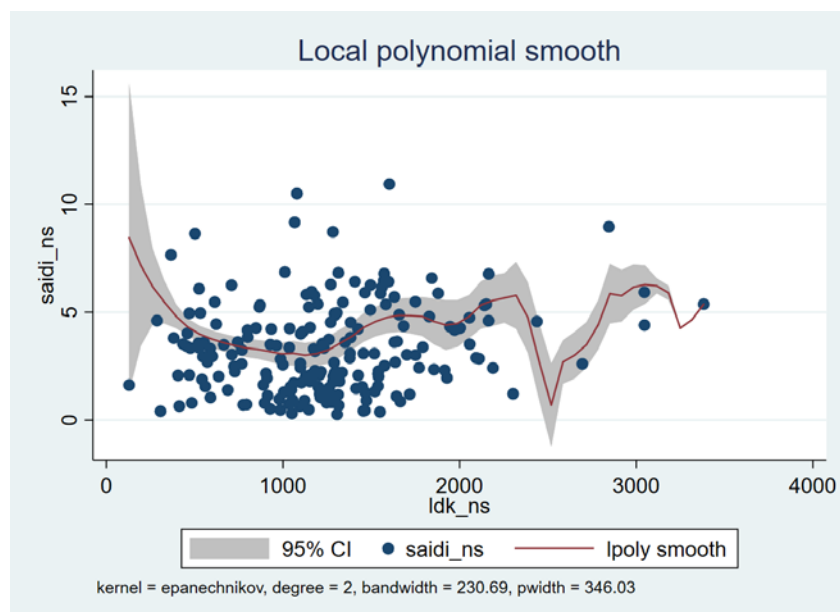


Abbildung 5-1: Bivariater Zusammenhang SAIDI und Lastdichte, gewichtet mit der Letztverbraucheranzahl.

<sup>29</sup> Vgl. E-Bridge Consulting GmbH u.a. (2020) S. 76.

<sup>30</sup> Vgl. E-Bridge Consulting GmbH u.a. (2020) S. 124; Consentec GmbH (2017) S. 25-29; Consentec Consulting für Energiewirtschaft und -technik GmbH u.a. (2010) S. 136-137.

Auch für die Anschlussdichte ergibt sich kein erkennbarer systematischer Einfluss auf die Netzzuverlässigkeit der Niederspannung. Der bivariate Zusammenhang aus Netzzuverlässigkeitskennzahlen SAIDI und der Anschlussdichte NS ist der Abbildung 5-2 dargestellt.

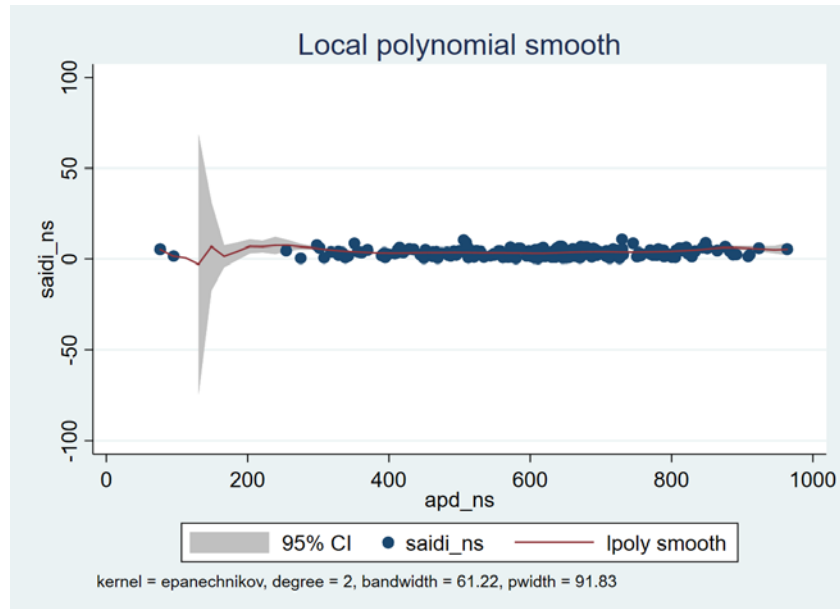


Abbildung 5-2: Bivariater Zusammenhang SAIDI und Anschlussdichte, gewichtet mit den Letztverbrauchern.

Gleiches gilt für die Analyse des bivariaten Zusammenhangs aus Letztverbraucherichte und den Zuverlässigkeitskennzahlen (SAIDI) sind abwechselnd leicht sinkende bzw. leicht steigende Verläufe zu beobachten (vgl. Abbildung 5-3). Diese sind jedoch weniger ausgeprägt als bei der Lastdichte. Wie in Abbildung 5-3 zu erkennen ist, gibt es über dem gesamten Wertebereich der Letztverbraucherichte mehrere Wendepunkte, so dass auch hier nicht von einem durchgängig monotonen Einfluss der Letztverbraucherichte ausgegangen werden kann.

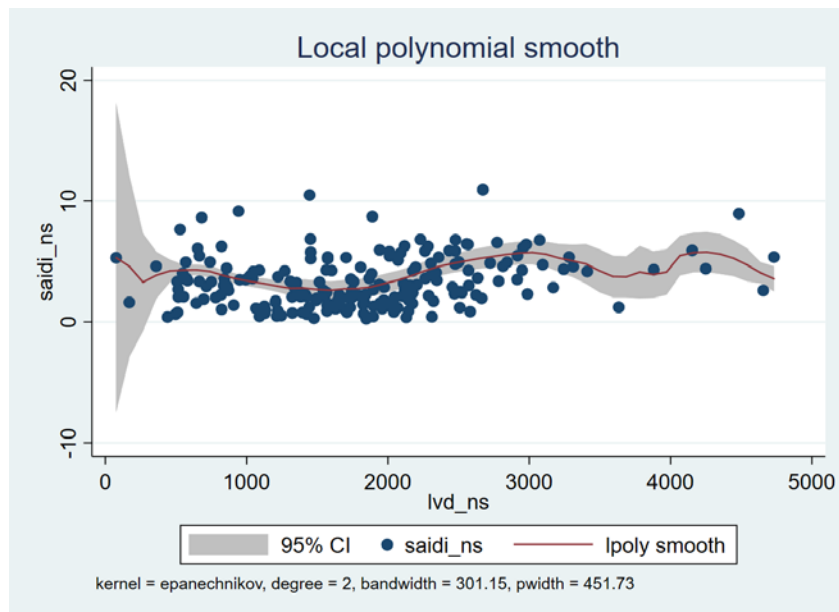


Abbildung 5-3: Bivariater Zusammenhang SAIDI und Letztverbraucherichte, gewichtet mit den Letztverbrauchern.

### ***Ergebnisse der Einflussfaktoren und Netzzuverlässigkeitskennzahlen der Mittelspannung***

Der durch ingenieurwissenschaftliche Modellüberlegungen gefundene und auch in der Vergangenheit mehrfach nachgewiesene hyperbolische Verlauf kann im Ergebnis der explorativen Datenanalyse für die Lastdichte in der Mittelspannung grundsätzlich bestätigt werden, wie die Abbildung 5-4 zeigt. Die dargestellten Konfidenzintervalle zeigen eine vergleichsweise geringe Streuung der Schätzung, insbesondere im Wertebereich bis 500 kW/km<sup>2</sup>.

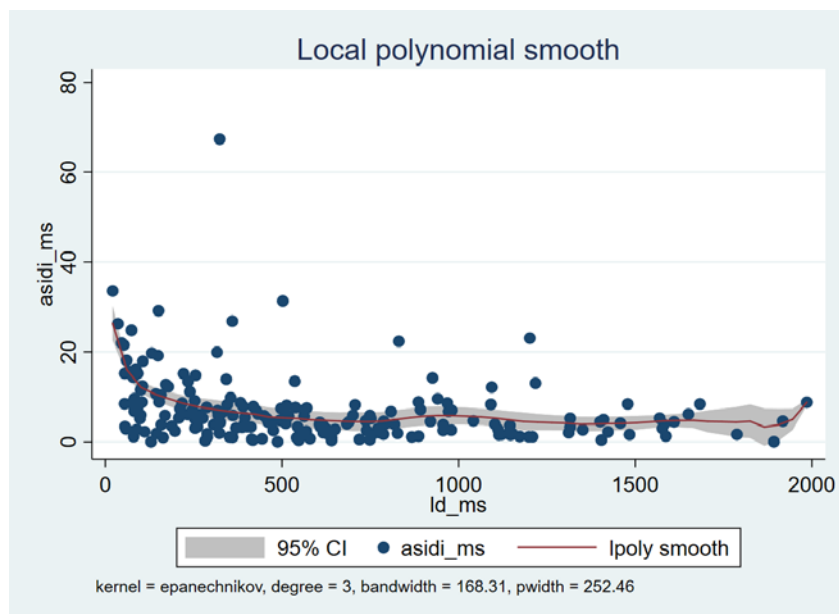


Abbildung 5-4: Bivariater Zusammenhang ASIDI und Lastdichte, gewichtet mit den Letztverbrauchern.

Bis zu einer Lastdichte von ca. 500 kW/km<sup>2</sup> sind tendenziell fallende ASIDI-Werte zu beobachten. Darüber hinaus treten eher geringe Schwankungen in den ASIDI-Werten auf. Der Wertebereich der Lastdichte ist wegen einer besseren Übersichtlichkeit in der Abbildung bis 2500 kW dargestellt, da nur wenige Datenpunkte größer waren. Der Parameter ist somit Gegenstand der weiteren Analysen.

Für die Anschlussdichte ist ebenfalls ein systematischer Einfluss auf die Netzzuverlässigkeit der Mittelspannung erkennbar, wie Abbildung 5-5 zeigt. Im Bereich kleiner (Anschluss-) Dichtewerte sind fallende ASIDI-Werte zu beobachten, allerdings nicht so deutlich ausgeprägt wie im Fall der Lastdichte.

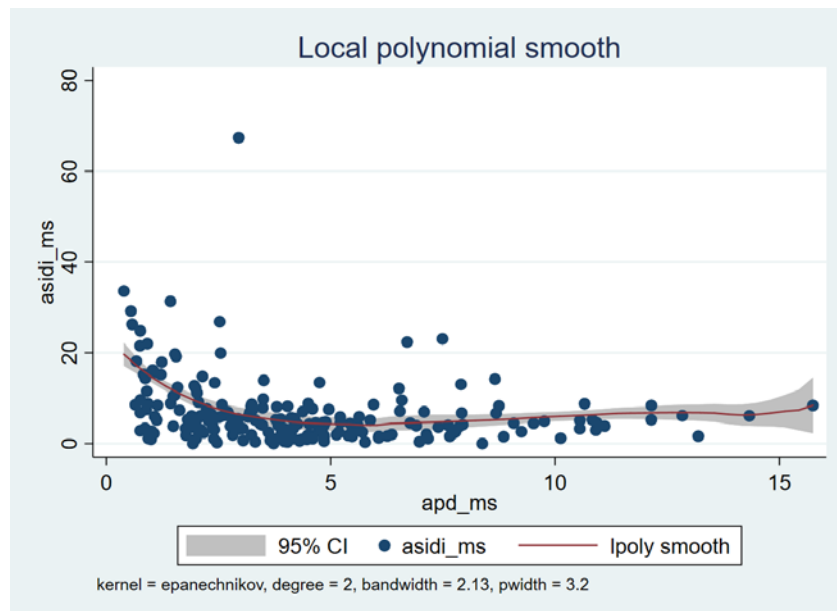


Abbildung 5-5: Bivariater Zusammenhang ASIDI und Anschlussdichte, gewichtet mit den Letztverbrauchern.

Für die Scheinleistungsdichte ist – der Last- und Anschlussdichte vergleichbar – ebenfalls ein systematischer Einfluss auf die Netzzuverlässigkeit der Mittelspannung erkennbar, wie Abbildung 5-6 zeigt. Aus regulatorischen Erwägungen ist dieser Strukturparameter aufgrund seiner endogenen Merkmale nachrangig für die Ermittlung von Referenzwerten zu sehen.<sup>31</sup> Zudem korreliert die Bemessungsscheinleistung deutlich mit der zeitgleichen Jahreshöchstlast, sodass bereits eine (lineare) Abhängigkeit der Größen besteht.

<sup>31</sup> Vgl. Consentec GmbH (2017) S. 42.

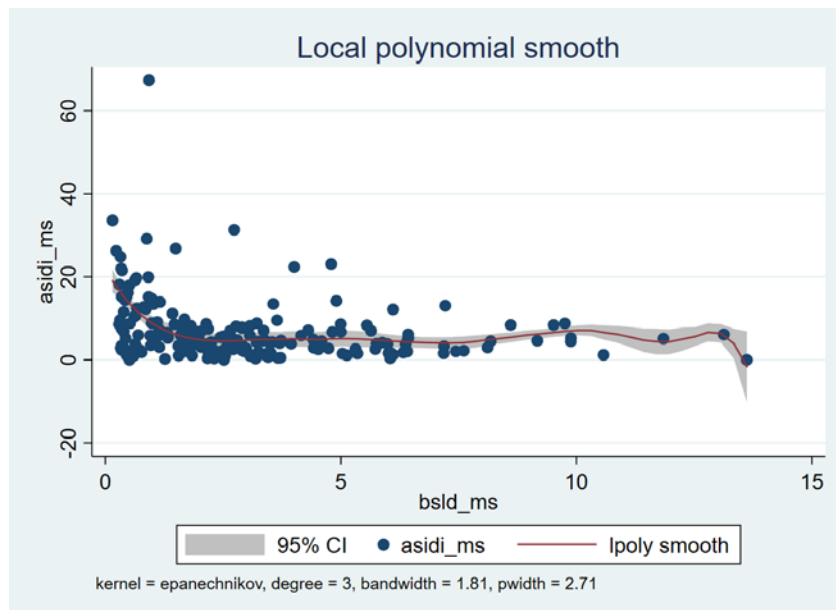


Abbildung 5-6: Bivariater Zusammenhang ASIDI und Scheinleistungsdichte, gewichtet mit den Letztverbrauchern.

### ***Zwischenfazit zur explorativen Datenanalyse bivariater Zusammenhänge***

Aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht wurden Last- und Anschlussdichte als geeignete Parameter zur Erklärung der Netzzuverlässigkeit beschrieben wobei die Lastdichte als besonders geeignet angesehen wurde.

In der Niederspannungsebene ist auf Basis einer explorativen Datenanalyse von bivariaten Zusammenhängen kein plausibler Zusammenhang mit der Netzzuverlässigkeit nachweisbar.

Im Fall der Mittelspannungsebene konnte eine explorative Datenanalyse die Strukturparameter Last- und Anschlussdichte als erklärende Variablen Zusammenhänge mit der Netzzuverlässigkeit identifizieren, deren Verlauf ingenieurwissenschaftlichen Modellüberlegungen entspricht. Der hyperbolische Zusammenhang wurde somit bestätigt. Im Rahmen der Regressionsanalysen sind nun die Referenzfunktionen zu bestimmen und weiter zu analysieren.

### **5.3 Geschlossene Referenzfunktionen**

Aufgrund der zuvor beschriebenen Überlegungen und durchgeführten Analysen werden die nachfolgend zu schätzenden Referenzfunktionen unter der Annahme hyperbolischer Zusammenhänge zwischen dem erklärenden Struktureinfluss und der Netzzuverlässigkeit geschätzt (vgl. Formel (3)).<sup>32</sup> Zu schätzen sind die darin enthaltenen Regressionskoeffizienten  $a$  und  $b$

<sup>32</sup> Vgl. Consentec Consulting für Energiewirtschaft und -technik GmbH u.a. (2010) S. 61-62.

sowie der Regressionsexponent  $c$ . Auf die Verwendung von Jahresniveaukontrollen über eine Variable „Dummy\_Jahr“ wird dabei verzichtet. Im Hinblick auf die Erstellung des Gutachtens war dies bedeutsam, um möglicherweise gemeinsam vorhandene, aber nicht beobachtbare Einflüsse auf das Gesamtzuverlässigkeitsniveau zu identifizieren.<sup>33</sup> Für die Gewichtung wurden verschiedene Parameter getestet. Dargestellt sind jeweils aber nur die mit der Anzahl der Letztverbraucher gewichteten Modelle. Als Gewichtungsfaktor für die Niederspannung wird die Summe aus der Anzahl der Letztverbraucher der NS-Netzebene und der Letztverbraucheranzahl der Umspannebene MS/NS dargestellt. Für die Mittelspannung ist die Summe aus der Letztverbraucheranzahl der NS- und MS-Netzebene sowie der Umspannebenen MS/NS und HS/MS dargestellt.

Auch Modelle mit anderen Gewichtungsgrößen als der Anzahl der Letztverbraucher wären grundsätzlich vorstellbar. Gewichtungsgrößen sollen den Umfang der Versorgungsaufgabe reflektieren. Bislang wurde hierzu ausschließlich die Anzahl der Letztverbraucher verwendet. Auch von den Verfassern der Gutachten wird dies empfohlen, da zwischen der Gewichtungsgröße und dem Monetarisierungsfaktor ein enger Zusammenhang besteht.<sup>34</sup> Um das Ziel ein in Summe erlösneutrales Qualitätselement zu erreichen, muss die Gewichtungsgröße mit der Bezugsgröße des Monetarisierungsfaktors übereinstimmen. Aus diesem Grund wird auf die Darstellung von Modellen mit anderen Gewichtungsgrößen als der Anzahl der Letztverbraucher verzichtet. Im Übrigen haben diese Modelle auch keinen höheren Erklärungsgehalt.

#### **5.4 Einfluss der Lastdichte auf die Netzzuverlässigkeit der Niederspannung**

Die Lastdichte ist in den Ergebnissen der ingenieurwissenschaftlichen Modelle das zentrale Strukturmerkmal zur Erklärung der Netzzuverlässigkeit.<sup>35</sup> Die Tabelle 5-1 fasst die Statistik zum Modell Lastdichte zusammen. Auffällig ist, dass der Koeffizient  $c$  nicht nur außerhalb des ingenieurwissenschaftlich plausiblen Wertebereichs liegt, er nimmt darüber hinaus einen negativen Wert an. Die beiden Regressionskoeffizienten  $b$  und  $c$  unterscheiden sich statistisch nicht signifikant von Null. Auch das adjustierte Bestimmtheitsmaß  $R^2$  nimmt einen vergleichsweise kleinen Wert an, es unterscheidet sich kaum von Null. Die Informationskriterien AIC und BIC liefern gleiche Rangfolgen.

---

<sup>33</sup> Vgl. E-Bridge Consulting GmbH u.a. (2020) S. 86.

<sup>34</sup> Vgl. Consentec GmbH (2017) S. 20.

<sup>35</sup> Vgl. E-Bridge Consulting GmbH u.a. (2020) S. 85.

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )	
a	3,861	0,211	18,293	<2e-16	***
b	5,595e-10	1,152e-08	0,049	0,961	
c	-2,655	2,561	-1,037	0,301	
adj. R <sup>2</sup>	0,022				
AIC	456.147,2				
BIC	456.134				
Signif. codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1					

Tabelle 5-1: Regressionsergebnis SAIDI, Lastdichte NS.

Abbildung 5-7 zeigt das Regressionsergebnis grafisch. In der Punktwolke dargestellt ist die Regressionsfunktion in rot und der mit der Anzahl der Letztverbraucher gewichtete Mittelwert aus den SAIDI-Werten in grün. Der Mittelwert liegt bei rd. 4,030 min/a. Der ingenieurwissenschaftlich hergeleitete hyperbolische Verlauf im Fall der resultierenden Regressionsfunktion nicht erkennbar.

Die Beobachtungen aus der explorativen Datenanalyse bivariater Zusammenhänge werden bestätigt. Ein robuster statistischer Zusammenhang zwischen der Lastdichte (NS) und den SAIDI-Werten ist nicht vorhanden.

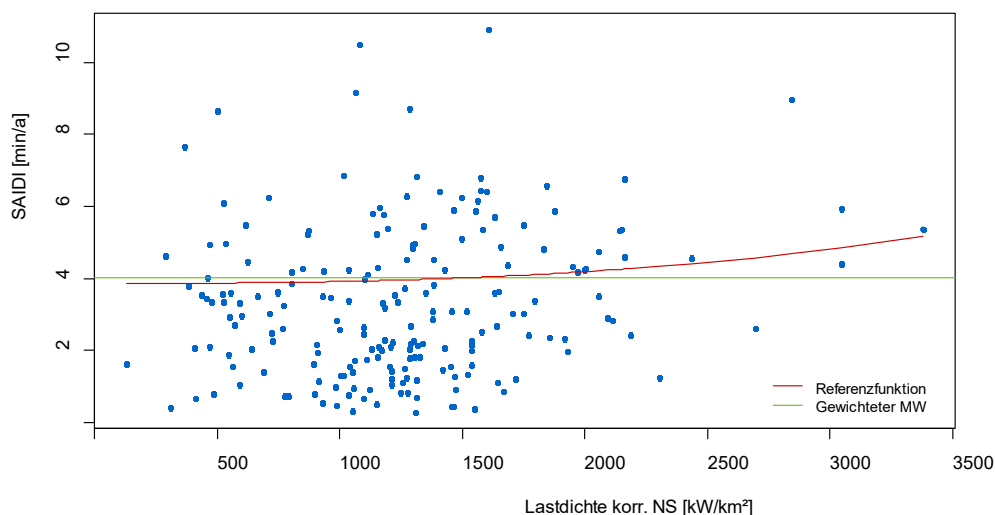


Abbildung 5-7: Grafische Darstellung zum Regressionsergebnis SAIDI, Lastdichte der Niederspannung.

#### 5.4.1 Einfluss der Anschlussdichte auf die Netzzuverlässigkeit der Niederspannung

Tabelle 5-2 fasst die Statistik zum Modell Anschlussdichte (NS) zusammen. Wie in der explorativen Datenanalyse wird eine Gewichtung mit der Anzahl der Letztverbraucher der Niederspannungsebene und der Umspannebene der MS-/NS vorgenommen. Ein aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht plausibles Modell kann aus den vorliegenden Daten nicht ermittelt werden, da eine Regressionsfunktion mit dem Koeffizienten a (Achsenabschnitt) keine Konvergenz liefert. Wird aus rein informatorischen Gründen ein Regressionsmodell ohne den Achsenabschnitt a ermittelt, fällt auf, dass der Exponent c außerhalb des plausiblen Wertebereichs liegt, er nimmt – vergleichbar dem Modell Lastdichte (NS) – einen negativen Wert an. Der plausible Wertebereich des c-Werts liegt im Fall der Anschlussdichte zwischen -0,5 und 0,5. Die beiden verbleibenden Regressionskoeffizienten b und c unterscheiden sich statistisch nicht signifikant von null. Das adjustierte Bestimmtheitsmaß  $R^2$  nimmt einen kleinen Wert an. Die Informationskriterien AIC und BIC liefern gleiche Rangfolgen. Ein robuster Zusammenhang zwischen der Anschlussdichte (NS) und den SAIDI-Werten ist nicht vorhanden. Das Modell ist zu verwerfen.

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
a	-	-	-	-
b	3,772	2,334	1,617	0,108
c	-0,011	0,098	-0,107	0,915
adj. $R^2$	4,889e-05			
AIC	456.157,60			
BIC	456.147,70			
Signif. codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1				

Tabelle 5-2: Regressionsergebnis SAIDI, Anschlussdichte NS.

#### 5.4.2 Einfluss der Letztverbraucherichte auf Netzzuverlässigkeit der Niederspannung

Tabelle 5-3 fasst die Statistik zum Modell Letztverbraucherichte (NS) zusammen. Wie in der explorativen Datenanalyse wird mit der Anzahl der Letztverbraucher der NS-Ebene und der MS-/NS-Umspannebene gewichtet. Auch bei diesem Modell fällt auf, dass der Regressionsexponent c außerhalb seines plausiblen Wertebereichs liegt. Der plausible Wertebereich des c-Werts liegt zwischen -0,5 und 1. Die beiden Regressionskoeffizienten b und c unterscheiden sich statistisch nicht signifikant von null. Wie in den beiden zuvor getesteten Modellen nimmt das adjustierte Bestimmtheitsmaß  $R^2$  einen sehr kleinen Wert an. Die beide Informationskriterien AIC und BIC liefern gleiche Rangfolgen.



	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )	
a	3,756	0,429	8,760	8,75e-16	***
b	1,713e-05	2,849e-04	0,060	0,952	
c	-1,284	1,946	-0,660	0,510	
adj. R <sup>2</sup>	0,018				
AIC	456.144				
BIC	456.130,8				
Signif. codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1					

Tabelle 5-3: Regressionsergebnis SAIDI, Letztverbraucherichte NS.

### 5.4.3 Einfluss der Lastdichte auf die Netzzuverlässigkeit der Mittelspannung

Die Ergebnisse für das Modell Lastdichte sind in Tabelle 5-4 zusammengefasst. Die regressionsanalytisch geschätzten Koeffizienten a, b und c sind mit einer Vertrauenswahrscheinlichkeit von mindestens 95 % statistisch von Null verschieden. Das adjustierte Bestimmtheitsmaß R<sup>2</sup> nimmt einen Wert an, der mit den bisher ermittelten sowie den in den Gutachten ausgewiesenen Werten vergleichbar ist.<sup>36</sup> Die Informationskriterien AIC und BIC liefern gleiche Rangfolgen. Der ermittelte Regressionsexponent c liegt am oberen Rand des ingenieurwissenschaftlich plausiblen Wertebereichs, der sich zwischen 0,5 und 1 erstreckt.

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )	
a	5,0832	0,7261	7,000	3,83e-11	***
b	573,160	293,1716	1,955	0,052	.
c	0,9688	0,1398	6,931	5,70e-11	***
adj. R <sup>2</sup>	0,5003				
AIC	458.751,6				
BIC	458.738,4				
Signif. codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1					

Tabelle 5-4: Ergebnisse geschlossene Referenzfunktion ASIDI und MS-Lastdichte.

Abbildung 5-8 zeigt das Regressionsergebnis grafisch. In der Punktwolke dargestellt ist die Regressionsfunktion in rot und der mit der Anzahl der Letztverbraucher gewichtete Mittelwert

<sup>36</sup> E-Bridge Consulting GmbH u.a. (2020) S. 86.

der ASIDI-Werte in grün. Der Mittelwert liegt bei rd. 9,7029 min/a. Der ingenieurwissenschaftlich hergeleitete hyperbolische Verlauf der Regressionsfunktion ist – vergleichbar der explorativen Datenanalyse – klar erkennbar. Bei einer rein visuellen Betrachtung muss berücksichtigt werden, dass die einzelnen Beobachtungspunkte hier zwar identisch dargestellt werden, jeder Punkt jedoch mit einem unterschiedlichen Gewicht versehen ist, welches für jeden Netzbetreiber durch die Anzahl der Letztverbraucher in der Nieder- und Mittelspannungsebene sowie der Umspannebenen HS/MS und MS/NS bestimmt wird. Diese Gewichte beeinflussen den Verlauf der resultierenden Regressionsfunktion.

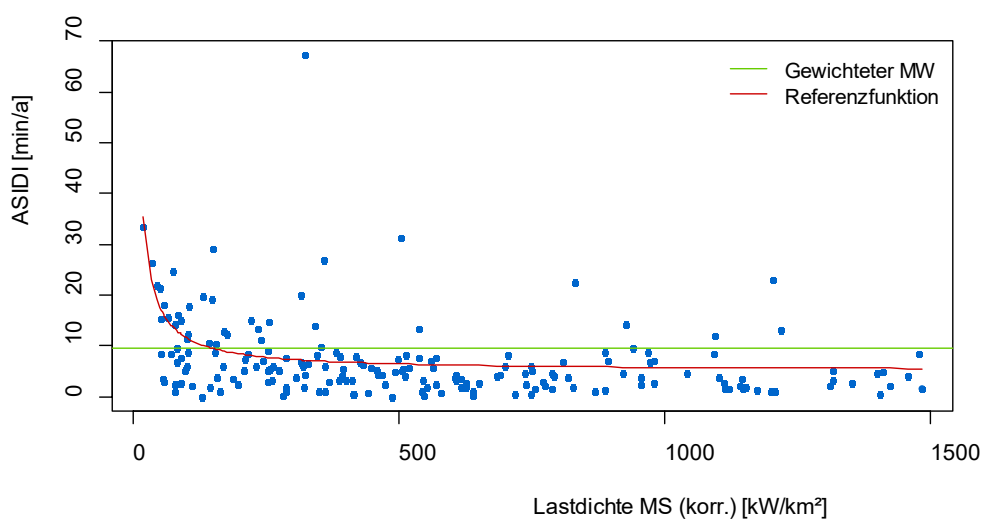


Abbildung 5-8: Grafische Darstellung zum Regressionsergebnis ASIDI, Lastdichte der Mittelspannung.

#### 5.4.4 Einfluss der Anschlussdichte auf die Netzuverlässigkeit der Mittelspannung

Die Ergebnisse für das Modell sind in Tabelle 5-5 zusammengefasst. Die regressionsanalytisch geschätzten Koeffizienten  $a$ ,  $b$  und  $c$  sind zu einer Vertrauenswahrscheinlichkeit von mindestens 95 % statistisch von Null verschieden. Das adjustierte Bestimmtheitsmaß  $R^2$  nimmt einen Wert an, der leicht unterhalb des ermittelten Wertes für das Modell Lastdichte liegt. Auch die Informationskriterien AIC und BIC liefern gleiche Rangfolgen, auch im Vergleich zur Lastdichte. Der geschätzte Koeffizient  $c$  liegt allerdings außerhalb des ingenieurwissenschaftlich plausiblen Wertebereichs. Dieser Wertebereich liegt zwischen -0,5 und 0,5.

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )	
a	5,1832	0,7285	7,115	1,98e-11	***
b	8,2416	1,0545	7,816	3,10e-13	***
c	1,3361	0,2010	6,648	2,79e-10	***
Adj. R <sup>2</sup>	0,4821				
AIC	458.742.70				
BIC	458.729,40				
Signif. codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1					

Tabelle 5-5: Ergebnis der geschlossenen Referenzfunktion ASIDI, Anschlussdichte Mittelspannung.

Abbildung 5-9 zeigt das Regressionsergebnis grafisch. In der Punktwolke dargestellt ist die Regressionsfunktion in rot und der mit der Anzahl der Letztverbraucher gewichte Mittelwert der ASIDI-Werte in grün. Der ingenieurwissenschaftlich hergeleitete hyperbolische Verlauf der Regressionsfunktion ist – vergleichbar der explorativen Datenanalyse – klar erkennbar.

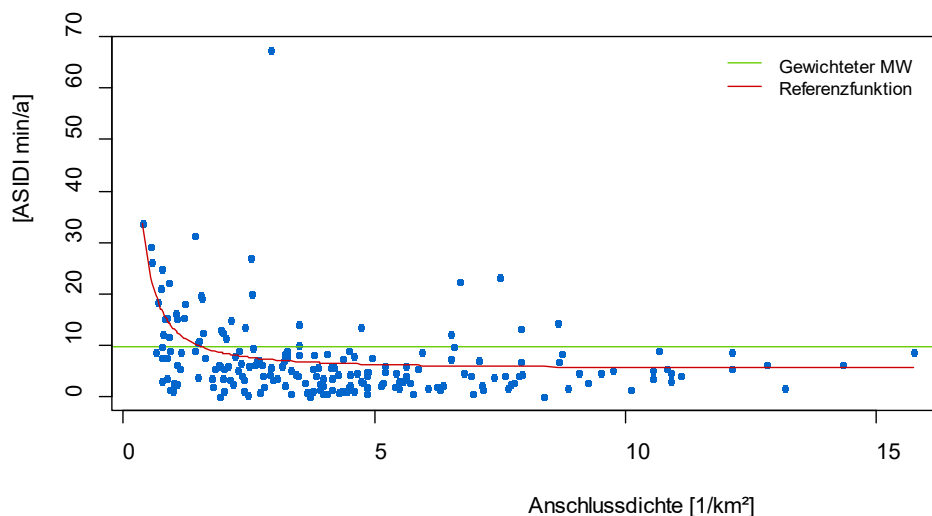


Abbildung 5-9: Grafische Darstellung zum Regressionsergebnis ASIDI, Anschlussdichte der Mittelspannung.

#### 5.4.5 Multivariate Analysen Mittelspannung

Neben den hier vorgestellten Parametern könnten grundsätzlich weitere Kombinationen zur Abbildung gebietsstruktureller Unterschiede herangezogen werden. Aus den bivariaten Analysen ergibt sich eine Rangfolge möglicher Modellerweiterungen. Erklärende Basisvariable ist dabei die Lastdichte, da diese ingenieurwissenschaftlich wie statistisch als die Variable mit dem höchsten Erklärungsbeitrag zur Netzzuverlässigkeit identifiziert wurde. Entsprechend der in

den bivariaten Analysen zuvor ermittelten Gütemaße zu den einzelnen Modellen werden zunächst im Rahmen einer Korrelationsanalyse neben der Lastdichte entsprechende Strukturparameter hinsichtlich zusätzlicher Erklärungsgehalte in multivariaten Modellen überprüft. Das Ergebnis der Korrelationsanalyse ist in Tabelle 5-6 zusammengefasst. Für die multivariante Analyse bietet es sich an, nur solche Struktureinflüsse auszuwählen, die aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht eine plausible Ergänzung zur verwendeten Lastdichte darstellen, jedoch nicht bereits hoch korreliert mit dieser sind, da sie in diesem Fall keinen zusätzlichen Erklärungsbeitrag liefern.

	LastD	AnschlussD	ScheinleistungsD	Elementarlast	VKG
LastD <sup>37</sup>	1				
AnschlussD <sup>38</sup>	0,847	1			
ScheinleistungsD <sup>39</sup>	0,870	0,888	1		
Elementarlast <sup>40</sup>	0,888	0,584	0,554	1	
VKG <sup>41</sup>	0,159	0,376	0,199	0,045	1

Tabelle 5-6: Korrelationskoeffizienten als Ergebnis der Korrelationsanalyse.

Aufgrund des vergleichsweise geringen Korrelationskoeffizienten kommt somit die Größe Verkabelungsgrad (VKG) als Erweiterung in Frage. Tabelle 5-7 zeigt das Ergebnis der multiplen Regression zum Modell MS-Lastdichte in Kombination mit dem Verkabelungsgrad.

<sup>37</sup> LastD = Lastdichte (korrigiert) MS [kW/km<sup>2</sup>].

<sup>38</sup> AnschlussD = Anschlussdichte MS [1/km<sup>2</sup>].

<sup>39</sup> ScheinleistungsD = Scheinleistungsdichte [MVA/km<sup>2</sup>].

<sup>40</sup> Elementarlast = korrigierte zeitgleiche Jahreshöchstlast MS je Letztverbraucher [kW].

<sup>41</sup> VKG = Verkabelungsgrad [%].

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )	
a	25,2842	2,6402	9,577	< 2e-16	***
b	3.435,7738	2884,4112	1,191	0,235	
c	1,5914	0,2443	6,514	5,91e-10	***
d	-0,2026	0,0271	-7,480	2,36e-12	***
adj. R <sup>2</sup>	0,6062				
AIC	458.821				
BIC	458.804,40				
Signif. codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1					

Tabelle 5-7: Ergebnis des multivariaten Zusammenhangs ASIDI, Lastdichte (x), und Verkabelungsgrad (z) Mittelspannung.

Diese Schätzfunktion ergibt sich wie folgt:

$$\hat{y} = f(x, z) = a + \frac{b}{x^c} + d \cdot z = 25,28 + \frac{3.435,77}{x^{1,59}} - 0,20 \cdot z \quad (4)$$

Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  liegt bei 0,6062. Zwar zeigt der durchgeführte F-Test eine signifikante Verbesserung des Erklärungsgehalts an, jedoch liegt in Folge der Modellerweiterung der Regressionskoeffizienten c außerhalb des plausiblen Wertebereichs. Im Übrigen unterscheidet sich der Regressionskoeffizient b statistisch nicht signifikant von Null. Auch der endogene Charakter des Einflusses Verkabelungsgrad ist bei der Modellbewertung zu berücksichtigen. Eine Verbesserung im Vergleich zum bivaraten Zusammenhang ASIDI, Lastdichte liegt somit nicht vor.

#### 5.4.6 Zwischenfazit

##### *Niederspannung*

Wie bei der Überprüfung der explorativen Datenanalyse bivariater Zusammenhänge liefern die untersuchten, geschlossenen Referenzfunktionen für die Niederspannung keine verwertbaren Ergebnisse. Dies trifft auch auf weitere Modelle der Niederspannung zu, in denen bspw. auf die Stromkreislänge bezogene Strukturgrößen enthalten sind und aus informatorische Sicht ebenfalls betrachtet wurden. Da plausible funktionale Zusammenhänge zwischen der Zuverlässigkeitskennzahl SAIDI und den hier analysierten Parametern nicht festgestellt werden konnten,

wird die Durchführung multipler Regressionsanalysen verzichtet.<sup>42</sup> Wie in der Vergangenheit wird auf den Mittelwert der Netzzuverlässigkeitskennzahlenwerte der Niederspannung (SAIDI-Werte) als Referenzwert zurückzugegriffen. Gewichtet ist dieser Mittelwert mit der Anzahl der Letztverbraucher aus der Niederspannungsebene und der MS-/NS-Umspannebene der an das jeweils betrachtete Netz angeschlossenen Letztverbraucher. Der so bestimmte Referenzwert liegt bei rd. 4,030 min/a.

### ***Mittelspannung***

Für die Mittelspannung ist im Ergebnis festzustellen, dass der Strukturparameter Lastdichte weiterhin hinreichend belastbar die Netzzuverlässigkeit der Mittelspannung beschreibt. Die Eignetheit konnte im Rahmen zweiter Gutachten ingenieurwissenschaftlich nachgewiesen werden. Auch die statistischen Untersuchungen weisen die Lastdichte erneut als das am besten geeignete strukturelle Merkmal aus. Als Gewichtungsgröße ist die Anzahl der Letztverbraucher zu verwenden. Als Referenzfunktion ergibt sich der in Formel (5) beschriebene Zusammenhang. Dieser ist für die Ermittlung der Referenzwerte und in der Folge für die Bestimmung der Qualitätselemente zugrunde zu legen.

$$\hat{y} = f(x) = a + \frac{b}{x^c} = 5,08 + \frac{573,16}{x^{0,969}} \quad (5)$$

---

<sup>42</sup> Vgl. Consentec GmbH (2017) S. 47.

## 6 Robustheit des gewählten Modells

Um das gefundene Ergebnis abzusichern und dessen Robustheit gegenüber atypischen Merkmalsausprägungen zu prüfen, wurde schließlich eine Robustheitsanalyse durchgeführt. Das Verfahren orientiert sich an den Ausführungen des aktuellen Gutachtens.<sup>43</sup> Der Begriff „atypische Merkmalsausprägungen“ bezieht sich ausschließlich auf die Produktionsfunktion, nicht auf deren Datengrundlage. Diese wurde zuvor, unter Beteiligung der Netzbetreiber und der Landesregulierungsbehörden, ausführlichen Plausibilitätskontrollen unterzogen und ist hinreichend belastbar (vgl. Abschnitt 1). Die Darstellung der Robustheitsanalyse erfolgt für die Mittelspannung und die Lastdichte, da diese als die erklärende Variable  $x$  in das ausgewählte Modell eingeht.

Es wird folgende Vorgehensweise gewählt: Aus den Netzzuverlässigkeitskennzahlen- und den Strukturparameterwerten werden 1 %- und 2 %-Perzentile sowie 99 %- und 98 %-Perzentile gebildet, um Datensätze an den Rändern aus der Datengrundlage zu entfernen. Auf Grundlage der jeweils reduzierten Datengrundlage werden dann Regressionsanalysen durchgeführt und die Ergebnisse hinsichtlich ihrer Änderungen miteinander verglichen. Abbildung 6-1 enthält die regressionsanalytisch geschätzten Koeffizienten  $a$ ,  $b$  und  $c$ . Daneben sind die Signifikanzniveaus der Regressionskoeffizienten dargestellt sowie in Klammern die entsprechenden Standardfehler der geschätzten Koeffizienten. Schließlich sind die Werte der beiden Informationskriterien AIC und BIC sowie der Bestimmtheitsmaße  $R^2$  in Tabelle 6-1 angegeben.

Die Analyse bedeutet für die Zuverlässigkeitskennzahlenwerte einen Ausschluss von ASIDI-Werten größer als 31,31 min/a bzw. 26,83 min/a sowie kleiner als 0,01 min/a bzw. 0,23 min/a. Ein Ausschluss auf Basis der Lastdichte hat zur Folge, dass Werte größer als 2641,37 kW/km<sup>2</sup> bzw. 1984,21 kW/km<sup>2</sup> und kleiner 54,49 kW/km<sup>2</sup> bzw. 46,10 kW/km<sup>2</sup> herausgenommen werden.

---

<sup>43</sup> Vgl. E-Bridge Consulting GmbH u.a. (2020) S. 95 f.

	LastD P99	LastD P01	LastD P98	LastD P02	ASIDI P99	ASIDI P01	ASIDI P98	ASIDI P02
a	5,0923 *** (0,7407)	3,5913 . (1,6347)	4,0492 *** (0,9692)	2,7024 (2,8750)	5,2034 *** (0,6992)	5,0929 *** (0,7314)	5,1981 *** (0,6883)	5,0973 *** (0,7354)
b	575,4778 . (298,1634)	127,9386 (104,1040)	383,5232 * (190,421)	79,8496 (67,1119)	742,9199 (469,5728)	572,0787 . (294,7353)	769,8263 (484,0979)	569,4491 . (294,7432)
c	0,9700 *** (0,1418)	0,5945 ** (0,2272)	0,8449 *** (0,1387)	0,4737 . (0,2506)	1,0343 *** (0,1677)	0,9685*** (0,1408)	1,0432 *** (0,1668)	0,9674 *** (0,1415)
AIC	447.366	444.843,2	437.441,4	434.920,1	445.549,7	446.379,7	437.062	439.206,4
BIC	447.352,9	444.830	437.428,2	434.906,9	445.536,5	446.366,5	437.048,9	439.193,3
R <sup>2</sup>	0,4982	0,3548	0,5126	0,3067	0,5022	0,5004	0,5092	0,1953
Anzahl	199	199	197	197	199	199	197	197
Signif. codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1								

Tabelle 6-1: Schätzwerte der Koeffizienten zur Robustheitsanalyse.



Die sich durch die Eingrenzung der Wertebereiche ergebenden Verschiebungen der Referenzfunktion sind in der Abbildung 6 1 dargestellt. Insbesondere im unteren Wertebereich der Lastdichte bzw. oberen Bereich der ASIDI-Werte führen zu geringen Verschiebungen. Dies war allerdings modelltheoretisch und systematisch zu erwarten,<sup>44</sup> da insbesondere kleine Lastdichtewerte in der Regel mit höheren Zuverlässigkeitskennzahlen einhergehen.

Wie die nachstehende Grafik bestätigt, können die Ergebnisse als hinreichend belastbar eingestuft werden.

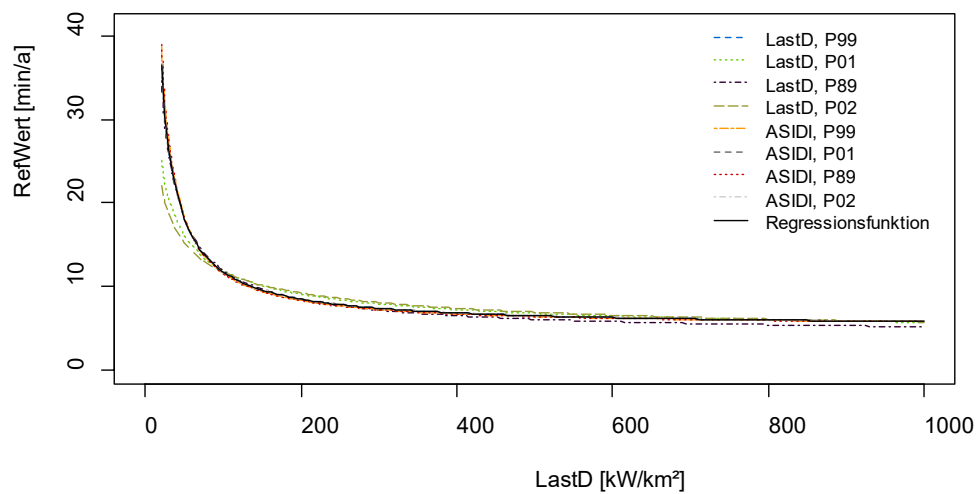


Abbildung 6-1: Ergebnisse der Regressionen für Robustheitsanalyse.

<sup>44</sup> Vgl. E-Bridge Consulting GmbH u.a. (2020) S. 95-96; Consentec Consulting für Energiewirtschaft und -technik GmbH u.a. (2010) S. 62.

## **7 Zusammenfassung**

### **7.1 Referenzwert für die Mittelspannungsebene**

Für die Mittelspannungsebene kommt die Bundesnetzagentur zu dem Ergebnis, dass die MS-Lastdichte unter allen analysierten Parametern am besten geeignet ist, gebietsstrukturelle Unterschiede abzubilden und somit für die Ermittlung der Referenzwerte heranzuziehen ist.

### **7.2 Referenzwert für die Niederspannungsebene**

Auf Grundlage der vorliegenden Datenbasis kommt die Bundesnetzagentur zu dem Ergebnis, dass für die Niederspannungsebene kein belastbarer Zusammenhang zwischen der Zuverlässigkeit und den analysierten Strukturparametern besteht. Daher ist der mit der Anzahl der an die Niederspannungsebene und der an die Umspannebene Nieder-/Mittelspannung angeschlossenen Letztverbraucher gewichtete Mittelwert aus den Zuverlässigkeitskennzahlen der Niederspannung (SAIDI) als für alle Netzbetreiber einheitlicher Referenzwert ( $y$ ) anzuwenden.

## **8 Literaturverzeichnis**

Az. 605/8135 (2006): Allgemeinverfügung nach § 52 S. 5 EnWG in der Fassung vom 22.02.2006, in: Amtsblatt der Bundesnetzagentur

Consentec Consulting für Energiewirtschaft und -technik GmbH / Forschungsgemeinschaft für Elektrische Anlagen und Stromwirtschaft e. V. / Frontier Economics Limited (2010): Konzeptionierung und Ausgestaltung des Qualitätselements im Bereich der Netzzuverlässigkeit Strom und dessen Integration in die Erlösobergrenze. Untersuchung im Auftrag der Bundesnetzagentur, 2010, bezogen unter: [www.bundesnetzagentur.de](http://www.bundesnetzagentur.de), Zugriff am: 29.03.2020

Consentec GmbH (2017): Bestimmung der Referenzwerte für das Qualitätselement 2017-2018. Untersuchung im Auftrag der Bundesnetzagentur, Abschlussbericht, 2017, bezogen unter: [www.bundesnetzagentur.de](http://www.bundesnetzagentur.de), Zugriff am: 30.03.2020

E-Bridge Consulting GmbH / Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung / Forschungsgemeinschaft für Elektrische Anlagen und Stromwirtschaft e. V. (2020): Gutachten zur Konzeptionierung eines Qualitätselements. Untersuchung im Auftrag der Bundesnetzagentur, 2020, bezogen unter: <https://www.bundesnetzagentur.de>, Zugriff am: 23.03.2020

BK8-20-00001-A (2020): Festlegung über die Datenerhebung zur Bestimmung des Qualitätselements Strom nach den §§ 19 und 20 ARegV in der Fassung vom 26.02.2020, in: Amtsblatt der Bundesnetzagentur

IEEE Standard 1366-2012 (2012): IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices in der Fassung vom 14.05.2012, in: IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices

## Anhang

## A Sonstige Einflussfaktoren auf die Netzzuverlässigkeit der Mittelspannung

Auf Basis der erhobenen Strukturgrößen können weitere Modelle untersucht werden. Bspw. können die zuvor auf die geografische Fläche bezogenen Strukturgrößen der Mittelspannung (Jahreshöchstlast, Anzahl der Anschlusspunkte oder Bemessungsscheinleistung) auf die Stromkreislänge der Mittelspannung bezogen werden. Auch kann die Bemessungsscheinleistung auf die geografische Fläche bzw. die zeitgleiche Jahreshöchstlast auf die Anzahl der Letztverbraucher bezogen werden. Anschließend kann der Einfluss dieser Strukturparameter auf statistischen Wege auf die Netzzuverlässigkeit analog analysiert werden. Aufgrund der endogenen Eigenschaften der Stromkreislänge und der Bemessungsscheinleistung sind mit diesen beiden Größen gebildete Kombinationen grundsätzlich bei der Ermittlung von Qualitätselementen vernachlässigbar. Die Analysen dienen daher rein informatorischen Zwecken. Tabelle 7-1 fasst die Mindestanforderungen hinsichtlich der Plausibilität von Zusammenhängen zwischen der Netzzuverlässigkeit und den untersuchten endogenen Strukturgrößen zusammen.

<i>Strukturparameter</i>	<i>Plausibler Funktionsverlauf</i>	<i>Wertebereich der Koeffizienten a und b</i>	<i>Wertebereich des Exponenten c</i>
Jahreshöchstlast je Stromkreislänge	Hyperbolisch	Nicht negativ	Rd. +1
Anzahl Anschlusspunkte je Stromkreislänge	Hyperbolisch	Nicht negativ	-1 bis +1
Bemessungsscheinleistung je Stromkreislänge	Hyperbolisch	Nicht negativ	Rd. +1
Verkabelungsgrad	Linear	a – positiv, b – beliebig	Entfällt

Tabelle 7-1: Erwartete Funktionsverläufe und Wertebereiche ausgewählter Modelle bei Berücksichtigung endogener Strukturgrößen.<sup>45</sup>

Nachfolgende Tabelle 7-2 fasst die Regressionskoeffizienten a b und c sowie die Statistik dieser Modelle der Mittelspannung zusammen. Als Gewichtunggröße wurde jeweils die Anzahl der

<sup>45</sup> Vgl. Consentec GmbH (2017) S. 19.

Letztverbraucher der Nieder- und Mittelspannungsebenen sowie der MS/NS- und HS/MS-Umspannebenen verwendet. Bei den in Klammern wiedergegeben Werten handelt es sich um den Standardfehler des jeweiligen Regressionskoeffizienten. Die Anzahl der Sterne symbolisieren das jeweilige Signifikanzniveau. Es kann festgestellt werden, dass mit Ausnahme des Modells mit dem Strukturparameter Anzahl der Anschlusspunkte je Stromkreislänge (AP/SKL) die geschätzten Regressionskoeffizienten  $c$  außerhalb der ingenieurwissenschaftlich plausiblen Bandbreite liegen. Auch weisen die Modelle mit den auf die Stromkreislänge bezogenen Strukturgrößen negative Schätzungen für den Regressionskoeffizienten  $a$  auf. Statistisch unterscheiden sich die geschätzten Koeffizienten für die Modelle mit den auf die Stromkreislänge bezogenen Strukturgrößen teils nicht von Null. Die Informationskriterien AIC und BIC liefern gleiche Rangfolgen. Hinsichtlich der adjustierten Bestimmtheitsmaße  $R^2$  sind größere Schwankungen festzustellen.

	BSLD <sup>46</sup>	JHL/SKL <sup>47</sup>	AP/SKL <sup>48</sup>	BSL/SKL <sup>49</sup>	JHL/LV <sup>50</sup>
a	5,0468 *** (0,7240)	-2,2122 (5,2359)	-2,0707 (5,4180)	-14,0303 (24,6614)	9,6728 *** (0,5204)
b	3,4062 *** (0,8643)	327,1523 (294,1165)	14,1860 * (5,7200)	20,1106 (24,6822)	0,0253 (0,1792)
c	1,0865 *** (0,1761)	0,6934 * (0,2828)	1,2280 * (0,4811)	0,3755 (0,3929)	-
AIC	458.739,6	458.724,3	458.654,7	458.708,9	1.527,98
BIC	458.726,4	458.711,1	458.641,5	458.695,7	1.537,91
R <sup>2</sup>	0,4690	0,5790	0,2589	0,3741	9,9482e-05
c	0,5 bis 1	Rd. 1	-1 bis 1	Rd. 1	Linearer Zusammenhang
Signif. codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1					

Tabelle 7-2: Koeffizienten und Statistik verschiedener Modelle der Mittelspannung.

<sup>46</sup> BSLD = Bemessungsscheinleistungsdichte, installierte Bemessungsscheinleistung [MVA] je geografische Fläche [km<sup>2</sup>].

<sup>47</sup> JHL/SKL = (korrigierte) zeitgleiche Jahreshöchstlast [kW], bezogen auf die Stromkreislänge [km].

<sup>48</sup> AP/SKL = Anzahl der Anschlusspunkte an Letztverbraucher und eigene nachgelagerte MS/NS-Umspannebenen, bezogen auf die Stromkreislänge [km].

<sup>49</sup> BSL/SKL = Bemessungsscheinleistung [MVA], bezogen auf die Stromkreislänge [km].

<sup>50</sup> JHL/LV = Elementarlast, korrigierte zeitgleiche Jahreshöchstlast [kW], bezogen auf die Anzahl der Letztverbraucher der Nieder- und Mittelspannungsnetzebenen sowie der MS/NS- und HS/MS-Umspannebenen.

Die entsprechenden bivariaten Zusammenhänge der Strukturgrößen sind in folgenden Abbildungen dargestellt.

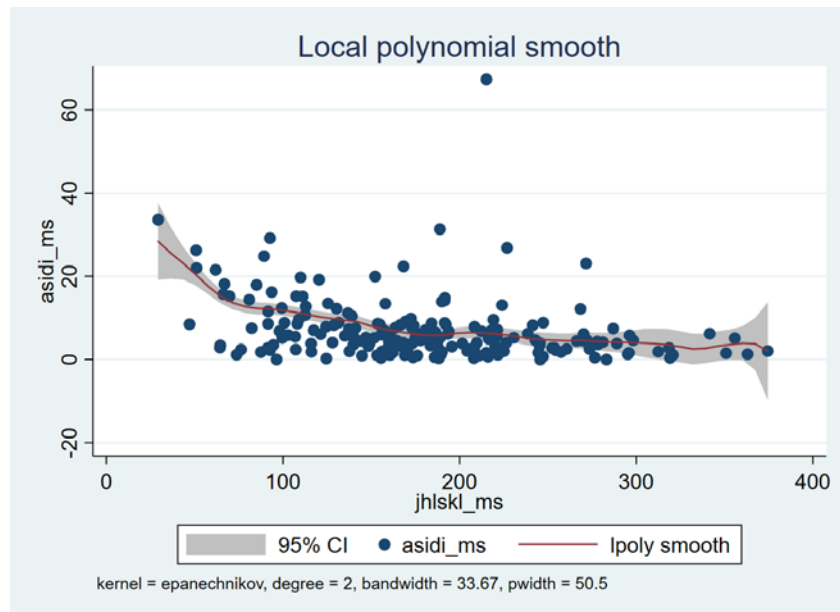


Abbildung 7-1: Bivariater Zusammenhang ASIDI und Jahreshöchstlast je Stromkreislänge, gewichtet mit den Letztverbrauchern.

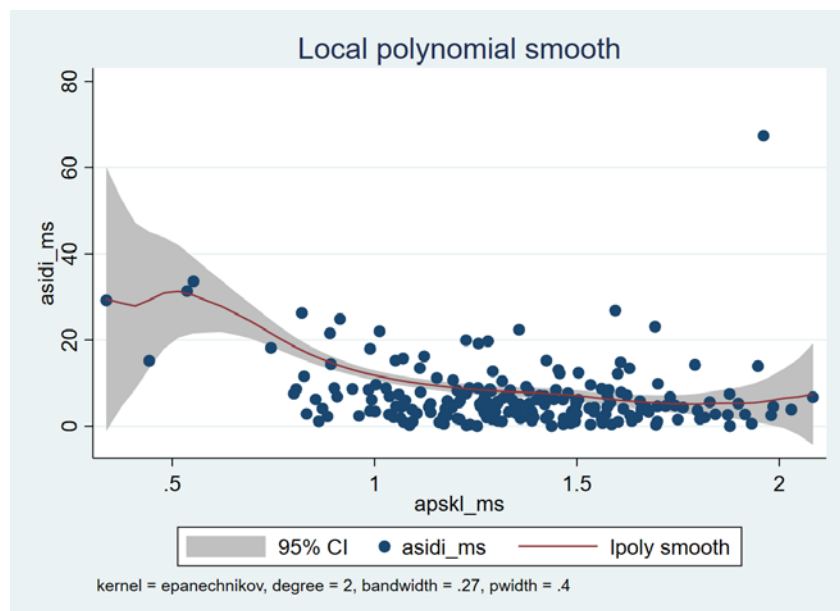


Abbildung 7-2: Bivariater Zusammenhang ASIDI und Anzahl der Anschlusspunkte (LV & nachgelagerte eigene Umspannenen MS/NS) je Stromkreislänge, gewichtet mit den Letztverbrauchern.

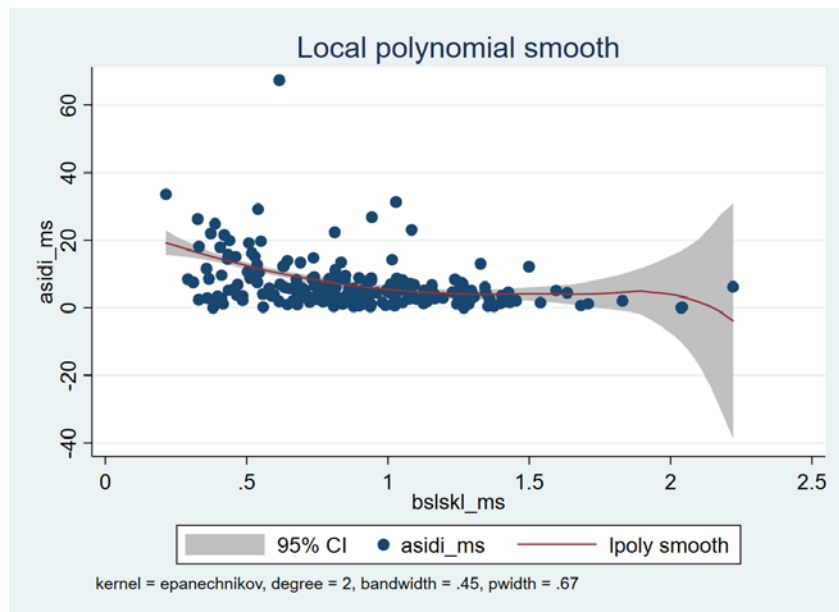


Abbildung 7-3: Bivariater Zusammenhang ASIDI und Bemessungsscheinleistung (LVT & ONT) je Stromkreislänge, gewichtet mit den Letztverbrauchern.