

Kostentreiberanalyse und Effizienzvergleich der Gasfernleitungsnetzbetreiber

Gutachten für die dritte Regulierungsperiode

Dr. Urs Trinkner, Swiss Economics

Dr. Martin Lutzenberger, Swiss Economics

Andreas Haller, Swiss Economics

Prof. Dr. Per Agrell, SUMICSID

Prof. Dr. Peter Bogetoft, SUMICSID

Martin Ahlert, 4Management

Prof. Dr. Peter Vossig, 4Management

Gutachten im Auftrag der Bundesnetzagentur

März 2018

ISSN 2235-1868

Disclaimer

Obwohl Swiss Economics sich bemüht, nur wahre und korrekte Informationen zu verwenden und eigene Aussagen sorgfältig zu tätigen, kann hinsichtlich der Richtigkeit, Aktualität, Genauigkeit, Zuverlässigkeit, Vollständigkeit und Verwendbarkeit der nachfolgenden Informationen keine Gewähr oder Haftung übernommen werden. Swiss Economics haftet in keinem Fall für Schäden oder Folgeschäden jeglicher Art, die in irgendeiner Weise im Zusammenhang den nachfolgend bereitgestellten Informationen stehen. Die nachfolgenden Informationen stellen keine rechtliche Beratung dar.

© Swiss Economics SE AG
Weinbergstrasse 102
CH-8006 Zürich
Schweiz
www.swiss-economics.ch

Inhalt

1	Einleitung	10
1.1	Ausgangslage	10
1.2	Auftrag / Zielsetzung	10
1.3	Vorgehen	10
1.3.1	Projektstruktur	10
1.3.2	Resultate Anhörungen	12
1.4	Struktur des Berichts	13
2	Grundlagen	14
2.1	Einbettung von Effizienzvergleichen in die Anreizregulierung	14
2.2	Ökonomische Grundlagen der Effizienzmessung	15
2.2.1	DEA	17
2.2.2	SFA	18
2.2.3	Zusammenspiel von DEA und SFA	18
2.3	Rechtliche Vorgaben	19
2.3.1	Einordnung des Effizienzvergleichs in die Anreizregulierung	19
2.3.2	Inhaltliche Vorgaben zum Effizienzvergleich	20
2.4	Terminologie	22
3	Datenvalidierung	23
3.1	Datenmanagement und analysierte Dateien	23
3.1.1	Datenlieferungen der BNetzA und Lieferungen an die Netzbetreiber	23
3.1.2	Struktur der Datenabfrage	24
3.1.3	Datenmanagement	24
3.1.4	Im Rahmen der Validierung analysierte Dateien	25
3.2	Analyse der einzelnen Datenlieferungen je Netzbetreiber	26
3.3	Analyse der Netzkarten	26
3.4	Analyse gemeinsamer Datensatz	28
3.4.1	Integrität – Newcomb-Benford Prüfung	28
3.4.2	Plausibilität	28
3.4.3	Prüfung der finalen Parameter	30
3.5	Sonderprüfungen	31
3.6	Fazit der Datenvalidierung und deskriptive Statistiken der Parameter	31
4	Ingenieurwissenschaftliche Kostentreiberanalyse (KTA Ing)	32
4.1	Herleitung der zu untersuchenden Parameter	33
4.1.1	Ergebnisse der KTA zur 2. Regulierungsperiode	33
4.1.2	Neue Parametervorschläge infolge einer veränderten Datenabfrage	34
4.1.3	Parametervorschlag Transportwurzelmoment	34
4.1.4	Entwicklung des regulatorischen Rahmens und Parametervorschlag „Horizontaler Transport“	38

4.1.5	Parametervorschläge aufgrund der Konsultation: Anzahl Verzweigungen und Maschen.....	41
4.1.6	Zwischenergebnis: In der aktuellen KTA zu untersuchende Parameter.....	42
4.1.7	Exkurs: Veranschaulichung der GIS-basierten Parameter	43
4.2	Konzeptionelle Einordnung der Parameter.....	45
4.2.1	Gruppenbildung.....	45
4.2.2	Zuordnung zu Versorgungsdimensionen	45
4.2.3	Zuordnung nach Kontrollierbarkeit	49
4.2.4	Zusammenfassung	51
4.3	Qualitative Diskussion der Parameter aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht.....	52
4.3.1	Diskussion der Parameter	52
4.3.2	Ergänzende Überlegungen zur Abbildung netztechnischer Flexibilität	61
4.4	Quantitative Analyse ausgewählter Parameter im Rahmen einer Referenznetzanalyse	62
4.4.1	Übersicht, Ziele, Einsatzbereich und Grenzen der Referenznetzanalyse	62
4.4.2	Versorgungsaufgaben und deren Variation.....	64
4.4.3	Berechnung synthetischer Kosten und zugehöriger Vergleichsparameter.....	67
4.4.4	Ergebnisse	69
4.4.5	Fazit und Schlussbemerkungen zur Referenznetzanalyse	79
4.5	Fazit.....	81
5	Effizienzvergleich	83
5.1	Vorgehen	83
5.2	Methoden und Kriterien.....	84
5.3	Ökonomische Kostentreiberanalyse (KTA oec)	85
5.3.1	Kostentreibergruppen	85
5.3.2	Korrelationen.....	87
5.3.3	Untersuchungen zur Modellgröße	88
5.3.4	Zusammenfassung.....	90
5.4	Modellspezifikation: Herleitung von Grundmodellen	90
5.4.1	Methodisches	91
5.4.2	Analyse Modell RP2	94
5.4.3	Resultate Bottom-up-Verfahren	95
5.4.4	Resultate Top-down-Verfahren.....	97
5.5	Schätzung der Effizienzgrenze	99
5.5.1	Methodisches	99
5.5.2	Weiterentwicklung Grundmodelle.....	104
5.5.3	Modellwahl	109
5.5.4	Detailspezifikation	111
5.5.5	Bestabgerechnete Effizienzwerte	112
5.5.6	Validierung	114
6	Zusammenfassung	118

7	Referenzen.....	120
I	Parameterdefinitionen und -berechnungen.....	122
I.1	Vorbereitungen im Datensatz.....	122
I.1.1	Umrechnung von Gauß-Krüger Koordinaten zu UTM32 Koordinaten	122
I.1.2	Behandlung von Fremdnutzungsanteilen, Biogas und Investitionsmaßnahmen sowie virtuellen Punkten	122
I.1.3	Datengrundlage für Arbeit- und Lastangaben.....	125
I.2	Parameterdefinitionen	126
I.2.1	Rohrgeometrie: Leitungslängen, Rohrleitungsvolumen und Rohrleitungsmantelfläche	126
I.2.2	Jahresarbeit.....	127
I.2.3	Last: Netzlast und Jahreshöchstlast.....	127
I.2.4	Anschlüsse: Ein- und Ausspeisepunkte.....	128
I.2.5	Druck: Eingangsdruck, Ausgangsdruck, Druckdifferenz und (mittleres) Druckniveau	128
I.2.6	Verdichter.....	129
I.2.7	Polygonfläche	130
I.2.8	Transportmoment und mittlere Transportentfernung.....	130
I.2.9	Transportwurzelmoment	134
I.2.10	(Wurzel) Transportmomentfläche	134
I.2.11	Netzcharakteristiken: Verzweigungen und Maschen.....	134
I.2.12	Horizontaler Transport (GÜP, MÜP, nicht buchbare/bestellbare NKP)	135
I.2.13	Gebietseigenschaften	136
I.3	Dokumentation der Parameter zuhanden der Netzbetreiber	137
II	Liste der Parameter mit Gruppenzugehörigkeit	138
III	Graphische Abbildung des Leitungsnetzes	139
IV	Grundlagen Kostenberechnung Referenznetzanalyse	140
IV.1	Input Netztypologie und Versorgungsaufgabe	140
IV.2	Berechnung Rohrdurchmesser	140
IV.3	Berechnung der synthetischen Kosten	141
V	Parameter und Effizienzwerte finales Modell.....	143
VI	Modellvalidierung.....	144

Abbildungen

Abbildung 1: Vorgehen	10
Abbildung 2: Analyserahmen	15
Abbildung 3: Illustration Effizienzkostengrenze	16
Abbildung 4: Übersicht der Methoden	16
Abbildung 5: Schematische Darstellung einer DEA	17
Abbildung 6: Schematische Darstellung einer SFA	18
Abbildung 7: Zusammenspiel von DEA und SFA	19
Abbildung 8: Darstellung Netzkarten	27
Abbildung 9: Häufigkeiten der Führungsziffern im Datensatz	28
Abbildung 10: Vorgehen ingenieurwissenschaftliche Kostentreiberanalyse	32
Abbildung 11: Kapazität und Errichtungskosten von Rohrleitungen im Verhältnis zu deren Nenndurchmesser DN (normiert auf DN 1200)	35
Abbildung 12: Markteintritt neuer Fernleitungsnetzbetreiber	39
Abbildung 13: Darstellung der GIS-Parameter	44
Abbildung 14: Versorgungsaufgaben und Variationen hiervon	62
Abbildung 15: Illustration der Optimierung	68
Abbildung 16: Erklärungsgehalt der Rohrmantelfläche	70
Abbildung 17: Erklärungsgehalt des Rohrvolumens	71
Abbildung 18: Erklärungsgehalt der Parameter für Variationen der Höchstlast	72
Abbildung 19: Erklärungsgehalt der Parameter für Variationen der Transportentfernung ...	73
Abbildung 20: Erklärungsgehalt der Parameter für Variationen des horizontalen Transportanteils	74
Abbildung 21: Erklärungsgehalt der Parameter für Druck-Variationen	75
Abbildung 22: Erklärungsgehalt der Polygonfläche	76
Abbildung 23: Erklärungsgehalt des Transportmoments	77
Abbildung 24: Erklärungsgehalt der mittleren Transportdistanz	78
Abbildung 25: Erklärungsgehalt der Wurzel Transportmomentfläche	78
Abbildung 26: Erklärungsgehalt des Transportwurzelmoments	79
Abbildung 27: Vorgehen Effizienzvergleich	83
Abbildung 28: Illustration optimale Modellgröße	88
Abbildung 29: Optimale Anzahl Parameter – Auswertung BU-Modelle	89
Abbildung 30: Verfahren zur Herleitung der Grundmodelle	90
Abbildung 31: Beispiel Ökonometrische Ausreißeranalyse	92
Abbildung 32: Beispiel Test für Schiefe und Normalverteilung der Residuen	93
Abbildung 33: Ausreißeranalyse in der DEA	101
Abbildung 34: Verteilung bestabgerechnete Effizienzwerte	113

Abbildung 35: Veränderung der bestabgerechneten Effizienzwerte.....	113
Abbildung 36: Bestabgerechnete Effizienzwerte bei sTotex (links) und Totex (rechts)	114
Abbildung 37: Verteilung Supereffizienzwerte	115
Abbildung 38: Weiterentwicklung der Vergleichsparameter	118
Abbildung 39: Bestabgerechnete Effizienzwerte im Vergleich zur RP2.....	119
Abbildung 40: BIC und VIF für das Model RP2+ im Vergleich zu weiteren Modellen	145

Tabellen

Tabelle 1: Ausgewählte Meilensteine im Projektverlauf.....	11
Tabelle 2: Klassifizierung und Terminologie Parameter und Daten	22
Tabelle 3: Bewertung der Kostentreiber in der KTA Ing der RP2.....	33
Tabelle 4: In der RP2 letztlich gewählte Parameter	34
Tabelle 5: Zu untersuchende Parameter	42
Tabelle 6: Zuordnung der Parameter zu den Versorgungsdimensionen	46
Tabelle 7: Einordnung der Parameter nach Kontrollierbarkeit	50
Tabelle 8: Einordnung nach Versorgungsdimension und Kontrollierbarkeit.....	51
Tabelle 9: Untersuchte Netztopologien und deren Eigenschaften.....	67
Tabelle 10: Standardkostenfaktoren für unterschiedliche Durchmesserklassen	69
Tabelle 11: Darstellung der Parameter nach Eignung aus Sicht der KTA Ing	82
Tabelle 12: Gruppenanalyse: Erklärungsgehalt der einzelnen Parameter.....	85
Tabelle 13: Gegenüberstellung Parameter ausgehend vom Transportmoment.....	86
Tabelle 14: Korrelationstabelle (Auszug)	87
Tabelle 15: Grundmodell aus der RP2	94
Tabelle 16: Rangierung der Parameter nach Korrelation zu sTotex	95
Tabelle 17: Resultatübersicht Bottom-up-Verfahren (sortiert nach BIC sTotex).....	96
Tabelle 18: Grundmodelle aus dem Bottom-up-Verfahren	97
Tabelle 19: Resultate Top-down-Verfahren (sortiert nach BIC sTotex).....	97
Tabelle 20: Grundmodelle aus dem Top-down-Verfahren.....	98
Tabelle 21: Ausgewählte Variationen des RP2-Modells (Rohrvolumen).....	105
Tabelle 22: Ausgewählte Variationen des Modells TD1 (Transportwurzelmoment).....	106
Tabelle 23: Ausgewählte Variationen des Modells TD2 (Rohrmantelfläche).....	107
Tabelle 24: Ausgewählte Variationen des BU1-Modells (Transportwurzelmoment)	108
Tabelle 25: Ausgewählte Variationen des BU2-Modells (Fläche/Arbeit).....	108
Tabelle 26: Übersicht engere Modellauswahl	110
Tabelle 27: Beschreibung finales Modell für den Effizienzvergleich.....	112

Tabelle 28:	Effizienzwerte finales Modell.....	112
Tabelle 29:	Peer-Analyse sTotex	115
Tabelle 30:	Peer-Analyse Totex	116
Tabelle 31:	Übersicht Bereinigung Parameter.....	123
Tabelle 32:	Untersuchte Varianten für die Druckparameter	129
Tabelle 33:	Parameternamen der Untervarianten bei der Transportmomentbildung	132
Tabelle 34:	Beispiel Transportmomentberechnung.....	133
Tabelle 35:	Geprüfte Z-Parameter zur Abbildung der Gebietseigenschaften	136
Tabelle 36:	Liste der Parameter mit deskriptiven Statistiken	138
Tabelle 37:	Werte der Parameter des finalen Modells (gerundet).....	143
Tabelle 38:	Effizienzwerte des finalen Modells im Einzelnen (gerundet).....	143

Abkürzungen

AA	Ausreißeranalyse
Adjusted R2	Adjustiertes Bestimmtheitsmaß
ARegV	Anreizregulierungsverordnung
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BIC	Bayessches Informationskriterium
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BNetzA	Bundesnetzagentur
BU	Bottom-up-Verfahren
CRS	Constant returns to scale
DEA	Data Envelopment Analysis
DLZ	Dienstleistungszentrums des Bundes für Geoinformation und Geodäsie
EFG3	Effizienzvergleich Fernleitungsnetzbetreiber Gas dritte Regulierungsper.
EVS2	Effizienzvergleich Verteilernetzbetreiber Strom zweite Regulierungsper.
FNB	Fernleitungsnetzbetreiber
GIS	geographisches Informationssystem
GK	Gauss-Krüger-Koordinatensystem
H-Gas	High calorific gas
KTA Ing	Ingenieurwissenschaftliche Kostentreiberanalyse
KTA Oec	Ökonomische Kostentreiberanalyse
KTA	Kostentreiberanalyse

LD	Luftliniendistanz
L-Gas	Low calorific gas
LNG	Flüssigerdgas
NAP	Netzanschlusspunkte
NDRS	Non decreasing returns to scale
NEP Gas	Netzentwicklungsplan Gas
NKP	Netzkopplungspunkte
NNLS	Non-negative least squares (NNLS)
OLS	Ordinary Least Squares
OPAL	Ostsee-Pipeline-Anbindungsleitung
RD	Reale Distanz
RNA	Referenznetzanalyse
ROLS	Robust Ordinary Least Squares
RP2	Zweite Regulierungsperiode
RP3	Dritte Regulierungsperiode
SFA	Stochastic Frontier Analysis
TD	Top-down-Verfahren
TM	Transportmoment
TWM	Transportwurzelmoment
TYNDP Gas	Ten-Year Network Development Plan
UTM	Universal Transverse Mercator
VIF	Variance inflation factors
VNB	Verteilernetzbetreiber

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die dritte Regulierungsperiode (RP3) für Fernleitungsnetzbetreiber (FNB) beginnt ab dem 1.1.2018. Zur Bestimmung der zulässigen individuellen Erlösobergrenzen der FNB ermittelt die Bundesnetzagentur (BNetzA) individuelle Effizienzwerte gemäß § 22 Abs. 3 Anreizregulierungsverordnung (ARegV) mittels eines nationalen Effizienzvergleichs, wobei § 12 Abs. 2 bis 4, § 13 Abs. 1 und 3 und § 14 ARegV entsprechend Anwendung finden sollen.

Spezielle Herausforderungen beim Effizienzvergleich sind die Identifikation geeigneter Kostentreiber, die Sicherstellung einer hohen Belastbarkeit der verwendeten Parameter und des Modells insgesamt sowie die Herstellung einer ausreichenden Kontinuität im Vergleich zu früheren Effizienzvergleichen.

1.2 Auftrag / Zielsetzung

Vor diesem Hintergrund wurde Swiss Economics SE AG zusammen mit SUMICSID Group SPRL und FourManagement GmbH von der Bundesnetzagentur im Rahmen eines öffentlichen Ausschreibungsverfahrens im August 2016 als Gutachter eingesetzt mit folgendem Auftrag:

- **Datenprüfung:** Plausibilisierung der bei den Fernleitungsnetzbetreibern abgefragten Daten;
- **Ingenieurwissenschaftliche Kostentreiberanalyse:** Die Kostentreiberanalyse der 2. Regulierungsperiode ist entweder zu aktualisieren oder neu durchzuführen;
- **Effizienzvergleich:** Durchführung des Effizienzvergleichs.

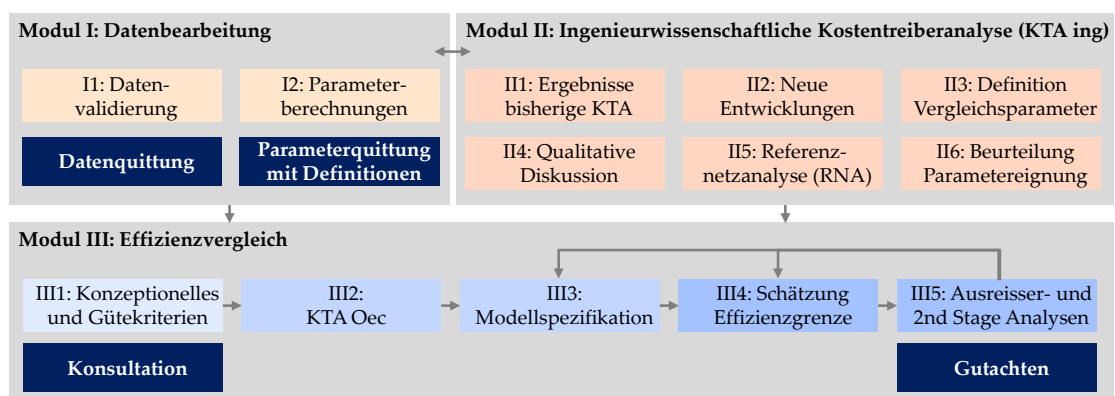
Die vorliegende Ergebnisdokumentation dokumentiert die Ergebnisse und Empfehlungen zuhanden der Bundesnetzagentur (Kapitel 3 Datenprüfung, Kapitel 4 Kostentreiberanalyse, Kapitel 5 Effizienzvergleich).

1.3 Vorgehen

1.3.1 Projektstruktur

Das Vorgehen und die Projektstruktur ist in **Abbildung 1** dargestellt und lehnt sich stark an die drei Teilaufträge an.

Abbildung 1: Vorgehen



Quelle: Eigene Darstellung

Modul I beinhaltet die Datenbearbeitung mit Datenvalidierung und Parameterberechnungen. Modul II umfasst die ingenieurwissenschaftliche Kostentreiberanalyse (KTA Ing) mit Sichtung der bisherigen Arbeiten hierzu, der Aufnahme neuer Entwicklungen seit der zweiten Regulierungsperiode (RP2), der Auswahl und Definition der Vergleichsparameter sowie deren qualitative und quantitative Beurteilung im Rahmen einer Referenznetzanalyse. Ergebnis von Modul II ist eine nach Eignung geordnete Liste von Vergleichsparametern. Diese Einschätzung der Eignung fließt in Modul III an geeigneter Stelle in den Effizienzvergleich ein. Dieser umfasst zunächst die Klärung von konzeptionellen Fragen inkl. Gütekriterien, die das finale Effizienzvergleichsmodell umfassen soll. Ausgehend von einer ökonomischen Kostentreiberanalyse werden mittels dreier Verfahren Grundmodelle hergeleitet. Diese Grundmodelle werden im Rahmen der Modellspezifikation weiterentwickelt und die Effizienzgrenze inkl. zugehöriger Ausreißer- und Second-Stage-Analysen geschätzt.

Die ersten beiden Module sind eng verzahnt, indem Erkenntnisse im Rahmen der KTA Ing in entsprechenden Parameterdefinitionen einfließen. Ebenfalls spielen ingenieurwissenschaftliche Beurteilungen in die Validierung der Rohdaten der Netzbetreiber hinein. In Modul III ist das Vorgehen spätestens ab der Modellspezifikation stark iterativ, indem Erkenntnisse aus der Schätzung der Effizienzgrenze und aus den Ausreißer- und Second-Stage-Analysen wiederum in die Modellentwicklung einfließen.

Tabelle 1: Ausgewählte Meilensteine im Projektverlauf

Meilenstein	Termin	Inhalt
Beginn der Arbeiten	29.8.2016	
Übermittlung der Strukturdaten an Gutachter	Ab 9.9.2016	
Versand Datenstand Strukturdaten an Netzbetreiber mit Auswertungen	13.12.2016	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aktueller Datenstand aufbereitet ▪ Graphische Darstellungen der GIS-Daten ▪ Ausgewählte Auswertungen / Kennzahlen, deskriptive Statistiken
Übermittlung der Kostendaten an Gutachter	Ab 14.2.2017	
Versand Daten- und Parameterquittungen Strukturdaten inkl. Arbeitsstand Parameterdefinitionen	17.3.2017, 9.6.2017, 7.8.2017	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Jeweiliger aktueller Datenstand aufbereitet ▪ Graphische Darstellungen der GIS-Daten ▪ Ausgewählte Auswertungen ▪ Zugehörige Vergleichsparameter inkl. Dateianhänge und Dokument Parameterdefinitionen
Konsultation	2.5.2017	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Provisorische Ergebnisse Datenvalidierung ▪ Provisorische Ergebnisse KTA Ing ▪ Methoden und Gütekriterien Effizienzvergleich
Versand von Datenquittungen zu den gebietsstrukturellen Daten	27.07.2017, 31.08.2017	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Leitungen bzw. Leitungsabschnitte und Korridor ▪ Ermittelte gebietsstrukturelle Daten (Bodenklassen, Grabbarkeit, mittlere Hangneigung und maximale Höhendifferenz) ▪ Bericht zur Ableitung der gebietsstrukturellen Daten
Finale Strukturdaten	22.9.2017	
Finale Kostendaten	4.12.2017	
Gutachten	Vorliegend	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ergebnisse, Dokumentation

Quelle: Eigene Darstellung

Im Rahmen der Arbeiten werden die Netzbetreiber und Vertreter der betroffenen Wirtschaftskreise und Verbraucher an verschiedenen Stellen einbezogen (dunkelblaue Elemente in Abbildung 1). Frühzeitig wurden Datenquittung mit ausgewählten deskriptiven Statistiken und Auswertungen an die Netzbetreiber zurückgespielt, diesen später ausführliche Parameterquittung inkl. Parameterdefinitionen zur Verfügung gestellt, zur Parameterwahl konsultiert und die provisorischen Resultate im Rahmen eines Gutachtens dokumentiert (vorliegend). Die untersuchten gebietsstrukturellen Daten wurden ebenfalls als separate Datenquittung an die Netzbetreiber übermittelt. Die Ermittlung dieser Daten sowie die jeweils erstellte Datenquittung sind nicht Inhalt dieses Gutachtens, sondern eines separaten Dokuments, welches den Netzbetreibern zur Verfügung gestellt wurde.

Im Projektverlauf ergaben sich die in **Tabelle 1** dargestellten Meilensteine.

1.3.2 Resultate Anhörungen

Die Anliegen der Netzbetreiber wurden an verschiedenen Stellen aufgenommen.

Daten- und Parameterquittungen mit Parameterdefinitionen

Daten- und Parameterquittungen inklusive detaillierter Beschreibung zur Bildung der Parameter wurden vorgängig zur Konsultation im März 2017, im Juni und im August zur Verfügung gestellt. Rückmeldungen betrafen u.a. die Nachvollziehbarkeit der Berechnungen zur Mantelfläche sowie der Druckparameter mit mengengewichtetem Betriebsdruck. Als Folge wurde die Berechnung dieser Parameter leicht angepasst, um allen möglichen Konstellationen der Netzbetreiber gerecht zu werden.

Konsultation¹

Die Konsultation fand am 2.5.2017 in Bonn statt. Präsentiert wurden den Teilnehmern die wesentlichen Inhalte und Resultate der Module I und II. Zudem wurden die Methoden und Gütekriterien für Modul III vorgestellt. Anschließend standen die Referenten dem Konsultationskreis für eine ausführliche Diskussion zur Verfügung. Dem Konsultationskreis wurde überdies die Möglichkeit zur schriftlichen Stellungnahme gegeben.

Die eingegangenen Stellungnahmen äußerten sich nicht zur Datenvalidierung (Ergebnisse Modul I). Sie kritisierten in einigen Punkten die Ergebnisse der KTA Ing inklusive Referenznetzanalyse (Modul II). In diesem Zusammenhang wird nachfolgend näher auf die Inhalte, die Aussagekraft sowie die Verwendung der Referenznetzanalyse eingegangen (insb. Abschnitt 4.4.1; die qualitativen ingenieurwissenschaftlichen Einschätzungen finden sich in Abschnitt 4.3). Eine konkrete Änderung der präsentierten Gesamteinschätzung der Parameter wurde nicht vorgeschlagen, jedoch wurden einige Parameter kritisch betrachtet (Transportmoment, etwas weniger ausgeprägt Transportwurzelmoment; Bodenklassen), andere Parameter wurden als wichtiger eingestuft (Polygonfläche). Es wurden keine Wünsche geäußert, weitere Parameter zu bilden oder die vorgenommenen Definitionen und Berechnungsweisen der untersuchten Parameter anzupassen (mit Ausnahme der Ein- und Ausspeisepunkte, wo entsprechend Punkte, die bei vergangenen Effizienzvergleichen als redundant angesehen und aus der Gesamtzahl herausge-

¹ Im Abschnitt werden die Inhalte der Konsultationsveranstaltung sowie der Stellungnahmen grob dargestellt. Die eigentlichen Erwidierungen bzw. Erläuterungen zu den aufgeworfenen Fragen und Inhalten werden näher in den entsprechenden Abschnitten und Kapiteln dieses Gutachtens explizit oder implizit erörtert.

rechnet wurden, nun anders in die Parameterberechnung eingehen, vgl. Abschnitt I.2.4). Demgegenüber wurde eine vierte Versorgungsdimension hinsichtlich der Flexibilität der Netze gewünscht, jedoch ohne konkreten Hinweis auf entsprechende aussagekräftige Parameter. Als Folge der Rückmeldungen wurde die abschließende ingenieurwissenschaftliche Einschätzung der Parameter leicht angepasst (vgl. Abschnitt 4.5).

Bezüglich des Effizienzvergleichs in Modul III wurden von den Netzbetreibern die vorgeschlagenen Methoden und Gütekriterien zur Kenntnis genommen. Es wurde gefordert, das vorgeschlagene rein statistische Bottom-up-Verfahren möglichst umfassend zur Anwendung zu bringen und grundsätzlich alle hoch korrelierten Parameter zu berücksichtigen, um eventuelle Pfadabhängigkeiten aus einer gegebenenfalls fehlerhaften ingenieurwissenschaftlichen Einschätzung der Eignung zu vermeiden. Dem Anliegen wurde insofern entsprochen, als das Bottom-up-Verfahren breiter durchgeführt wurde als ursprünglich geplant (vgl. Abschnitt 5.4.3). Zudem wurde gefordert, aufgrund der im Vergleich zur zweiten Regulierungsperiode größeren Anzahl an Netzbetreibern einen vierten Parameter ins Effizienzvergleichsmodell aufzunehmen (zur Anzahl der Parameter im Effizienzvergleich vgl. Abschnitt 5.3.3). Das finale Modell weist vier Parameter auf.

Mitteilung Effizienzwerte

Am 17.10.2017 wurde den Netzbetreibern gestützt auf den aktuellen Datenstand das gewählte Effizienzvergleichsmodell mit zugehörigen Effizienzwerten auf provisorischer Basis mitgeteilt. Ein Netzbetreiber nahm hierzu Stellung. Gestützt auf notwendige Änderungen in den Kostendaten wurden anschließend sämtliche Schritte nochmals durchgeführt (insbesondere KTA Oec und Modellentwicklung). Dabei konnte das zuvor gewählte Effizienzvergleichsmodell bestätigt werden, wobei die Wahl noch klarer zu Gunsten dieses Modells ausgefallen ist. Die zugehörigen Effizienzwerte hat die BNetzA den Netzbetreibern am 22.12.2017 mitgeteilt.

Gutachten

Schließlich besteht für die Netzbetreiber die Möglichkeit, zum vorliegenden ausführlichen Gutachten Stellung zu beziehen.

1.4 Struktur des Berichts

Der Bericht gliedert sich wie folgt:

- **Kapitel 2** fasst die ökonomischen und rechtlichen Grundlagen zusammen;
- **Kapitel 3** dokumentiert die vorgenommene Datenvalidierung;
- **Kapitel 4** enthält die wichtigsten Ergebnisse der KTA Ing;
- **Kapitel 5** dokumentiert den vorgenommenen Effizienzvergleich;
- **Kapitel 6** fasst das Vorgehen und die wichtigsten Ergebnisse zusammen.

2 Grundlagen²

Dieses Kapitel beschreibt die ökonomischen Grundlagen der Effizienzmessung, die rechtlichen Vorgaben für die Anreizregulierung in Deutschland sowie die gewählte Terminologie.

2.1 Einbettung von Effizienzvergleichen in die Anreizregulierung

Gasfernleitungsnetze sind – wie viele weitere physische Netze – natürliche Monopole, die nicht bestreitbar sind (sogenannte monopolistische Engpässe).³ Die Gasfernleitungsnetze in Deutschland sind daher als regionale Monopole organisiert. Dies bedeutet, dass für die einzelnen Fernleitungsnetzbetreiber aufgrund des geringfügig vorhandenen direkten oder indirekten Wettbewerbs mit anderen Anbietern möglicherweise keine ausreichenden Anreize zur effizienten Leistungserstellung gegeben sind.

In den letzten Jahrzehnten sind daher vermehrt Regulierungsansätze mit dynamischen Preisobergrenzen umgesetzt worden, um die Kosteneffizianzanreize der einzelnen Akteure zu erhöhen. Effizienzvergleiche spielen bei der sog. Anreizregulierung eine wesentliche Rolle. Sie haben zum Ziel, die Effizienz eines Netzbetreibers im Vergleich zur „Best practice“ der Branche zu messen und die Preisfestsetzung jedes Netzbetreibers an seine relative Effizienz zu koppeln.

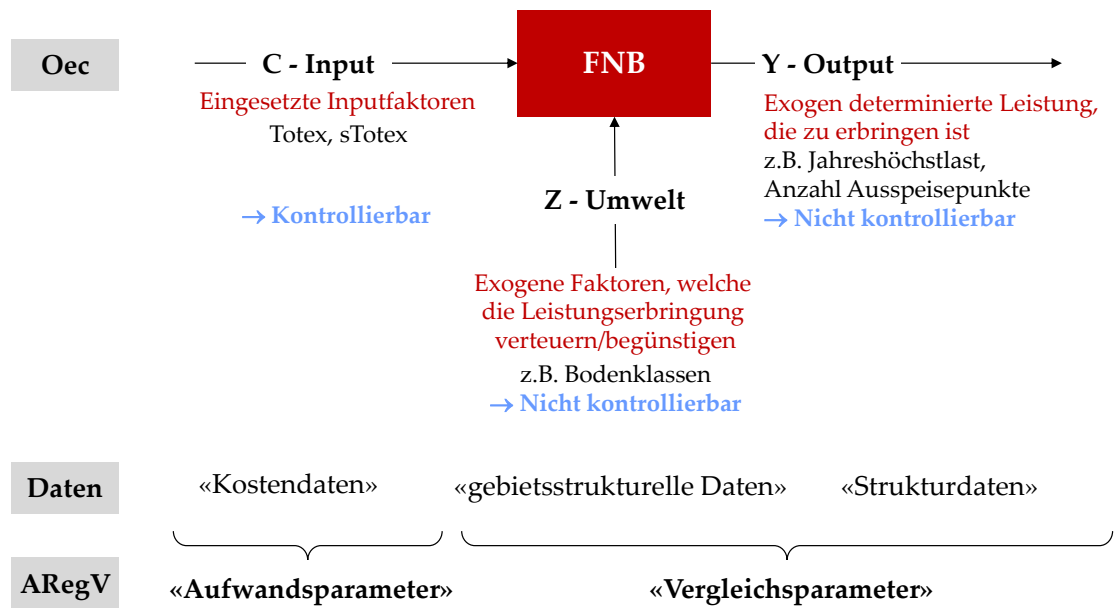
In Deutschland wurde eine solche Anreizregulierung mit der ARegV im Jahr 2007 beschlossen und im Jahr 2009 (Beginn der ersten Regulierungsperiode) eingeführt. Zu diesem Zeitpunkt erfolgten erstmals nationale Effizienzvergleiche für die Betreiber der Fernleitungs- und Verteilernetze (FNB und VNB). Gestützt auf die ARegV führt die BNetzA im Hinblick auf die dritte Regulierungsperiode zum dritten Mal einen Effizienzvergleich für die FNB in Deutschland durch. Die festgestellte Effizienz eines Fernleitungsnetzbetreibers bestimmt mit, welche Erlösobergrenzen für diesen während der nächsten Regulierungsperiode gelten bzw. welchen Anteil der beeinflussbaren Kosten dieser bei der Festlegung der Netzentgelte berücksichtigen darf.

Bei Effizienzvergleichen werden die Kosten C eines Fernleitungsnetzbetreibers, also sein Aufwand bzw. Input, mit dessen Versorgungsaufgabe Y unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen Z verglichen, wie in **Abbildung 2** schematisch und idealtypisch dargestellt. Während die auch als „Kostendaten“ bezeichneten „Aufwandsparameter“ C dadurch gekennzeichnet sind, dass sie durch den FNB steuerbar sind, werden zur Beschreibung sowohl der Versorgungsaufgabe wie auch der Rahmenbedingungen möglichst Parameter gewählt, die zumindest in erster Näherung nicht vom FNB kontrolliert werden können. Die Parameter Y und Z werden in der ARegV zusammengenommen als „Vergleichsparameter“ bezeichnet. Die zugehörigen Daten werden nachfolgend für Y Parameter als Strukturdaten referenziert (grundsätzlich geliefert von den einzelnen Netzbetreibern) und für Z Parameter als gebietsstrukturelle Daten (bereitgestellt durch die BNetzA).

² Das Kapitel basiert auf Swiss Economics (2014).

³ Ein natürliches Monopol bedeutet, dass im relevanten Teil der Nachfrage die Gesamtkosten dann am niedrigsten sind, wenn nur ein Unternehmen das jeweilige Gebiet versorgt. Da überdies ein Großteil der Kosten irreversibel ist und keine Substitute zum Gastransport vorhanden sind, handelt es sich um ein nicht bestreitbares natürliches Monopol (monopolistischer Engpass bzw. „Essential Facility“).

Abbildung 2: Analyserahmen



Quelle: In Anlehnung an Swiss Economics (2014)

Ein solcher Vergleich zeigt, wie kosteneffizient die einzelnen FNB im Vergleich zu den übrigen FNB arbeiten. Die beiden verwendeten Methoden, DEA und SFA, berechnen bzw. schätzen den Zusammenhang zwischen C und Y unter Berücksichtigung von Z über alle FNB. Was nicht mittels der verwendeten Vergleichsparameter erklärbar ist, wird ganz (DEA) oder teilweise (SFA) der Ineffizienz zugeschrieben. Die Grundlagen dieser beiden Methoden werden nachfolgend im Abschnitt 2.2 erläutert.

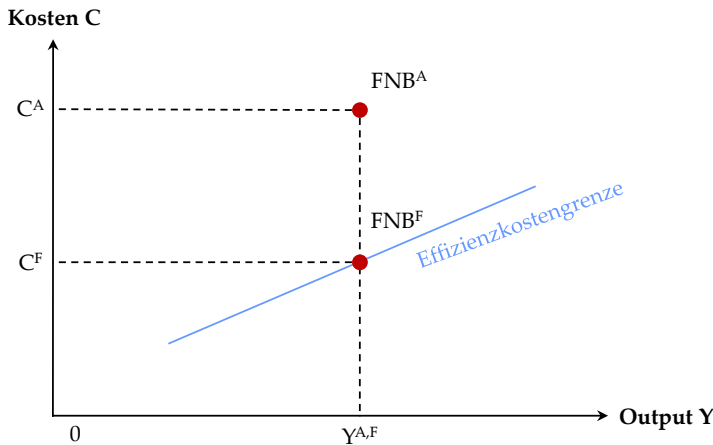
2.2 Ökonomische Grundlagen der Effizienzmessung

Die mikroökonomische Theorie unterscheidet verschiedene Arten der Effizienz. Die produktive Effizienz setzt sich aus technischer und allokativer Effizienz zusammen, wobei die technische Effizienz als minimale Inputmenge zur Produktion eines bestimmten Outputs und die allokativer Effizienz als optimale Inputkombination zur Produktion eines bestimmten Outputs definiert ist.

Vorliegend ist die technische Kosteneffizienz relevant (je Netzbetreiber minimale Kosten zur Bereitstellung der nachgefragten Outputs als Referenzpunkt für die Festlegung von Erlösobergrenzen). Zur Messung der technischen Kosteneffizienz stehen verschiedene Konzepte zur Verfügung. Beim Konzept der Effizienzkostengrenze dienen die Kostenfunktionen der besten Unternehmen als Referenz für alle anderen Unternehmen. **Abbildung 3** stellt diesen Zusammenhang schematisch dar. FNB^F ist für FNB^A die Referenz („Best Practice“ bzw. „Peer“), indem es den gleichen Output Y zu geringeren Kosten X erbringen kann. Die blaue Linie stellt die Effizienzkostengrenze dar („Frontier“).

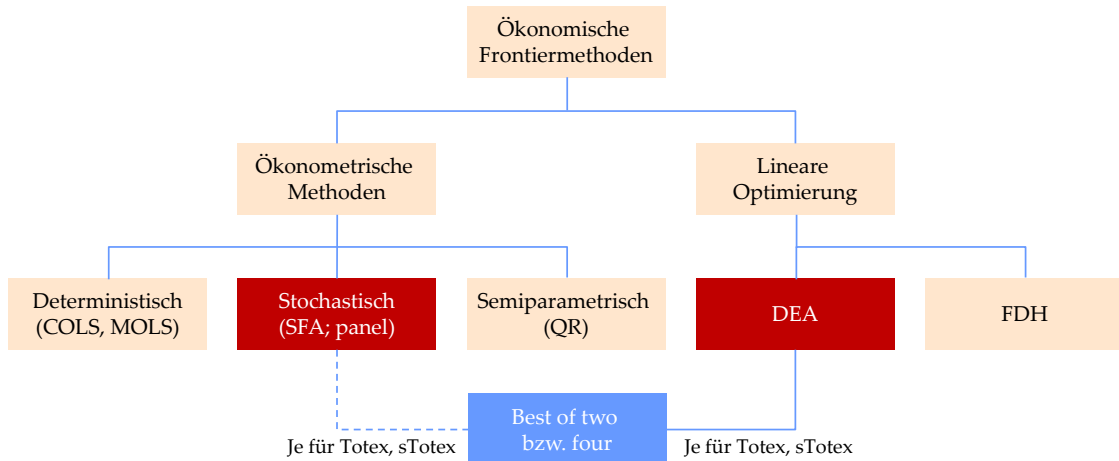
Abbildung 4 zeigt einen generellen Überblick über die wichtigsten ökonomischen Ansätze zur Schätzung von Effizienzkostengrenzen. Sie haben gemein, dass der Effizienzvergleich aufgrund der ökonomischen Größen Input und Output berechnet wird. Sie lassen sich grundsätzlich in zwei Klassen einteilen: ökonometrische Methoden und Methoden der linearen Optimierung.

Abbildung 3: Illustration Effizienzkostengrenze



Quelle: In Anlehnung an Filippini et al. (2011)

Abbildung 4: Übersicht der Methoden



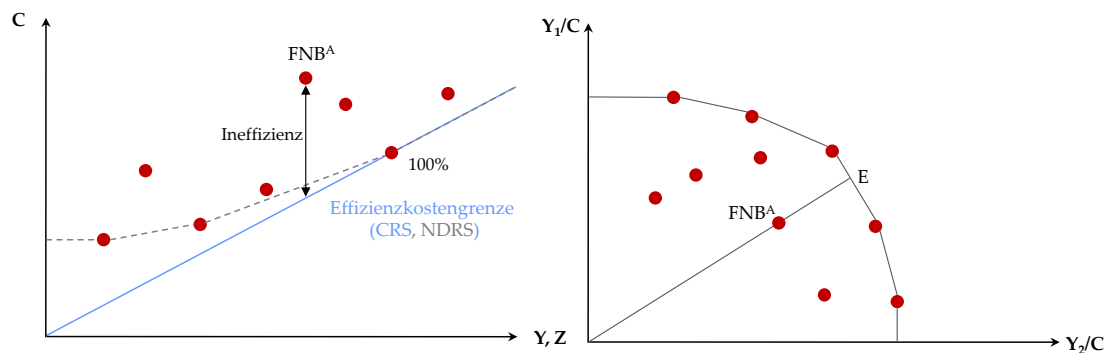
Quelle: Aufbauend auf Filippini et al. (2011)

Die ARegV (Anlage 3 zu §12) schreibt zur Schätzung der Effizienzkostengrenze und somit zur Schätzung der Kosteneffizienz zwei dieser Methoden vor, je eine lineare Optimierung und eine ökonometrische Schätzung: die DEA (Charnes et al. 1978) und die SFA (Aigner et al. 1977). Einführungen hierzu können in Bogetoft und Otto (2011) oder Bogetoft (2012) nachgelesen werden. In den folgenden beiden Kapiteln werden die wesentlichen Elemente von DEA und SFA näher beschrieben. Für die SFA gilt bei FNB die Einschränkung, dass diese nur dann durchzuführen ist, wenn Daten für eine hinreichende Anzahl an Netzbetreibern zur Verfügung stehen (§ 22 Abs. 3 S. 2 ARegV). Auf die Anwendbarkeit der Methode SFA im Effizienzvergleich der deutschen Fernleitungsnetzbetreiber wird an späterer Stelle in Abschnitt 5.5.1.1 eingegangen.

2.2.1 DEA

Bei den Methoden der linearen Optimierung werden Output und Input ins Verhältnis gesetzt, ohne a priori Annahmen über dieses Verhältnis – beispielsweise zur funktionalen Form – treffen zu müssen. Dabei wird die Effizienzgrenze nicht wie bei ökonometrischen Methoden geschätzt, sondern durch lineare Optimierung errechnet. Bei der DEA wird für jedes Unternehmen ein Quotient aus Inputs (im Kontext der Kosteneffizienz entsprechen Kosten den Inputs) und dem erbrachten Output⁴ berechnet unter der Nebenbedingung, dass der Effizienzwert zwischen null und eins liegt. Dabei sind alle Unternehmen, die bei diesem partiellen Input-Output Verhältnis den höchsten Wert erzielen, relativ effizient („Peers“) und erhalten einen Effizienzwert von 100% (vgl. **Abbildung 5, linke Seite**). Sie bilden die Eckpunkte der Effizienzkostengrenze, die durch lineare Kombination dieser relativ effizienten Unternehmen gebildet wird und somit alle restlichen, relativ ineffizienten Unternehmen mehrdimensional umhüllt. Die Kosteneffizienz eines Unternehmens wird durch den relativen Abstand zur Effizienzkostengrenze bestimmt (vgl. **Abbildung 5, rechte Seite**). FNBA^A ist demnach erkennbar ineffizient, weil es nicht auf dem effizienten Rand liegt. Der Grad der Ineffizienz lässt sich graphisch veranschaulichen durch den Quotienten der Strecke $\overline{FNBA^AE}$ und $\overline{0E}$.

Abbildung 5: Schematische Darstellung einer DEA



Quelle: In Anlehnung an Swiss Economics (2014)

Die DEA kann mit fallenden, konstanten, nicht fallenden oder variablen Skalenerträgen spezifiziert werden.⁵ Neu gibt die ARegV vor, dass konstante Skalenerträge (CRS) zu unterstellen sind, dass also anzunehmen ist, dass eine Änderung der Output-Faktoren zu einer proportionalen Änderung der Kosten führt – etwa eine Verdopplung der Output-Faktoren eine Verdopplung der Kosten bewirkt. Somit ist im Gegensatz zu den vorherigen Effizienzvergleichen eine Bereinigung um Größenvorteile nicht mehr zulässig. Die graue, gestrichelte Umhüllende stellt eine DEA mit nicht fallenden Skalenerträgen dar (NDRS). Bei variablen Skalenerträgen wäre ebenfalls die grau gestrichelte Kurve zu verwenden und lediglich so anzupassen, dass auch der FNB ganz rechts Teil der Kostengrenze wird, da hier die Umhüllende im Gegensatz zu NDRS auch stärker als die CRS-Gerade steigen darf.

⁴ Im Rahmen des Effizienzvergleichs ist die Erfüllung der Versorgungsaufgabe – ggf. unter Berücksichtigung von Umweltfaktoren – die Output-Leistung.

⁵ Fallende Skalenerträge implizieren Größennachteile, konstante Skalenerträge Größenunabhängigkeit, nicht fallende Skalenerträge Größenunabhängigkeit oder Größenvorteile, und variable Skalenerträge Größenvor- oder Größennachteile.

2.2.2 SFA

Das Basismodell der SFA kann folgendermaßen beschrieben werden:

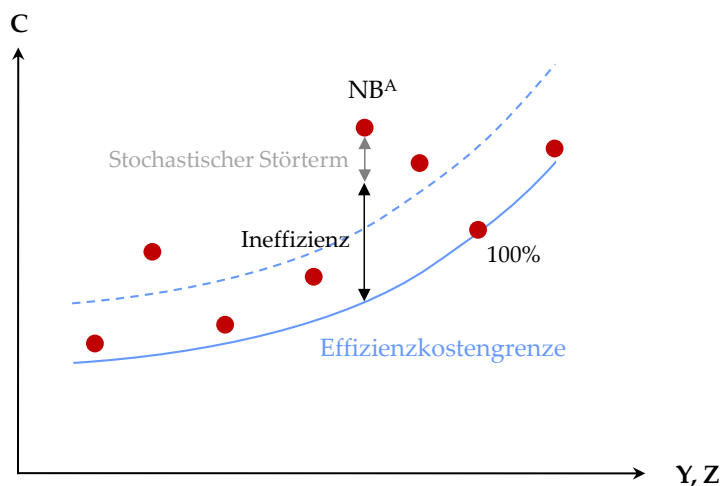
$$C_i = f(Y_i; Z_i; P_i) + \alpha + u_i + v_i.$$

Dabei bezeichnet Index i den jeweiligen Fernleitungsnetzbetreiber, der abhängige Parameter C die Kosten, Y die Output-Leistung, Z weitere unabhängige Parameter (bspw. gebietsstrukturelle Parameter), P die Inputpreise und f die funktionale Form. Der Parameter α steht für eine allgemeine Konstante, u beschreibt die Ineffizienz und v den stochastischen Störterm (individuelle zufällige Charakteristik).

Die SFA vermag also – anders als die DEA –, zwischen Ineffizienzen und stochastischen Störtermen zu unterscheiden. Dies wird erreicht, indem die SFA nicht den ganzen Abstand zur Effizienzgrenze (Residuen) als Ineffizienz ausgibt, sondern diesen Abstand in einen symmetrisch um Null verteilten stochastischen Störterm und einen positiv verteilten Ineffizienz-Term zerlegt. Hierzu wird a priori eine Annahme zur Verteilung dieser beiden Terme getroffen.

Abbildung 6 illustriert vereinfacht die Funktionsweise einer SFA. Die unterbrochene Linie zeigt die geschätzte allgemeine Kostenfunktion $C=f(Y)$, die durchgezogene Linie stellt die daraus abgeleitete Effizienzgrenze dar, welche am Peer ausgerichtet wird. Die Distanz eines FNB zur Effizienzgrenze teilt sich in Ineffizienz und den stochastischen Störterm.

Abbildung 6: Schematische Darstellung einer SFA



Quelle: Basierend auf Swiss Economics (2014)

2.2.3 Zusammenspiel von DEA und SFA

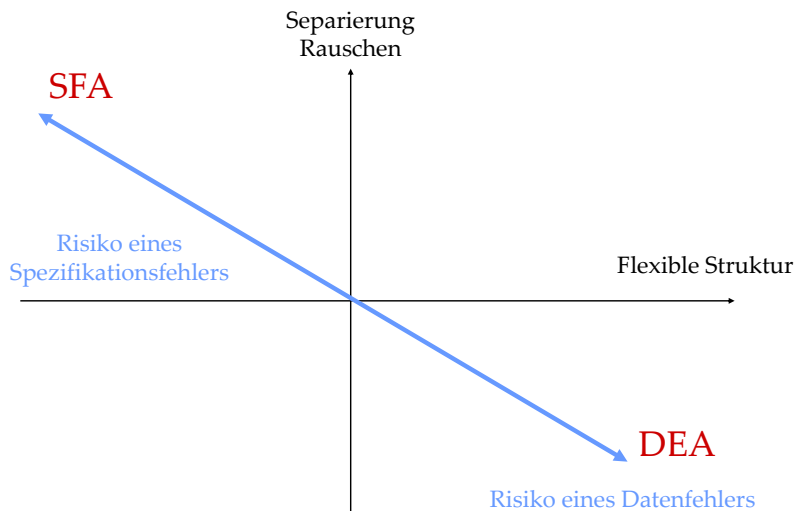
DEA und SFA haben für sich genommen Vor- und Nachteile. Daher wird im Rahmen der Effizienzwertermittlung gem. Anlage 3 ARegV eine Kombination beider Methoden gewählt.

Die SFA ermöglicht im Vergleich zur DEA die Separierung des stochastischen Störterms von der Ineffizienz, was in Abbildung 7 als Separierung des Rauschens bezeichnet wird. Dadurch wird das Risiko gesenkt, dass individuelle Besonderheiten als Ineffizienzen fehlinterpretiert werden. Im Gegensatz dazu müssen im Rahmen der DEA weder Annahmen zur Verteilung

dieser beiden Terme noch eine Annahme zur funktionalen Form getroffen werden, was eine flexible Struktur ermöglicht und das Risiko eines Spezifikationsfehlers senkt.

Die nachfolgende **Abbildung 7** zeigt dieses Zusammenspiel graphisch.

Abbildung 7: Zusammenspiel von DEA und SFA



Quelle: SUMICSID (2007)

Soll das Vorsichtsprinzip angewendet werden um möglichst zu vermeiden, dass eines der beiden Risiken eintritt und den Effizienzvergleich in Richtung zu geringer Effizienzwerte verfälscht, können, sofern ausreichend Beobachtungen vorliegen, beide Verfahren durchgeführt werden und mittels Best-of Verfahren für einen Netzbetreiber der jeweils bessere Effizienzwert verwendet werden. Dies verlangt die ARegV gem. § 12 Abs. 3 ARegV, vorausgesetzt es liegen ausreichend Beobachtungen für eine SFA vor.

2.3 Rechtliche Vorgaben

Der Effizienzvergleich und die dabei zu beachtenden Rahmenbedingungen sind in der ARegV kodifiziert. Gemäß § 22 Abs. 3 ARegV sind bei Betreibern von Fernleitungsnetzen Effizienzwerte mittels eines nationalen Effizienzvergleichs zu ermitteln, soweit Daten einer hinreichenden Anzahl von Netzbetreibern zur Verfügung stehen.

2.3.1 Einordnung des Effizienzvergleichs in die Anreizregulierung

Die Erlösobergrenzen zu den Energieversorgungsnetzen der FNB werden gem. § 1 ARegV seit dem 1.1.2009 im Wege der Anreizregulierung bestimmt. Hierzu werden gem. §§ 4 und 7 ARegV Obergrenzen der zulässigen Gesamterlöse eines Netzbetreibers in Anwendung der Regulierungsformel in Anlage 1 ARegV festgesetzt.

Wesentliches Element hierbei ist die individuelle Effizienz eines Netzbetreibers, auf deren Grundlage der entsprechend abzubauenen Kostenanteil gem. § 11 ARegV ermittelt wird. Für Netzbetreiber, die im Effizienzvergleich als effizient ausgewiesen werden, gilt gem. Anlage 3 ARegV ein Effizienzwert in Höhe von 100%, für alle anderen Netzbetreiber ein entsprechend niedrigerer Wert. Effizienzberechnungen und daraus abgeleitet abzubauenen ineffizienten Kosten beziehen sich stets nur auf die vom FNB grundsätzlich beeinflussbaren Kosten. Bei der Be-

stimmung reduzierter Erlösbergrenzen sind dauerhaft nicht beeinflussbare Kostenanteile außer Betracht – also ungekürzt – zu lassen, der noch nicht sofort abzubauen Teil der ineffizienten Kosten wird als „vorübergehend nicht beeinflussbare Kosten“ bezeichnet.

Zur Ermittlung individueller Effizienzwerte der Fernleitungsnetzbetreiber sehen § 22 Abs. 3 und 4 ARegV die Durchführung eines nationalen Effizienzvergleichs vor. Es sind dabei die in der Anlage 3 zu § 12 ARegV genannten Methoden zu verwenden. Der Effizienzvergleich ist nach § 12 Abs. 2 bis 4, § 13 Abs. 1 und 3 und § 14 ARegV i.V.m. Anlage 3 ARegV durchzuführen, woraus sich ein individueller Effizienzwert je FNB zwischen 60% und 100% ergibt.

2.3.2 Inhaltliche Vorgaben zum Effizienzvergleich

Gem. § 22 Abs. 3 und 4 ARegV i.V.m. Anlage 3 Nr. 1 ARegV sollen die Methoden DEA und SFA zur Anwendung gelangen:

- **DEA:** „DEA im Sinne dieser Verordnung ist eine nicht-parametrische Methode, in der die optimalen Kombinationen von Aufwand und Leistung aus einem linearen Optimierungsproblem resultieren. Durch die DEA erfolgt die Bestimmung einer Effizienzgrenze aus den Daten aller in den Effizienzvergleich einzubeziehenden Unternehmen und die Ermittlung der relativen Positionen der einzelnen Unternehmen gegenüber dieser Effizienzgrenze.“
- **SFA:** „Die SFA ist eine parametrische Methode, die einen funktionalen Zusammenhang zwischen Aufwand und Leistung in Form einer Kostenfunktion herstellt. Im Rahmen der SFA werden die Abweichungen zwischen den tatsächlichen und den regressionsanalytisch geschätzten Kosten in einen symmetrisch verteilten Störterm und eine positiv verteilte Restkomponente zerlegt. Die Restkomponente ist Ausdruck von Ineffizienz. Es wird somit von einer schiefen Verteilung der Restkomponente ausgegangen.“

Stehen für die Durchführung einer SFA nicht die Daten einer hinreichenden Anzahl an Netzbetreibern zur Verfügung, findet ausschließlich die DEA Anwendung (§ 22 Abs. 3 S. 2 ARegV). § 12 Abs. 2 bis 4, § 13 Abs. 1, 2 und 3 und § 14 ARegV finden entsprechend Anwendung.

Weitere Vorgaben zur Methodik befinden sich in Anlage 3 ARegV:

- Einbezug aller Netzebenen, keine Ermittlung von Teileffizienzen je Netzebene (Nr. 3);
- Bei der Durchführung der DEA sind konstante Skalenerträge zu unterstellen (Nr. 4);
- Durchführung von Ausreißeranalysen zur Identifikation von extremen Effizienzwerten nach dem Stand der Wissenschaft [nachfolgend referenziert als Ausreißeranalyse] (Nr. 5);

Die im Rahmen des Effizienzvergleichs als **Aufwandsparameter** [C-Variablen] anzusetzenden Kosten sind gem. § 14 ARegV die Gesamtkosten abzüglich der dauerhaft nicht beeinflussbaren Kosten. Die Kosten sind gem. § 14 ARegV mittels einer Vergleichbarkeitsrechnung anzupassen, um mögliche Verzerrungen bei Kapitalkosten zu begrenzen. Die relevanten Gesamtkostenanteile vor Vergleichbarkeitsrechnung werden nachfolgend mit „nicht standardisiert“ bzw. „Totex“ bezeichnet, die Kosten nach Vergleichbarkeitsrechnung mit „standardisiert“ bzw. „sTotex“. DEA und SFA sind gem. § 12 Abs. 4a ARegV ergänzend auch für nicht standardisierte Kosten durchzuführen.

Vergleichsparameter sind gem. § 13 Abs. 3 „Parameter zur Bestimmung der Versorgungsaufgaben [Y-Variablen] und der Gebietseigenschaften, insb. geografische, geologische oder topografische Merkmale sowie strukturelle Besonderheiten der Versorgungsaufgabe auf Grund demografischen Wandels des versorgten Gebietes [Z-Variablen]“.

Absatz 3 stellt eine Reihe von Vorgaben an die Wahl der Vergleichsparameter:

- Die Vergleichsparameter müssen „geeignet sein, die Belastbarkeit des Effizienzvergleichs zu stützen.“ Dies ist insbesondere dann anzunehmen, wenn sie messbar oder mengenmäßig erfassbar, nicht durch Entscheidungen des Netzbetreibers bestimmbar und nicht in ihrer Wirkung ganz oder teilweise wiederholend sind, insbesondere nicht bereits durch andere Parameter abgebildet werden (§ 13 Abs. 3 S. 2 und 3).
- „Vergleichsparameter können insbesondere sein
 - die Anzahl [...] der Ausspeisepunkte oder der Messstellen in Gasversorgungsnetzen,
 - die Fläche des versorgten Gebietes,
 - die Leitungslänge oder das Rohrvolumen,
 - die Jahresarbeit,
 - die zeitgleiche Jahreshöchstlast,
 - [...]“ (§ 13 Abs. 3 S. 4).
- Bei der Bestimmung von Z-Variablen können flächenbezogene Durchschnittswerte gebildet werden (§ 13 Abs. 3 S. 5).
- Vergleichsparameter können bezogen auf die verschiedenen Netzebenen verwendet werden; ein Vergleich einzelner Netzebenen findet nicht statt (§ 13 Abs. 3 S. 6).
- Die Auswahl der Vergleichsparameter hat mit qualitativen, analytischen oder statistischen Methoden zu erfolgen, die dem Stand der Wissenschaft entsprechen (§ 13 Abs. 3 S. 7).
- Durch die Auswahl der Vergleichsparameter soll die strukturelle Vergleichbarkeit möglichst weitgehend gewährleistet sein und die Heterogenität der Aufgaben der Netzbetreiber soll möglichst weitgehend abgebildet werden (§ 13 Abs. 3 S. 8). Dabei sind die Unterschiede zwischen Strom- und Gasversorgungsnetzen zu berücksichtigen, insbesondere der unterschiedliche Erschließungs- und Anschlussgrad von Gasversorgungsnetzen (§ 13 Abs. 3 S. 9).
- Bei der Auswahl der Vergleichsparameter sind Vertreter der betroffenen Wirtschaftskreise und der Verbraucher rechtzeitig zu hören (§ 13 Abs. 3 S. 10).

Demnach sind die rechtlichen Rahmenbedingungen für die in diesem Gutachten durchzuführende ingenieurwissenschaftliche Kostentreiberanalyse in § 13 Abs. 3 ARegV definiert.

Bezüglich der **Festlegung der Effizienzwerte** werden in der ARegV folgende wesentlichen Vorgaben gemacht:

- Der *maximale Effizienzwert* liegt gem. Anlage 3 ARegV bei 100%.
- Der *minimale Effizienzwert* liegt gem. § 12 Abs. 4 Satz 1 ARegV bei 60%.
- *Bestabgerechnete Effizienzwerte*: Gestützt auf § 12 Abs. 3 und die gegebene Anwendbarkeit von § 14 wird vorliegend davon ausgegangen, dass ein Best-of-four Verfahren im Sinne von § 12 Abs. 4a durchzuführen ist. D.h. es wird jeweils der höchste Effizienzwert aus den beiden Methoden DEA und SFA verwendet, wobei je Methode *zusätzlich zu sTotex*⁶ auch eine Berechnung mit nicht standardisierten Aufwandsparametern (Totex) zu Grunde gelegt werden soll, ohne dabei die Vergleichsparameter zu ändern (Abs. 4a). Damit sind je FNB vier

⁶ Aus der Formulierung kann gefolgert werden dass die Modellbildung primär mit Blick auf die standardisierten Kosten (sTotex) erfolgt und Effizienzwerte auf der Basis nicht standardisierter Kosten (Totex) im Sinne des Vorsichtsprinzips ebenfalls berechnet werden, um eine Schlechterstellung auszuschliessen.

Effizienzwerte zu berechnen bzw. zwei falls die SFA nicht zur Anwendung kommen kann. Der jeweils beste Wert gilt, so er über dem Minimum von 60% liegt, als Grundlage für die Bestimmung der Erlösbergrenze.

Schließlich macht die ARegV einige prozeduralen Vorgaben zum Effizienzvergleich. Im Wesentlichen sind dies die Anhörung der betroffenen Wirtschaftskreise und Verbraucher bezüglich der Auswahl der Vergleichsparameter (gem. § 13 Abs. 3 ARegV), wobei vorliegend auch zur Ausgestaltung der Methoden konsultiert wird (in Anlehnung an § 12 Abs. 1 ARegV).

2.4 Terminologie

Gestützt auf die obigen Grundlagen wird nachfolgend die Terminologie gemäß **Tabelle 2** gewählt. Die Bezeichnungen „Variablen“ und „Parameter“ werden demnach synonym verwendet.

Tabelle 2: Klassifizierung und Terminologie Parameter und Daten

Parameter = Variable	Daten (für jeden FNB existiert je Parameter/Variable genau ein Wert, $k=1, \dots, K$, d.h. $(N+M+L)*K$ Werte)	Referenz ARegV
Input C $c^n, n=1, \dots, N$	Kostendaten, bei FNB durch BNetzA erhoben und geprüft	Aufwandsparameter
Output Y $y^m, m=1, \dots, M$	Strukturdaten, bei FNB durch BNetzA erhoben und geprüft	Vergleichsparameter
Umwelt Z $z^l, l=1, \dots, L$	Gebietsstrukturelle Daten, ermittelt durch die BNetzA	

Die ARegV bezeichnet die Output- und Umweltvariablen als Vergleichsparameter. Die ARegV lehnt sich damit an der technischen Funktionsweise von DEA und SFA an, welche zwischen Struktur- und gebietsstrukturellen Daten nicht unterscheidet – die ökonomische Natur der verwendeten Parameter also nicht berücksichtigt. Der Unterschied ist jedoch im Prozess der Modellfindung relevant. Die Bezeichnung der erhobenen Daten folgt der ökonomischen Unterscheidung zwischen C, Y und Z Variablen: die Aufwandsparameter C entsprechen den Kostendaten, die Vergleichsparameter Y den Strukturdaten und die Z Parameter den gebietsstrukturellen Daten (vgl. auch Abbildung 2).

3 Datenvalidierung

Die von der BNetzA zur Verfügung gestellten vorplausibilisierten Daten werden mit Blick auf die spätere Verwendung im Effizienzvergleich eingehend entlang der folgenden Schritte validiert:

- Formale Prüfungen
 - Überprüfung des Datensatzes auf Vollständigkeit
 - Überprüfung der Definitionen, Beschreibungen und Datenformate der Datenfelder
- Analytische und statistische Prüfungen
 - Integrität: Identifizierung möglicher Datenfälschungen (Newcomb-Benford)
 - Plausibilität:
 - Graphische Auswertung der Daten
 - Konsistenz und Verhältnisprüfungen
 - Durchführung von Vorjahresvergleichen, Stichproben
- Ggf. individuelle Sonderprüfungen

Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse der Validierung festgehalten.

3.1 Datenmanagement und analysierte Dateien

3.1.1 Datenlieferungen der BNetzA und Lieferungen an die Netzbetreiber

Die Datenlieferung der BNetzA erfolgte gestaffelt in mehreren Runden separat für Kosten, Struktur- und gebietsstrukturelle Daten (wichtigste Termine vgl. Tabelle 1). Entsprechend wurde auch die Validierung gestaffelt durchgeführt:

- 21.11.2016: Präsentation erster Validierungsergebnisse der Strukturdaten im Rahmen der ersten Arbeitssitzung (S1). Gestützt auf die Ergebnisse gelangte die BNetzA Anfang Dezember mit ausgewählten Fragen an die Netzbetreiber, was diese teils zu Anpassungen veranlasste. Zudem wurden in einem Fall Sonderprüfungen gestartet, da der Newcomb-Benford Test Auffälligkeiten anzeigte (vgl. Abschnitt 3.4.1).
- 13.12.2016: Basierend auf dem aktuellen Datenstand wurden den Netzbetreibern die Originaldaten zusammen mit ausgewählten Auswertungen und Standardkommentaren gestellt, ebenfalls wurden Netzkarten der gelieferten georeferenzierten Daten zur Verfügung gestellt und die Möglichkeit eingeräumt (ab dem 4.11.2016), virtuelle Punkte zu melden (vgl. I.1.2). Einige Netzbetreiber haben daraufhin erneute Anpassungen vorgenommen und entsprechend veränderte Daten übermittelt.
- 13.2.2017: Im Rahmen der zweiten Arbeitssitzung (S2) wurde der BNetzA eine aktualisierte Validierung der Strukturdaten zur Verfügung gestellt. Erneut identifizierte die BNetzA auf dieser Basis Netzbetreiber mit Auffälligkeiten im Datensatz.
- 17.3.2017: Mit Datenstand vom 6.3.2017 wurden den Netzbetreibern Daten- und Parameterquittungen mit der Gelegenheit zur Prüfung bis zum 21.4.2017 zur Verfügung gestellt.
- 9.6.2017: Gestützt auf erneute Datenlieferungen im Zusammenhang mit Allokations- und Vertragsdaten, Rückmeldungen von den Netzbetreibern zu den Quittungen vom 16.3.2017 sowie die Parameterwünsche der Netzbetreiber im Rahmen der Konsultation wurden den Netzbetreibern im Juni und August aktualisierte Strukturdaten-Parameterquittungen zur Verfügung gestellt.

- 31.8.2017: Finale Bereitstellung der gebietsstrukturellen Daten durch die BNetzA zur weiteren Verarbeitung.
- 22.9.2017: Finale Bereitstellung der Strukturdaten durch die BNetzA zur weiteren Verarbeitung.
- 4.12.2017: Finale Bereitstellung der Kostendaten durch die BNetzA.

Anhand der final vorliegenden Daten („Datensatz V12“) wurde schließlich die in diesem Bericht wiedergegebene Validierung vorgenommen. Nach Festlegung des finalen Modells wurden die Vergleichsparameter des gewählten Modells erneut validiert. Die nachfolgenden Aussagen beziehen sich auf diesen finalen Stand der Struktur- und Kostendaten. Die provisorischen Effizienzwerte wurden zuvor gestützt auf den Datensatz V11 berechnet.

3.1.2 Struktur der Datenabfrage

Die Daten wurden von der BNetzA unterschiedlich stark aufbereitet zur Verfügung gestellt.

Die Kostendaten wurden vollständig aufbereitet bereitgestellt, d.h. es wurde jeweils je ein Wert Totex und sTotex je Netzbetreiber geliefert, dazu nicht beeinflussbare Kostenanteile sowie die Netzkosten als Summe Letzterer und Totex.

Für die Strukturdaten wurden die von den Netzbetreibern ausgefüllten Erhebungsbögen weitgehend unverändert übergeben. In den Erhebungsbögen sind „Strukturdaten I“ und „Strukturdaten II“ unterschieden:

- Die Strukturdaten I umfassen summarische, nach H- und L-Gas differenzierte Angaben zu Jahresarbeit, Jahreshöchstlast, Verdichter, Gasmischstationen und Leitungen.
- Die Strukturdaten II bestehen aus georeferenzierten Angaben zu einzelnen Anlagen („Assets“) mit Standorten, Knoten, Druckreglern und Verdichtern, Netzkoppelungs- und Netzanschlusspunkten (NKP/NAP) sowie Leitungsabschnitten. Einzelne Netzbetreiber haben dabei mehr als 50'000 Assets gemeldet.

Die Strukturdaten werden entsprechend vorgängig aufbereitet, um hieraus relevante Vergleichsparameter erzeugen zu können.

Bei den gebietsstrukturellen Daten erfolgte die Lieferung in Form von Flächenangaben zu Korridoren um Leitungstrassen differenziert nach Bodenklassen und Grabbarkeit (Tiefenstufen 0-1 Meter und 1-2 Meter), mittlere Hangneigung sowie maximale Höhendifferenz. Aus diesen Angaben können direkt geeignete Vergleichsparameter definiert werden.

3.1.3 Datenmanagement

Aufgrund der gestaffelten, in mehreren Runden erfolgenden Datenlieferungen wurden die umfangreichen Strukturdaten der Netzbetreiber weitgehend automatisiert eingelesen und verarbeitet. Um die Fehleranfälligkeit zu reduzieren, wurde weitestgehend davon abgesehen, manuelle Dateneingaben zu vollziehen. Die Verarbeitung erfolgte entlang der nachfolgenden Schritte:

- Einlesen aller Standorte aller Netzbetreiber und Umrechnung der im Gauß-Krüger-Koordinatensystem (GK) angegebenen Koordinaten in UTM-Entsprechungen gemäß Anhang I.1.1;
- Einlesen und Aufbereitung der Originaldaten je Netzbetreiber in Excel, Ergänzung um umgerechnete GK-Koordinaten, Darstellung aller Standorte in einer Deutschlandkarte, Berech-

nung ausgewählter deskriptiver Statistiken und Vergleichswerte, Formatprüfungen, Speicherung des Resultats in einer neuen Excel-Datei je Netzbetreiber (den Netzbetreibern erstmals am 14.12.2016 zur Verfügung gestellt, vgl. oben);

- Die aufbereiteten Daten je Netzbetreiber werden mit der Software Matlab eingelesen und ein gemeinsamer Datensatz erstellt (zunächst separat für Standorte, Knoten, Druckregler und Verdichter, NKP/NAP und Leitungen);
- Danach erfolgt mittels Matlab die weitere Verarbeitung inklusive Berechnung der Vergleichsparameter:
 - Erstellung von pdf-Karten (eine Übersichtskarte mit den Daten aller Netzbetreiber sowie Einzelkarten je Netzbetreiber, ggf. getrennt nach Gasqualität);
 - Identifikation von vollständigen Teilnetzen (vgl. Anhang I.1.2);
 - Berechnung und Darstellung der Polygonflächen;
 - Berechnung aller übrigen Parameter (Transportmoment, Variationen hiervon, usw. – siehe dazu Anhang I);
 - Erzeugung von Parameterdateien je Netzbetreiber sowie Anhängen hierzu zur besseren Nachvollziehbarkeit der Bestimmung von Polygonflächen und Transportmoment-Parametern;
- Erstellung von gemeinsamen Datensätzen inkl. Kostendaten für die Validierung (ca. 600 Vergleichswerte) in Excel;
- Erstellung eines gemeinsamen Datensatzes für den Effizienzvergleich (Kostendaten und Vergleichsparameter gemäß Anhang II inkl. gebietsstrukturelle Parameter der BNetzA) in Excel und Export als CSV-Datei zur weiteren Verwendung im Programm R;
- Erstellung einer Daten- und Parameterquittung je Netzbetreiber gemäß Anhang I.2.11, den Netzbetreibern erstmals am 16.3.2017 und letztmals am 7.8.2017 zur Verfügung gestellt.

3.1.4 Im Rahmen der Validierung analysierte Dateien

Bei jeder neuen Datenlieferung wurden folgende Dateien geprüft (die nachfolgenden Ausführungen sind nach diesen drei Punkten gegliedert):

1. Erste visuelle Prüfung der georeferenzierten Daten sowie Prüfung der Formate, Wertebereiche und Vollständigkeit der Daten anhand der je Netzbetreiber erzeugten Excel-Datei mit Originaldaten (Abschnitt 3.2 nachfolgend);
2. Visuelle Prüfung der gemeinsamen Netzkarte sowie der je Netzbetreiber erzeugten Netzkarten (Abschnitt 3.3 nachfolgend);
3. Eingehende analytische und statistische Prüfung des gemeinsamen Datensatzes, insb. formale Prüfungen (Formate, Vollständigkeit), Integrität (Newcomb-Benford) und Konsistenzprüfungen (Abschnitt 3.4 nachfolgend).

3.2 Analyse der einzelnen Datenlieferungen je Netzbetreiber

Bei der Prüfung der einzelnen Datenlieferungen der Netzbetreiber konnten u.a. folgende Feststellungen gemacht werden:

- Die Daten sind weitgehend formal korrekt, in den dafür vorgesehenen Spalten eingegeben worden und kohärent, u.a. funktionierte der automatisierte Import problemlos. Die Formate stimmen weitgehend, teils wurden Ziffern als Text eingegeben und das Dezimalzeichen war nicht einheitlich. Diese Fehler wurden von den Netzbetreibern behoben;
- Wertebereiche, Anteile (z.B. Fremdnutzung als Leitung oder %) sowie Summen scheinen grundsätzlich korrekt und plausibel;
- Die georeferenzierten Angaben sowie die vorgenommene Transformation von Gauß-Krüger-Koordinaten in die UTM-Projektion stimmen grob mit der Netzkarte des BMWi überein und sind von guter Qualität. Der Detailierungsgrad in der Datenlieferung (Leitungsabschnitte pro Leitungskilometer) unterscheidet sich substantiell zwischen den Netzbetreibern (von 32 bis hin zu 52'405 Leitungsabschnitten);
- Die Strukturdaten I und II sind nicht durchwegs konsistent (vgl. nachfolgend Abschnitt 3.4). Insgesamt erscheint die Datenlage als sehr gut mit umfassenden, weitgehend vollständigen Angaben.

3.3 Analyse der Netzkarten

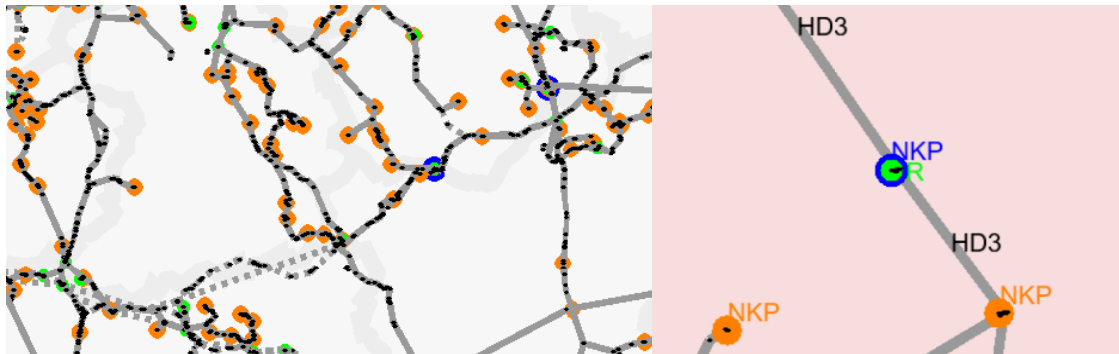
Aus den georeferenzierten Daten wurden detaillierte Netzkarten erstellt und überprüft.

- In einer gemeinsamen Netzkarte wurden Einspeisepunkte (blau), Ausspeisepunkte (orange), Druckregler und Verdichter (grün), Knoten (schwarz) sowie alle Leitungsabschnitte (in der Farbe des Netzbetreibers eingezeichnet. Leitungen in Bruchteilseigentum wurden mit gestrichelten Linien eingezeichnet. Die gemeinsame Netzkarte ist in **Anhang III** abgebildet.
- Je Netzbetreiber wurde zudem eine Karte je Gasqualität erstellt, wobei zusätzlich nachfolgende Informationen eingetragen wurden: Polygonfläche gemäß Anhang I.2.6, Druckstufen der Leitungsabschnitte, Druckregler (R) oder Verdichter (V), Art der Einspeise- und Ausspeisepunkte (NKP, Speicher, Biogas, etc.).

Die gemeinsame Netzkarte ist in **Anhang III** dargestellt. **Abbildung 8** zeigt links einen Ausschnitt hiervon (schwarz: Knoten, blau: Einspeisepunkt; grün: Regler oder Verdichter; orange: Ausspeisepunkt; Original zudem mit netzbetreiberspezifischen Farben für die Leitungsabschnitte), die Abbildung rechts stellt einen kleinen Ausschnitt aus einer netzbetreiberspezifischen Karte dar. Anhand der Karten wurden u.a. folgende Prüfungen vorgenommen:

- Sind Übergangspunkte zwischen den Netzbetreibern korrekt abgebildet?
- Stimmen die Leitungsangaben mit öffentlich verfügbaren Netzplänen überein?
- Sind die Punkte zusammenhängend?
- Sind die Leitungskonstellationen plausibel?
- Sind die Druckangaben plausibel?

Abbildung 8: Darstellung Netzkarten



Quelle: Eigene Darstellung

Im Ergebnis kann Folgendes festgehalten werden:

- Die Netzbetreiber haben insgesamt hochwertige und kohärente Angaben bereitgestellt, die mit den öffentlich verfügbaren Informationen übereinstimmen;
- Die Detaillierung hinsichtlich der Unterteilung der Leitungsverläufe in Leitungsabschnitte wurde von den Netzbetreibern unterschiedlich gewählt. Diese fiel teils insbesondere bei Leitungsabschnitten unterschiedlicher Netzbetreiber von Gemeinschaftsleitungen mit Bruchteilseigentum auf. Es stellt jedoch kein wesentliches Problem dar, da die Netzbetreiber je Leitungsabschnitt auch Leitungslängen angegeben haben, sodass davon Parameter wie z.B. das Transportmoment nicht betroffen sind. Ausnahmen bilden die Polygonfläche, bei der eine detailliertere Meldung der Leitungsabschnitte diese erhöhen kann, da bei diesem Parameter auch Knoten berücksichtigt werden (vgl. Anhang I.2.6), sowie die gebietsstrukturellen Daten, soweit sie auf die gemeldeten Linienverläufe zurückgreifen⁷.
- Teils war die logische Verbundenheit der Netze aufgrund spezieller Leitungskonstellationen nicht überall gegeben (z.B. fehlende Einspeisung in einem zusammenhängenden Teilnetz mit Ausspeisung; einzelner Einspeisepunkt ohne Leitungsverbindung). Die Netzbetreiber wurden auf entsprechende Konstellationen hingewiesen. Zudem wurde ihnen von der BNetzA die Möglichkeit eingeräumt, gegebenenfalls virtuelle Ein- oder Ausspeisepunkte zu melden. Fünf Netzbetreiber haben hiervon Gebrauch gemacht (vgl. auch Anhang I.1.2).

Mit Blick auf die weiteren Analysen zeigen die Karten, dass die Netzbetreiber sich in ihrer Versorgungsaufgabe teils substantiell unterscheiden, insbesondere konzentriert sich ein Teil der FNB vorrangig auf den Transport über lange Strecken in Netzen mit geringer Verzweigung und einer geringen Zahl von Netzanschlusspunkten, während andere FNB zu einem erheblichen Anteil auch verteilende Aufgaben übernehmen. Diese Heterogenität ist bereits aus den ersten beiden Regulierungsperioden bekannt. Ihr wird an verschiedenen Stellen im Projekt Rechnung getragen.

⁷ Zur Erhebung der gebietsstrukturellen Daten wurde den FNB von der BNetzA die Möglichkeit gewährt, für die Bestimmung der Trassenverläufe GIS-Daten in genauere Auflösung zu übermitteln.

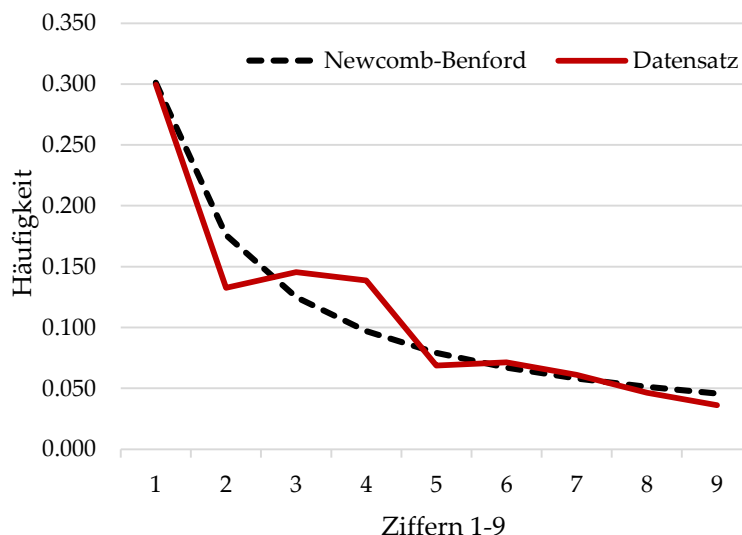
3.4 Analyse gemeinsamer Datensatz

Zur Feststellung der Integrität und Plausibilität der gemeldeten Daten wurde der gemeinsame Datensatz eingehend untersucht. Die Prüfungen wurden nach jeder Datenlieferung der BNetzA durchgeführt und Auffälligkeiten wurden der BNetzA mitgeteilt, um zu einer kontinuierlichen Verbesserung der Datenlage beizutragen (vgl. auch Abschnitt 3.1.1 oben).

3.4.1 Integrität – Newcomb-Benford Prüfung

Die Prüfung der Integrität der Daten erfolgt gestützt auf das Gesetz von Newcomb-Benford (Newcomb, 1881; Benford, 1938). Gemäß diesem Gesetz kommen die führenden Ziffern einer Zahl mit einer bestimmten Häufigkeit vor. Starkes Abweichen von diesen Häufigkeiten kann auf systematische Fehler oder auf eine mögliche manuelle Veränderung der Datenbasis hinweisen. **Abbildung 9** zeigt die gemäß dem Newcomb-Benfordschen Gesetz zu erwartende Verteilung der führenden Ziffern (gestrichelte Kurve) sowie die effektiv unter den untersuchten Angaben der Netzbetreiber vorkommende Verteilung (rote, durchgezogene Kurve). Es fällt auf, dass insbesondere die Ziffer vier im Datensatz weit häufiger vorkommt, als dies zu erwarten wäre.

Abbildung 9: Häufigkeiten der Führungsziffern im Datensatz



Quelle: Eigene Darstellung

Aus den individuellen Abweichungen der Netzbetreiber der Häufigkeiten zum jeweiligen Erwartungswert gemäß Newcomb-Benford geht hervor, dass der hohe Wert bei der Ziffer 4 v.a. von einem Netzbetreiber hervorgerufen ist. Die Werte des betroffenen Netzbetreibers wurden daher im Rahmen der Sonderprüfungen gemäß Abschnitt 3.5 speziell untersucht, wobei sich die Abweichungen als plausibel herausgestellt haben.

3.4.2 Plausibilität

Die Arbeiten zur generellen Plausibilisierung der gemeldeten Struktur- und Kostendaten umfassen folgende Prüfschritte:

- Einfache Wertbereichsprüfungen, diese haben durchweg gültige Wertebereiche ergeben.
- Prüfung der Verhältnisse zwischen Aufwandsparametern (z.B. Verhältnis von Totex zu sTotex, vgl. Abschnitt 3.4.2.1).

- Prüfung der Vergleichsparameter gemäß Abschnitt 3.4.2.2, dabei insbesondere auch
 - Abgleich der Strukturdaten I und II;
 - Prüfung der Angaben zu den gemeldeten Anlagen innerhalb der Strukturdaten II;
 - Prüfung von Verhältnissen zwischen Vergleichsparametern;
 - Vergleich von Angaben anhand von Allokationsdaten und Kapazitätsnutzungsverhältnissen;
 - Intensive Prüfung der ausgewählten Vergleichsparameter;
- Prüfung der Verhältnisse zwischen Aufwands- und Vergleichsparametern gemäß Abschnitt 3.4.2.3;
- Vergleich von abgefragten Daten mit extern verfügbaren Daten. Die Stichproben haben keine Auffälligkeiten ergeben.

3.4.2.1 Prüfung der Aufwandsparameter

Die Prüfung der Verhältnisse zwischen Aufwandsparametern haben keine unerklärbaren Auffälligkeiten ergeben. Bei den neueren Netzbetreibern bestehen grundsätzlich deutlich größere Unterschiede zwischen Totex und sTotex (Totex deutlich höher).

3.4.2.2 Prüfung der Vergleichsparameter

Zur Prüfung der Vergleichsparameter wurden in einem ersten Schritt die Originalangaben der Netzbetreiber in den Erhebungsbögen plausibilisiert. In einem zweiten Schritt wurden die daraus resultierenden Vergleichsparameter untersucht.

Plausibilisierung Originalwerte

- **Angaben Jahresarbeit:** Die Jahresarbeit liegt als kWh- und Volumenangabe separat für Ein- und Ausspeisung vor, wobei in den Strukturdaten I Gesamtwerte je Gasqualität vorliegen und in den Strukturdaten II Werte für die einzelnen Anschlüsse. Die aus den beiden Werten resultierenden Brennwerte sind für das L-Gas erwartungsgemäß durchwegs niedriger. Die Angaben zur Ein- bzw. Ausspeisung gemäß Strukturdaten I und II sind nicht durchwegs identisch, weshalb bei der Parameterberechnung eine Normierung gemäß Anhang I.2.2 auf die summarisch vorliegenden Strukturdaten I vorgenommen wird, da diese von den Beteiligten als valider eingestuft worden sind. Der Vergleich zwischen Ein- und Ausspeisung je Netzbetreiber zeigt teils erhebliche Unterschiede in beide Richtungen, die speziellen Konstellationen zwischen den Netzbetreibern geschuldet sind (z.B. Vereinbarungen auf Gemeinschaftsleitungen über die Wahrnehmung der Ein- und Ausspeisung.). Über alle Netzbetreiber hinweg liegen Ein- und Ausspeisung nahe beieinander.
- **Angaben Leistung:** Die Leistung liegt als zeitgleicher Wert in den Strukturdaten I sowie in den Strukturdaten II zeitungleich für die einzelnen Anschlüsse vor (maximaler im Basisjahr an dem Punkt geleistete stündliche Ein- bzw. Ausspeisung). Die zeitgleiche Höchstlast bewegt sich ein- und ausspeiseseitig in ähnlicher Größenordnung. Ein ähnliches Bild ergibt sich bei der zeitungleichen Last (summierte Q_{max} -Werte). Erwartungsgemäß liegt die zeitungleiche Höchstlast durchwegs über der zeitgleichen Höchstlast. Die Druckangaben zu den einzelnen Anschlüssen sind plausibel.
- **Angaben Leitungen:** Für die Leitungen liegen Angaben in den Strukturdaten I in aggregierter Form vor, die Strukturdaten II umfassen Angaben für die einzelnen Leitungsabschnitte. Bei den Leitungen stimmen die Angaben zu den einzelnen Druckstufen, Materialklassen und

Gas-Qualitäten mit den angegebenen Gesamtlängen überein. Die Aufteilung auf die einzelnen Druckstufen sowie die Verhältnisse Rohrvolumen zu Leitungslängen variieren je nach Netzbetreiber stark, sind aber plausibel. Bei den Fremdnutzungsanteilen liegen teil substanzuelle, aber grundsätzlich erklärbare Unterschiede zwischen den Volumen- und Längenangaben vor.

- **Verdichterangaben:** Die Angaben zu den Verdichtern sind nachvollziehbar.

Untersuchung Vergleichsparameter

Die aus den Angaben der Netzbetreiber gemäß Anhang I berechneten Vergleichsparameter wurden einzeln eingehend anhand von Säulendiagrammen untersucht, untereinander mittels von Scatter-Plots verglichen und auf unplausible Ausreißer hin geprüft. Verglichen wurden insbesondere:

- Parameter innerhalb der Gruppen gemäß Tabelle 5 auf Seite 42 sowie ausgewählte Parameter verschiedener Gruppen untereinander;
- Vergleich der Parameter auf Basis von Allokations- und Kapazitätsnutzungsangaben;
- Genaue Prüfung der im Effizienzvergleichsmodell aufgenommenen Parameter.

Wenngleich sich die Netzbetreiber teils deutlich hinsichtlich ihrer Größe unterscheiden, so stehen die Parameter i.d.R. in einem klaren Zusammenhang zueinander, weshalb oft hohe Korrelationen resultieren. Ausreißer sind selten bzw. wo solche vorliegen, können diese aufgrund der Begebenheiten der Netzbetreiber nachvollzogen werden.

3.4.2.3 Prüfung der Verhältnisse zwischen Vergleichs- und Aufwandsparemtern

Schließlich wurden die Verhältnisse von Vergleichs- und Aufwandsparemtern intensiv geprüft und untersucht, ob mit Blick auf die DEA einzelne Unternehmen bei einem oder mehreren Parametern das beste relative Verhältnis zu den Aufwandsparemtern ausweisen. Dabei zeigte es sich, dass bei Netzbetreibern, die auch nicht regulierte Netzteile betreiben, die Kohärenz von Aufwand- und Vergleichsparameter sicherzustellen ist, damit diese den Effizienzvergleich nicht unsachgerecht dominieren (dies wäre etwa der Fall gewesen, wenn nicht regulierte Kostenanteile in den Aufwandsparemtern nicht berücksichtigt worden wären, die damit einhergehenden Ausprägungen bei den Vergleichsparametern aber schon). Bei den dem Effizienzvergleich zugrundeliegenden Parametern ist diese Kohärenz sichergestellt und es sind bei den einzelnen Vergleichsparametern keine Ausreißer oder Auffälligkeiten aufgefallen, die nicht in der spezifischen Ausprägung der Versorgungsaufgabe begründet liegen. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass Ausreißer im Datensatz durchaus vorliegen können und entsprechend beim Effizienzvergleich die vorgesehenen Auffälligkeits- und Ausreißeranalysen mit aller Sorgfalt durchzuführen sind.

3.4.3 Prüfung der finalen Parameter

Schließlich erfolgte eine gesonderte Prüfung der im finalen Effizienzvergleichsmodell berücksichtigten Vergleichsparameter. Dabei werden insbesondere Extremwerte kontrolliert sowie Parameterwerte, bei denen ein Netzbetreiber das beste Verhältnis zu den Aufwandsparemtern aufweist (da dieses entscheidend ist, ob ein Netzbetreiber zum Peer wird). Sowohl die analytischen Untersuchungen als auch der spezifische Abgleich mit öffentlich verfügbaren Daten haben keine Auffälligkeiten gezeigt bzw. die angegebenen Werte konnten validiert werden.

3.5 Sonderprüfungen

Die oben aufgeführte Auffälligkeit beim Integritätstest nach Newcomb-Benford hat zu einer Sonderprüfung durch die BNetzA geführt. Die betroffenen Angaben des Netzbetreibers konnten zur Zufriedenheit der BNetzA und der Gutachter validiert werden.

3.6 Fazit der Datenvalidierung und deskriptive Statistiken der Parameter

Die Datenqualität konnte im Verlauf des Projekts ausgehend von einer bereits guten Basis weiter erhöht werden. Die verwendeten Daten sind formal korrekt, integer, plausibel und liegen in guter Qualität vor.

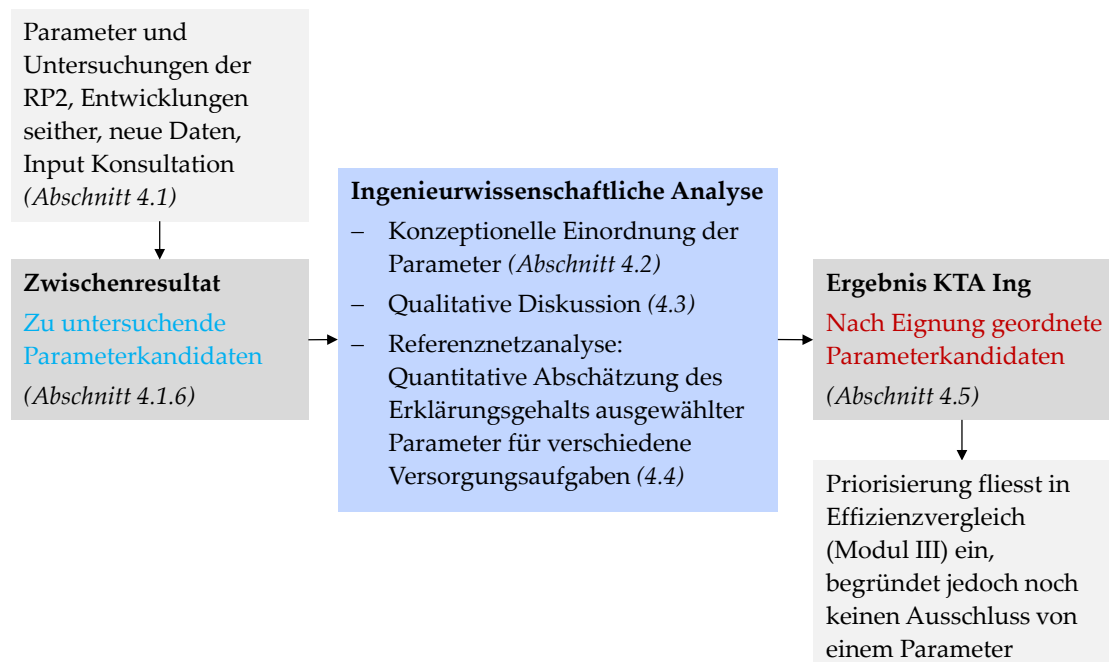
Ausgewählte deskriptive Statistiken des finalen Datensatzes sind in Anhang II dargestellt. Die einzelnen Parameter werden in Kapitel 4 vorgestellt.

4 Ingenieurwissenschaftliche Kostentreiberanalyse (KTA Ing)

Gemäß § 13 Abs. 3 S. 7 ARegV hat die Auswahl der Vergleichsparameter mit qualitativen, analytischen oder statistischen Methoden zu erfolgen. Das nachfolgende Kapitel beschreibt in dem Zusammenhang die vorgängig zum eigentlichen Effizienzvergleich vorgenommene ingenieurwissenschaftliche Kostentreiberanalyse („KTA Ing“).

Abbildung 10 beschreibt das Vorgehen. In einem ersten Schritt wird ausgehend von den Parametern und Untersuchungen früherer Effizienzvergleiche eine Liste von zu untersuchenden Parametern hergeleitet. Diese Parameter werden im Rahmen der KTA Ing konzeptionell eingeordnet und zunächst qualitativ diskutiert. Ausgewählte Parameter werden zudem zum besseren Verständnis ihrer Wirkungsweise quantitativ auf ihre Kostenwirkung im Rahmen einer Referenznetzanalyse (RNA) beurteilt.⁸ Resultat der Arbeiten ist eine nach KTA-Eignung geordnete Liste von Vergleichsparametern für die weitere Verwendung im Effizienzvergleich.

Abbildung 10: Vorgehen ingenieurwissenschaftliche Kostentreiberanalyse



Quelle: Eigene Darstellung

⁸ Die Referenznetzanalyse soll damit ausdrücklich nicht die realen Kosten der gemeldeten Netze, die auch Ineffizienzen beinhalten, möglichst gut erklären. Der Erklärungsgehalt von Parametern hinsichtlich der realen Kosten wird später im Rahmen der ökonomischen Kostentreiberanalyse (KTA Oec) untersucht, welche möglichst stimmige Kombinationen von Parametern mit möglichst guter Eignung gemäß Analyse aus der KTA Ing aufzeigt.

4.1 Herleitung der zu untersuchenden Parameter

4.1.1 Ergebnisse der KTA zur 2. Regulierungsperiode

CONSENTEC führte in 2012 eine KTA Ing durch und untersuchte folgende Einzelparameter:

- Netzlast Real (maximale Ein- und Ausspeisemengen)
- Netzlast Kapazität (maximale Kapazität Entry-/Exit)
- Transportentfernung (minimale/mittlere Leitungslänge zur Versorgung der Abnehmer)
- Anschlussdichte (Anzahl und Dichte der Versorgungsanschlüsse)
- Druckdifferenz (mittlere Druckdifferenz zwischen Ein- und Ausspeisepunkten)
- Druckniveau (mittleres Druckniveau der Teilnetze)
- Netzfläche (Fläche des Teilnetzgebietes)
- Rohrleitungsvolumen (Geometrisches Volumen des Netzes)
- Rohrmantelfläche (Rohrinnenoberfläche des Netzes)
- Leitungsdurchmesser

Darüber hinaus wurden als aggregierte Parameter untersucht:

- Transportmoment
- Transportmomentfläche

Zunächst unterteilte CONSENTEC die Versorgungsaufgabe in drei Dimensionen und untersuchte die Einzelparameter und die aggregierten Parameter mit Hilfe qualitativer Überlegungen und einer Referenznetzanalyse auf ihre Eignung als Kostentreiber. **Tabelle 3** gibt das Ergebnis dieser Untersuchung wieder. Als Versorgungsdimensionen definierte CONSENTEC:

- Deckung der Netzlast bzw. Bereitstellung der nachgefragten Kapazität
- Erforderliche Netzausdehnung bzw. Transportentfernung
- Granularität.

Tabelle 3: Bewertung der Kostentreiber in der KTA Ing der RP2

Geeignete Parameter	Transportentfernung	Netzlast
	Netzfläche (Polygonfläche)	Anzahl der Anschlusspunkte
	Transportmoment	Transportmomentfläche
Sekundär geeignete Parameter	Druckdifferenz mengengewichtet	Druckniveau mengengewichtet
Eher ungeeignete Parameter	Rohrvolumen	Rohrleitungsmantelfläche

Quelle: gemäß CONSENTEC (2012)

Die Ergebnisse der KTA Ing flossen danach in den Effizienzvergleich der RP2 ein, der von Frontier Economics und CONSENTEC unter Beizug der TU Clausthal durchgeführt wurde (Frontier et al., 2013). Die Auswahl der letztlich verwendeten Vergleichsparameter erfolgte auf Basis der Ergebnisse der KTA Ing nach folgenden Entscheidungskriterien:

- Abdeckung der Versorgungsaufgabe;
- Ingenieurwissenschaftliche Plausibilität;
- Bandbreite der Effizienzwerte (möglichst schmal) und Anzahl an Ausreißern (möglichst gering).

Tabelle 4 zeigt den schlussendlich im Effizienzvergleich gewählten Parametersatz, in dem auch aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht weniger geeignete Parameter aufgrund der in einer Gesamtschau besseren Erfüllung der gewählten Entscheidungskriterien zum Zuge kamen.

Tabelle 4: In der RP2 letztlich gewählte Parameter

Dimension der Versorgungsaufgabe	
Kapazitätsbereitstellung/Gastransport	Rohrvolumen
Netzausdehnung	Polygonfläche
Granularität	Korrigierte Anzahl der Ein- und Ausspeisepunkte

Quelle: Eigene Darstellung

4.1.2 Neue Parametervorschläge infolge einer veränderten Datenabfrage

Änderungen in der Datenabfrage zur 3. Regulierungsperiode

Die Datenabfrage RP3 ist im Vergleich zur RP2 an verschiedenen Stellen ausführlicher ausgefallen. Als Beispiele seien folgende Angaben genannt:

- *Reale Leitungslängen* der einzelnen Leitungsabschnitte;
- *Für die einzelnen NKP/NAP, ein- bzw. ausgespeiste Jahresarbeit Q_{Jahr}* ergänzend zur maximalen stündlichen Ein- bzw. Ausspeisung Q_{max} ;
- *Mengewichteter Betriebsdruck* für die einzelnen NKP/NAP.

Die erweiterten Daten ermöglichen damit einerseits neue Validierungen (z.B. Vergleich der Einspeisung gemäß Strukturdaten I mit den Angaben für die einzelnen NKP/NAP aus den Strukturdaten II, vgl. Abschnitt 3.4.2.1 oben). Andererseits – und noch wichtiger – können neue bzw. angepasste Vergleichsparameter gebildet werden.

Auf der anderen Seite sind einige Parameter aus der RP2 nicht mehr abgefragt worden. Z.B. wurden die Netzparameter nicht mehr für verschiedene Lastsituationen erhoben.

Neue Parameter durch ausführlichere Datenabfragen

Aufgrund der Analysen oben werden folgende Parameter neu gebildet und geprüft:

- Transportmoment ebenfalls ermittelt auf Basis der im gesamten Jahr transportierten Arbeit Q_{Jahr} („Transportmoment Arbeit“) sowie *realen Distanzen*;
- Die vier Druckparameter mittlerer Eingangsdruck, Ausgangsdruck, Druckdifferenz und Druckniveau – in der RP2 gebildet durch Gewichtung der minimalen Druckangaben P_{min} je NKP/NAP mittels Q_{max} – können nun auch zusätzlich gebildet werden einerseits auf der Grundlage vom *mengewichteten Betriebsdruck* und andererseits mit Q_{Jahr} als *Gewichtungsfaktor* von P_{min} (Details vgl. Abschnitt I.2.5).

Daneben sind die nun verfügbaren realen Distanzen je Leitungsabschnitt Voraussetzung für die Bildung des im Folgenden eingeführten Transportwurzelmoments (sowie weiterer Parameter wie etwa Maschen und Verzweigungen).

4.1.3 Parametervorschlag Transportwurzelmoment

Ausgangspunkt: Überlegungen zum Transportmoment

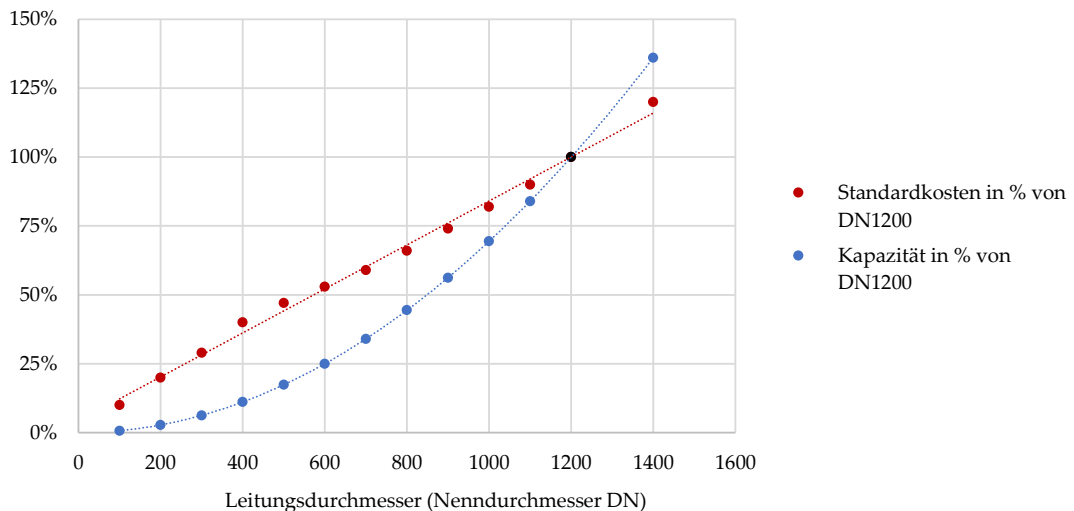
Beim Transportmoment (TM) werden die Transportentfernung und die transportierte Menge sowohl in der Variante Leistung wie auch der Variante Arbeit multiplikativ verknüpft. Doppelt

so hohe Mengentransporte (Q_{max} , Q_{Jahr}) ergeben folglich ebenso eine Verdopplung des Transportmomentes wie die Übertragung einer unveränderten Menge über die doppelte Distanz.

Die Errichtungskosten C von Ferngasleitungen steigen ebenfalls linear mit der Entfernung, allerdings auch näherungsweise linear mit dem Durchmesser d (vgl. dazu die rote Kurve in **Abbildung 11** auf der Basis von Tabelle 10, welche Errichtungskosten und Transportkapazität verschiedener Durchmesserklassen im Vergleich zum Durchmesser DN1200 abbildet):

$$C \sim d$$

Abbildung 11: Kapazität und Errichtungskosten von Rohrleitungen im Verhältnis zu deren Nenndurchmesser DN (normiert auf DN 1200)



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf CONSENTEC (2010), NEP Gas 2015 und 4Management; Datengrundlagen für die Standardkosten vgl. Tabelle 10 auf Seite 69

Die Transportkapazität einer Ferngasleitung steigt jedoch näherungsweise proportional zum Querschnitt A , also zur Kreisfläche der Leitung und somit quadratisch zum Durchmesser d bzw. dem Radius r . Anders gesagt verhält sich der Leitungsdurchmesser näherungsweise proportional zur Wurzel der Transportkapazität der Leitung:

$$\text{Transportkapazität} \sim A = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi \cdot r^2$$

$$d = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{A}$$

Somit besteht neben dem näherungsweise linearen Zusammenhang von Leitungsdurchmesser und Errichtungskosten ein näherungsweise quadratischer Zusammenhang von Leitungsdurchmesser und Transportkapazität (vgl. dazu die blaue Kurve in **Abbildung 11**).⁹ Diese für die Leitungsplanung wichtige Kostenbeziehung wird beim Transportmoment durch die Multiplika-

⁹ D.h. das Volumen einer Röhre wächst bei einer Vergrößerung des Durchmessers rascher als der Rohrumfang, der letztlich die Kosten bestimmt. Knieps (2009) nennt den Effekt „Größenvorteile aus dem Umfang der Rohrleitung“ unter der Annahme gleicher Betriebsdrücke.

tion von Längen und Mengen nicht berücksichtigt; eine Verdoppelung der Transportentfernung verdoppelt das Transportmoment ebenso wie die Verdoppelung der Transportkapazität. Während sich im ersten Fall auch die Kosten verdoppeln, wachsen diese im zweiten Fall lediglich um rd. 40 %. Bei einem Anstieg des zu transportierenden Flusses und dem dabei näherungsweise proportional steigenden Querschnitt wächst das Transportmoment also signifikant schneller als die Kosten – eine Änderung des Teilparameters „Querschnitt“ wird ggü. einer Änderung der Transportentfernung folglich deutlich stärker betont.

Vorstellung Transportwurzelmoment

Um die Transportentfernung und die transportierte Gasmenge in ein gleichgewichtiges Verhältnis – bezogen auf die Kosten – zu setzen, soll in einem neuen Parameter je Leitungsabschnitt die Transportentfernung multiplikativ mit dem Rohrleitungsdurchmesser verknüpft werden, der für die Lieferung der entsprechenden Mengen näherungsweise notwendig ist. Da sich die notwendige Transportkapazität einer Leitung aus der maximalen transportierten Gasmenge pro Zeiteinheit (entspricht der erforderliche Kapazität, vorliegend Q_{max}) ableitet, wird der aufgefundene, näherungsweise quadratische Zusammenhang zwischen Leitungsdurchmesser und Transportkapazität abgebildet, indem die im betreffenden Leitungsabschnitt zu transportierenden Menge pro Zeiteinheit mit der Wurzel bewertet wird.¹⁰ Nach Multiplikation mit der Leitungsabschnittslänge entsteht ein engerer Bezug zu den Errichtungskosten des Leitungsabschnitts, da sich Leitungsdurchmesser und Errichtungskosten wie oben dargestellt näherungsweise proportional zueinander verhalten. Der aus der Summe dieser Berechnung über alle Leitungsabschnitte gebildete Parameter wird als „Transportwurzelmoment“ (TWM) bezeichnet.

Netzbetreiber legen ihre Röhrensysteme so aus, dass einzelne Leitungsabschnitte möglichst optimal genutzt werden können bzw. für möglichst viele Verbindungen zur Verfügung stehen. Wenn mit einem Parameter der notwendige Leitungsdurchmesser eines einzelnen Leitungsabschnitts (und damit dessen Errichtungskosten) näherungsweise abgebildet werden soll, ist damit die entkoppelte Bewertung von Teil-Transporten und die Verwendung von Luftliniendistanzen (wie bspw. beim Transportmoment gebildet mit Luftliniendistanzen) wenig zielführend. Daher werden beim Transportwurzelmoment zunächst – wie beim Transportmoment mit realen Leitungslängen – für jeden einzelnen Transport die minimalen Transportwege auf den real existierenden Trassen im vorhandenen Röhrensystem bestimmt. Anders als beim Transportmoment wird dann in einem Zwischenschritt der sich je Leitungsabschnitt ergebende Gasfluss als Summe der diesen Leitungsabschnitt nutzenden Teiltransporte berechnet. Wird nun die Wurzel aus dem summierten Gasfluss gezogen, so ist im entstehenden Wert der lineare Zusammenhang zum für den Transport notwendigen Leitungsdurchmesser bzw. den Errichtungskosten näherungsweise abgebildet (vgl. Abbildung 11) und kann mit der Länge des Leitungsabschnitts – dem ebenfalls linear mit den Errichtungskosten zusammenhängenden zweiten Parameter – multiplikativ verbunden werden.

¹⁰ Einheiten und absolute Zahlenwerte spielen weder bei einzelnen noch bei kombinierten Parametern eine Rolle, da im Rahmen der DEA/SFA später eine Skalierung der Parameter stattfindet. Insofern ist es vorliegend ausreichend, die Wurzel der Menge (Q_{max}) zu betrachten; auf den Faktor $\frac{2}{\sqrt{\pi}}$ kann verzichtet werden.

Diskussion

Das TWM berücksichtigt die für die Erfüllung der Versorgungsaufgabe notwendigen Kosten insofern besser als das TM, als es den quadratischen Zusammenhang von Errichtungskosten und Leitungskapazität abzubilden vermag. Hierzu setzt es am für die Erfüllung der Versorgungsaufgabe notwendigen Leitungsdurchmesser an und verbindet diesen in korrekter Richtung mit der Länge der Leitung, die im linearen Zusammenhang mit den Errichtungskosten steht. Auf diese Weise berücksichtigt das TWM den erhöhten Aufwand, der "auch verteilenden" ggü. "nur transportierenden" FNB durch die zusätzlichen Rohrleitungsabschnitte mit kleinerem Durchmesser auf den weitgehend exogen vorgegebenen realen Trassenverläufen entstehen.

Die Trassentreue hat den Vorteil, dass dadurch implizit die Topologie und Geographie der Versorgungsgebiete berücksichtigt wird. Dieser Vorteil überwiegt den potentiellen Nachteil, dass – in der Praxis ohnehin nicht durchsetzbare – „unnötige Umwege“ hingenommen würden. Es kann u.E. grundsätzlich zu Recht angenommen werden, dass die Netzbetreiber effiziente Trassenverläufe gewählt haben. Effizient ist ein Trassenverlauf in diesem Sinne insbesondere auch dann, wenn aufgrund sehr schwieriger Bodenverhältnisse oder aber exogener Vorgaben – z.B. zur Umgehung eines Naturschutzgebietes oder zur politisch gewollten Bündelung von Infrastruktur aufgrund von Raumnutzungskonzepten – die Trasse deutlich von der Luftlinien abweicht und so trotz erhöhter Trassenlänge entweder eine bessere Wirtschaftlichkeit oder überhaupt erst eine Genehmigungsfähigkeit erreicht werden konnte. Die Gültigkeit dieser Annahme wird vorausgesetzt, da es in Deutschland seit langem üblich ist, neben Aufsichtsbehörden auch betroffenen Anwohner, Gebietskörperschaften und zunehmend Umweltschutzverbände stark in die Planung von Infrastruktur einzubeziehen und der weit überwiegende Teil der heute bestehenden Leitungsinfrastruktur von den FNB mit sehr geringen Freiheitsgraden zur Festlegung von Trassenverläufen errichtet wurden. Es wird deutlich, dass der Trassenverlauf bei Gasnetzen stark exogen u.a. durch den sog. „Raumwiderstand“ geprägt wird. Vergleicht man also im Gedankenmodell den Transport von zwei gleichgroßen Gasmengen zwischen jeweils zwei Orten mit gleichgroßer Luftlinienentfernung, so unterscheiden sich die aufgrund der genannten exogenen Faktoren notwendigen Trassenlängen deshalb regelmäßig deutlich vom Minimalwert gemäß Luftlinienentfernung. Bezüglich der Input-Faktoren, also den Kosten für Bau und Betrieb, liegt allerdings aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht eine quasi-lineare Abhängigkeit von der Trassenlänge vor. Insofern sind aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht Kostentreiber kritisch zu sehen, die auf eine Transportentfernung nach Luftliniendistanz aufsetzen. Dies gilt selbstverständlich ebenso für Output-Parameter wie das Transportmoment, sofern diese aus der Luftlinienentfernungen abgeleitet werden. Es sind aus der Graphentheorie hinreichende Verfahren zur Bestimmung kürzester Pfade bekannt, die an Stelle der Luftlinienentfernungen verwendet werden können, so dass auch keine wesentlichen methodischen Hindernisse einer Verwendung der realen Trassenentfernungen entgegenstehen. Dieser auch als „Trassentreue“ bezeichnete Ansatz des TWM in Verbindung mit dessen Wurzel-Bewertung von Gesamtkapazitäten je Leitungsabschnitt bringt zwei Vorteile: Einerseits reflektiert die Trassentreue die Notwendigkeit, aufgrund vorgegebener Umweltbedingungen (Besiedlung, Naturschutz, Umgehung geografischer Hindernisse etc.) mit der Trasse von der Luftlinienverbindung abzuweichen und andererseits vermag das TWM den Unterschied von FNB abzubilden, die „nah zum Endkunden“ transportieren und solchen, die einen größeren Transportanteil in Richtung Endkunden der unterlagerten Ebene überlassen.

Aufgrund der Proportionalität von Rohrleitungsdurchmesser und -umfang U ($U = \pi \cdot d$) ist das TWM, welches je Leitungsabschnitt die Rohrleitungslänge mit dem für den Gastransport „optimalen“ Rohrleitungsdurchmesser multipliziert, seinerseits proportional zur Rohrleitungsmantelfläche, bei der die Rohrleitungslänge mit dem Rohrleitungsumfang multipliziert wird. Im Resultat entspricht das TWM näherungsweise der Rohrleitungsmantelfläche, die notwendig wäre, um unter Nutzung der bestehenden Trassen die Q_{\max} Mengen zeitgleich ohne Einsatz von Verdichtern zu transportieren (vgl. Kap. 4.2.3). Wenn also wie dargelegt, plausibel davon ausgegangen werden kann, dass die bestehenden Trassen optimal gewählt wurden, kann das TWM auch als durch den zugrunde gelegten Gasfluss „exogen geprägte minimale Rohrleitungsmantelfläche“ interpretiert werden und ist damit nicht input- bzw. anlagenorientiert wie die Rohrleitungsmantelfläche selbst (Definition vgl. Abschnitt I.2.1), die sich unmittelbar aus den gemeldeten, real existierenden Rohrleitungsabschnitten ableitet.

4.1.4 Entwicklung des regulatorischen Rahmens und Parametervorschlag „Horizontaler Transport“

Im folgenden Kapitel beschreiben wir die Änderungen in den regulatorischen Rahmenbedingungen der FNB und leiten aus diesen und den sich ändernden Gasflüssen in Deutschland die Option zur Einführung eines Parameters „horizontaler Transitanteil“ ab.

Entwicklung des regulatorischen Rahmens

Seit der Aufnahme der heutigen FNB in den Mechanismus der Anreizregulierung¹¹ verändern sich die Rahmenbedingungen der Fernleitungsnetzbetreiber laufend. Maßgebliche Regeln für die Auslegung und die Zusammenarbeit zwischen den Netzbetreibern wurden in den letzten Jahren regelmäßig angepasst. Als Stichworte sind hier zum einen die deutsche Energiewende und die europäischen CO₂-Einsparziele zu nennen, die zu einer starken Unsicherheit über die notwendigen Investitionen in die Netze und deren Nachhaltigkeit führen. Zum anderen bestehen Umsetzungsanforderungen aus dem 3. Binnenmarktpaket¹², dem hieraus entwickelten Gas Target Model der europäischen Regulierungsbehörden sowie der Infrastrukturplanungen der EU¹³ zur Erreichung der EU Energie- und Klimaschutzziele.

Neben der bereits in der Gasnetzzugangsverordnung 2010¹⁴ vorgeschriebenen Reduzierung der Marktgebiete von 6 Marktgebieten (2010) auf maximal 3 Marktgebiete, welche die FNB zu einer verstärkten internen Kooperation innerhalb der zusammengelegten Marktgebiete fordert, haben die FNB durch die Gestaltung von zwei qualitätsübergreifenden Marktgebieten die Komplexität in der praktischen Abwicklung des Netzzugangs zugunsten der Händler und Endkunden weiter erhöht. Eine weitere Reduzierung der Marktgebiete auf ein verbleibendes Marktgebiet ist gemäß Gasnetzzugangs-Verordnung zum April 2022 vorgesehen und fordert von den FNB weitere Maßnahmen zur Zusammenarbeit.

Zusätzlich hat der sich abzeichnende Rückgang der europäischen Gasproduktion in Großbritannien, den Niederlanden und Deutschland zu einer Neustrukturierung der europäischen Gasbezugsquellen mit starkem Focus auf Erdgaslieferungen aus Russland und Nahost über die

¹¹ Vgl. auch Kapitel 2.

¹² EU-RL 2009/73 EG und der zugehörigen Verordnungen.

¹³ EU-RL 347/2013.

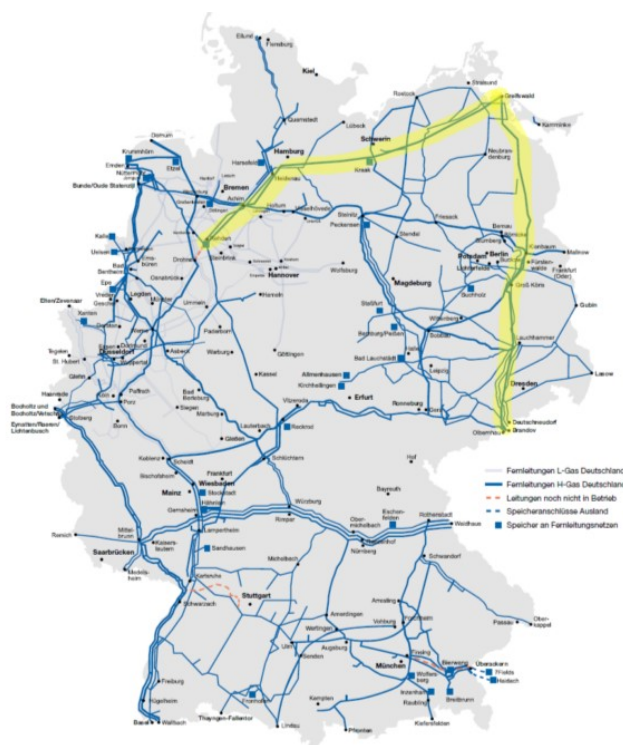
¹⁴ https://www.gesetze-im-internet.de/gasnzv_2010/BJNR126110010.html § 21.

neue verlegte Ostseepipeline und den südlichen Korridor sowie LNG-Lieferungen über Häfen im Mittelmeer und der Atlantikküste geführt. Diese Entwicklungen bilden sich auch im „3. Binnenmarktpaket Elektrizität und Erdgas“ ab. Dessen Umsetzung führt im Gasbereich zu einer verpflichtenden Einführung von nationalen und europäisch übergreifenden Netzentwicklungsplänen (NEP Gas, TYNDP Gas) sowie einer Genehmigung von Infrastrukturprojekten in die Gas- und Stromnetze unter Einbeziehung der nationalen und der europäischen Behörden und der Verpflichtung der europäischen FNB zur einer verstärkten Zusammenarbeit zur Stärkung der europäischen Gasmärkte und der Versorgungssicherheit für alle Mitgliedsländer der EU. Besonders hervorzuheben ist hierbei die Aufforderung zur Quellendiversifikation, welche jedes Mitgliedsland unabhängiger von den bisher dominierenden Lieferquellen machen soll.

Die ersten Auswirkungen dieser Infrastrukturanforderungen sowie des zunehmenden Handels zwischen den europäischen Handelspunkten für Erdgas sind bereits in den sich verändernden Gasströmen zwischen Deutschland und seinen Nachbarländern zu erkennen (vgl. z.B. BAFA, 2016 und IEA, 2016).

Auch zukünftig wird neben den Anforderungen aus den Verteilnetzen zu einer höheren Versorgungssicherheit vornehmlich in Süddeutschland¹⁵ und der europäischen Verordnung zur Gewährleistung der sicheren Erdgasversorgung (SoS-Verordnung)¹⁶ der steigende Transitanteil aus der Veränderung der europäischen Bezugsquellen die Infrastrukturanforderungen an die FNB definieren.

Abbildung 12: Markteintritt neuer Fernleitungsnetzbetreiber



Quelle: NEP 2016 und markierte Leitungsführung neuer FNB im H-Gas Netz

¹⁵ Vgl. ARegV Evaluierungsbericht 2015, Seite 65/66 der BNetzA

¹⁶ Verordnung (EG) Nr. 994/2010

Für die Umsetzung der europäischen Anforderungen wurde mit dem Bau der Pipelines NEL und OPAL sowie einigen Verstärkungen im bestehenden Leitungsnetz der FNB bereits ein Teil der erforderlichen Maßnahmen in den letzten Jahren umgesetzt (vgl. **Abbildung 12**). Dies führte auch zur Gründung von vier neuen FNB für den Betrieb dieser Pipelines.

Durch das Auslaufen der niederländischen und deutschen L-Gas Produktion aus der europäischen Erdgasproduktion entstehen für die deutschen FNB in den nächsten 20 Jahren mit dem erforderlichen Wechsel der Gasqualität vom heimischen L-Gas zum importierten H-Gas innerhalb der deutschen Marktgebiete weitere Herausforderungen in den bestehenden Netzen zur Sicherung der innerdeutschen horizontalen Transporte. Diese Herausforderungen dominieren gemeinsam mit den Versorgungssicherheitsaspekten den Ausbaubedarf der FNB für die nächsten Regulierungsperioden¹⁷.

Lösungsansatz: Parametergruppe „horizontaler Transport“

Zur Berücksichtigung der gestiegenen Anforderungen für den horizontalen Transit zwischen FNB innerhalb der Marktgebiete (horizontaler Transport – Marktgebietsintern) und über Marktgebietsgrenzen hinweg (horizontaler Transport – Marktgebietsübergreifend) wird eine neue Parametergruppe „horizontaler Transport“ definiert, bei der Parameter aufgenommen werden, die den horizontalen Transport sowie dessen Komplement „vertikalen Transport“ beschreiben. Letzterer wird, da analytisch eng verwandt, der gleichen Gruppe zugeordnet.

Aus technischer Sicht kann die Dimension „Transport“ in die netzwirtschaftlichen Teilleistungen „horizontaler Transit“ (im Sinne von nationalem oder internationalem Transport zwischen FNB durch das eigene Netz) und „vertikalem Transport“ an die unterlagerten Endkunden und Verteilernetze zerlegt werden. Die Erhebung der sog. T-Komponente war im Stromnetz bis zum Jahr 2004 üblich und auch danach wurde die Tragung transitbedingter Mehrkosten ernsthaft diskutiert (vgl. z.B. Steger et al., 2008).

Da sich zum einen die Verteilung dieser Transportaufgaben bei den FNB als sehr heterogen darstellt und zum anderen die begründete Annahme besteht, dass Unterschiede bei der vertikalen Netzlast in der Verteilung nicht zu identischen effizienten (Errichtungs-)Kosten führt wie gleichstarke Unterschiede in der horizontalen Netzlast,¹⁸ ist es aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht naheliegend, entsprechende Parameter zu definieren und auf deren kostentreibende Wirkung hin zu untersuchen. Der Parameter „horizontaler Transportanteil“ soll den Anteil der Gasmenge charakterisieren, welcher vom Netzbetreiber rein zu (nationalen oder internationalen) Transitzwecken horizontal durch sein Fernleitungsnetz befördert wird („horizontaler Transport“). Daneben werden zusätzlich Parameter gebildet, die sich nicht auf den Anteil beziehen, sondern auf die absolute (stündliche) Menge für horizontalen sowie vertikalen Transport. Details zur Bildung der Parametergruppe finden sich in Abschnitt I.2.12).

¹⁷ Vgl. Netzentwicklungsplan 2016

<http://www.fnb-gas.de/de/netzentwicklungsplan/netzentwicklungsplan.html>

¹⁸ Eine gleichmäßig höhere vertikale Netzlast durch steigende Entnahmen aus den Ausspeisepunkten betrifft die Auslegung des gesamten Netzes und führt (unter der Annahme konstanter Skalenerträge) näherungsweise zu einem linearen Ausbaubedarf der Transportkapazität und dem zugehörigen Kostenanstieg. Erfolgt ein Anstieg der Netzlast in gleicher Höhe jedoch lediglich punktuell aufgrund steigender horizontaler Netzlast (z.B. durchwegs höhere Q_{\max} -Werte bei Ein- und Ausspeisepunkten für horizontalen Transport), so ergibt sich ein Bedarf zur Netzverstärkung nur in den vom horizontalen Transport betroffenen Netzteilen (z.B. dem sog. „Backbone“).

4.1.5 Parametervorschläge aufgrund der Konsultation: Anzahl Verzweigungen und Maschen

Im Rahmen der Konsultation wurden von den FNB keine neuen Parameter vorgeschlagen. Jedoch wurde mit Verweis auf netztechnische Flexibilitäts- und Komplexitätserfordernisse nahegelegt, den Parameter Polygonfläche zu verwenden. Da die Polygonfläche die genannten Erfordernisse höchstens indirekt erfasst (vgl. Diskussion in Abschnitt. 4.3.2), werden anhand der Strukturdaten II zusätzlich Parameter gebildet, welche die Komplexität der Netze evtl. direkter zum Ausdruck bringen können als bspw. die Polygonfläche oder die Anzahl der Anschlusspunkte.

Ausgehend davon, dass die FNB im Rahmen der Konsultation darauf hingewiesen haben, dass jede Verzweigung die Rohrreibungszahl erhöht (insb., weil an Verzweigungen oft Regler, Schieber etc. angebracht sind) und überdies die Komplexität der Netzsteuerung und der generelle Flexibilitätsbedarf der Netze mit der Anzahl der Verzweigungen und Maschen steigt, soll je Netzbetreiber erstens die Anzahl der Verzweigungen und zweitens die Zahl der unabhängigen Maschen erfasst werden. Die Details der Parameterbildung finden sich in Anhang I.2.11.

4.1.6 Zwischenergebnis: In der aktuellen KTA zu untersuchende Parameter

Gestützt auf die obigen Ergebnisse werden die in **Tabelle 5** aufgeführten grundlegenden Parameter gebildet und untersucht.

Tabelle 5: Zu untersuchende Parameter

Parametergruppe	Parameter [Einheit]	Beschreibung
Rohrgeometrie	Leitungslänge [km]	Längen aller Leitungsabschnitte
	Rohrleitungsvolumen [m ³]	Rohrleitungsvolumina aller Leitungsabschnitte
	Rohrleitungsmantelfläche [m ²]	Rohrleitungsmantelflächen aller Leitungsabschnitte
Jahresarbeit	Jahresarbeit Einsp. [nm ³]	Eingespeiste Jahresarbeit im Bezugsjahr
	Jahresarbeit Aussp. [nm ³]	Ausgespeiste Jahresarbeit im Bezugsjahr
Last	Netzlaut Einsp. [nm ³ /h]	Zeitgleiche Jahreshöchstlast der Einspeisungen
	Netzlaut Aussp. [nm ³ /h]	Zeitgleiche Jahreshöchstlast der Ausspeisungen
	Jahreshöchstlast Einsp. [nm ³ /h]	Zeitungleiche Jahreshöchstlast der Einspeisungen
	Jahreshöchstlast Aussp. [nm ³ /h]	Zeitungleiche Jahreshöchstlast der Ausspeisungen
Anschlüsse	Anzahl Einspeisepunkte [#]	Um Redundanzen bereinigte Einspeisepunkte (EP)
	Anzahl Ausspeisepunkte [#]	Um Redundanzen bereinigte Ausspeisepunkte (AP)
	Anzahl Ein- und Ausspeisepkt. [#]	Um Redundanzen bereinigte Anzahl EP und AP
Druck	Eingangsdruck [bar]	Mengengewichteter mittlerer Eingangsdruck
	Ausgangsdruck [bar]	Mengengewichteter mittlerer Ausgangsdruck
	Druckdifferenz [bar]	Eingangsdruck minus Ausgangsdruck
	Druckniveau [bar]	Mengengewichtetes mittleres Druckniveau aller Ein- und Ausgänge (EP und AP)
Verdichter	Anzahl Verdichter [#]	Anzahl der angegebenen Verdichtereinheiten
	Verdichterleistung [MW]	Installierte Verdichterkapazität
	Treibenergie [MWh]	Von den Verdichtern verbrauchte Energie
Fläche	Polygonfläche [m ²]	Fläche der konvexen Hüllen der Netze
Transportmoment	Transportmoment Leistung	Transportmoment gebildet mit Q _{max}
	Transportmoment Arbeit	Transportmoment gebildet mit Jahresarbeit Q _{Jahr}
Transportwurzelmoment	Transportwurzelmoment	Wurzel der Mengen je Leitungsabschnitt mal Länge
Transportmomentfläche	Transportmomentfläche	Transportmoment mal Polygonfläche
	Wurzel (Transportmomentfläche)	Wurzel aus der Transportmomentfläche
Mittl. Transportdistanz	Mittl. Transportentfernung [km]	Gewichtete Distanz zwischen EP und AP Flüssen
Netzcharakteristiken	Anzahl Verzweigungen [#]	Anzahl der Verzweigungen im Netzgebiet
	Anzahl Maschen [#]	Anzahl der Maschen im Netzgebiet
Horizontaler Transport	Horizontaler Transportanteil [%]	Anteil horizontale Q _{max} bzw. Q _{Jahr} Ausspeisungen
	Horizontaler/vertikaler Transport	Absolute horizont./vertikale Q _{max} bzw. Q _{Jahr} Mengen
Gebietseigenschaften	Bodenklassen	Bodenklassen mit erhöhter Kostenwirkung
	Grabbarkeit	Grabbarkeitsklassen mit erhöhter Kostenwirkung
	Weitere	Mittlere Hangneigung, maximale Höhendifferenz

Quelle: Eigene Darstellung; blau eingefärbt die im Modell der RP2 verwendeten Parameter, rot eingefärbt neu gebildete Parameter

Für die in der Tabelle angegebenen Parameter werden folgende Variationen mitgeführt:

- **Druck:** Zusätzlich zur Bildung mittels P_{min} und Q_{max} Varianten mit mengengewichtetem Betriebsdruck und Q_{Jahr} ;
- **Transportmoment:** Zusätzlich zu Q_{max} gebildet mit Q_{Jahr} ; einmal ohne Teilnetz Betrachtung auf Basis der Luftliniendistanzen (LD) und einmal in vollständigen Teilnetzen auf Basis realer Distanzen (RD) auf den vorhandenen Leitungstrassen (trassentreu);
- **Polygonfläche:** Neben geometrischer Vereinigung von vollständigen Teilnetzen zusätzlich für alle Leitungsabschnitte und Anschlüsse unabhängig von ihrer Verbundenheit;
- **Gebietseigenschaften:**
 - **Bodenklassen:** Neben sinngemäßen Übertragungen der Parameter des EVG2 für Fernleitungsnetzbetreiber zusätzlich ein Parameter, der Leitungstrassen der Fernleitungsnetzbetreiber mit aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht besonders teuren vorherrschenden Bodenklassen abbildet;
 - **Grabbarkeit:** Leitungstrassen in Grabbarkeitsklassen mit aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht besonders teuren vorherrschenden Grabbarkeitsklassen;
 - **Weitere:** Mittlere Hangneigung und maximale Höhendifferenz der Leitungstrassen.

Insgesamt handelt es sich um 55 Parameter. Die genaue Beschreibung der Parameter inkl. ihrer Varianten finden sich in **Anhang I** (Abschnitte I.2.1 bis I.2.12). **Anhang II** umfasst die vollständige Liste der Parameter, für die eine Bereitstellung der berechneten Werte zu Informations- und Kontrollzwecken im Rahmen der an die Netzbetreiber verschickten Datenquittungen erfolgte.¹⁹ Auf dieser Datengrundlage basiert die Modellentwicklung und -berechnung für den Effizienzvergleich.

4.1.7 Exkurs: Veranschaulichung der GIS-basierten Parameter

Aus den obigen Ausführungen geht hervor, dass wie in der RP2 GIS-basierte Parameter gebildet werden, die sich aus den georeferenzierten Informationen der Netzbetreiber ableiten. Für jeden Leitungsabschnitt liegen die Koordinaten des Anfangs- und Endpunktes vor, und für jeden NKP/NAP, Druckregler und Verdichter die Koordinate des jeweiligen Standorts. Die GIS-basierten Parameter vermögen Herausforderungen abzubilden, die einem Netzbetreiber aus der Verbindung der einzelnen Ein- und Ausspeisepunkte, also der Sicherstellung des Gasflusses von allen Einspeise- zu allen Ausspeisepunkten, erwachsen.

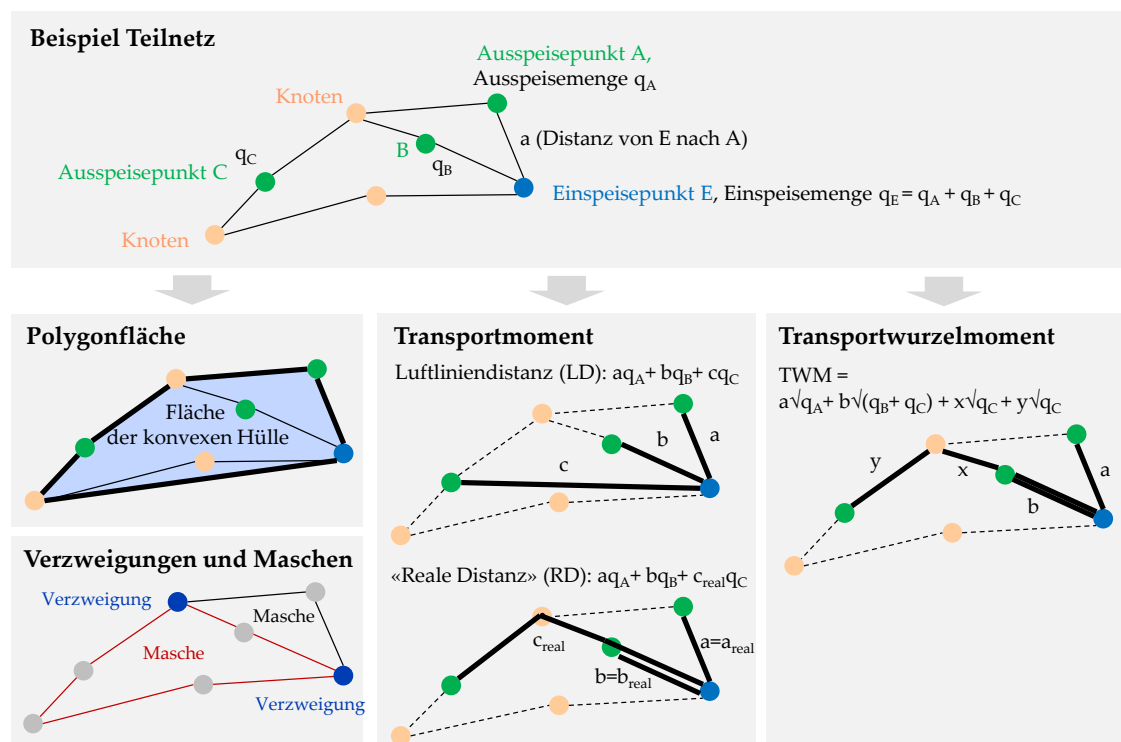
Die gebildeten GIS-basierten Parameter sind in **Abbildung 13** schematisch anhand eines vereinfachten Beispielnetzes dargestellt:

- **Polygonfläche** als konvexe Hülle aller Netzknoten des Beispielnetzes (Mitte links in **Abbildung 13**, Details vgl. **Anhang I.2.6**);
- **Transportmoment** als distanzgewichtete Flussmatrix zwischen den Ein- und Ausspeisepunkten, ermittelt mit Luftliniendistanzen (LD) analog zur RP2 und neu auch Netzdistancen im Sinne von realen Distanzen (RD) durch das angegebene Leitungssystem (Mitte in **Abbildung 13**, Details vgl. **Anhang I.2.8**);

¹⁹ Kosten für Gasmischstationen werden den Marktgebietsverantwortlichen anderweitig vergütet. Ein entsprechender Parameter wurde der Vollständigkeit halber analog der Verdichter gebildet. Der Parameter wurde im Bottom-up-Verfahren zugelassen und im Rahmen der Second-Stage-Analyse geprüft, ansonsten jedoch nicht gesondert analysiert.

- **Transportwurzelmoment** als Weiterentwicklung, bei der die sich in der Transportmomentberechnung ergebenden Flüsse den einzelnen Leitungsabschnitten zugeordnet werden und durch Wurzelbildung der so ermittelten Flüsse je Leitungsabschnitt ein Bezug zum notwendigen Leitungsdurchmesser hergestellt wird (rechts in Abbildung 13, Details vgl. Anhang I.2.9).
- **Anzahl Verzweigungen bzw. Maschen** als mögliches Abbild der Komplexitätsanforderungen der Netzsteuerung und dem generellen Flexibilitätsbedarf der Netze. Bei den Verzweigungen wird jeder Leitungsabschnitt gezählt, der von einem Knoten ausgeht und die Zahl zwei überschreitet (von Knoten ohne Verzweigung gehen max. zwei Stränge ab). Bei den Maschen wird die Anzahl unabhängiger Maschen gezählt, also nur die Maschen, die sich nicht aus anderen Maschen bilden lassen (links unten in Abbildung 13, Details vgl. Anhang I.2.9).

Abbildung 13: Darstellung der GIS-Parameter



Quelle: Eigene Darstellung

4.2 Konzeptionelle Einordnung der Parameter

Die oben aufgeführten Parameter werden nachfolgend entlang der nachfolgenden drei Schritte konzeptionell eingeordnet:

1. **Einteilung in Gruppen (Abschnitt 4.2.1):** In einem ersten Schritt werden analytisch verwandte Parameter in Gruppen geordnet.
2. **Zuordnung der Parameter/Gruppen zu Versorgungsdimensionen (Abschnitt 4.2.2):** In einem zweiten Schritt werden die Parametergruppen den drei grundlegenden Versorgungsdimensionen Transport, Kapazitäts- und Dienstleistungsbereitstellung zugeordnet.
3. **Klassifizierung der Gruppen/Parameter nach Kontrollierbarkeit durch den FNB (Abschnitt 4.2.3):** In einem dritten Schritt wird die Kontrollierbarkeit der Parameter(gruppen) durch die Netzbetreiber beurteilt.

In einem vierten Schritt werden die so gewonnenen Erkenntnisse zusammengeführt (Abschnitt 4.2.4).

4.2.1 Gruppenbildung

Die Gruppenzuordnung der Parameter ist in Tabelle 5 niedergelegt (Gruppen in der Spalte links), die ausführliche Liste findet sich in Anhang II. Beispielsweise werden eingespeiste und ausgespeiste Jahresarbeit zur Gruppe «Jahresarbeit» zusammengefasst. Die Gruppen werden später z.B. bei der ökonomischen Kostentreiberanalyse gesondert analysiert.

4.2.2 Zuordnung zu Versorgungsdimensionen

Analog zu früheren Effizienzvergleichen von Swiss Economics und SUMICSID (insbesondere auch EVS2) werden die Parameter analytisch den nachfolgenden drei Versorgungsdimensionen zugeordnet, welche die den Kunden bereitgestellten Outputs aus Abbildung 2 strukturieren.²⁰

- **Transport** («Arbeit», «Betrieb»): Kennzeichnet Parameter, welche vorrangig jene Kosten abbilden, die mit dem realen Transport von Gas durch ein vorhandenes („vorgehaltenes“) System zur Bedienung der Kundennachfrage zusammenhängen. Zu diesen arbeitsabhängigen Kosten zählen u.a. die Kosten der Treibenergie für Verdichter.
- **Kapazitätsbereitstellung** («Leistung», «Vorhaltung»): Umfasst Parameter, welche vorrangig Kosten für die jederzeit betriebsfähige Vorhaltung von Transportkapazität abbilden. Zu diesen „nicht-arbeitsabhängigen“ Kosten zählen z.B. Kapitalkosten, die sich aus dickeren Rohrdurchmessern oder höheren maximalen Ausspeiseleistungen (Q_{max}) an Ausspeisepunkten ergeben. Die Jahreshöchstlast ist ein Beispiel für einen Parameter, welcher der Dimension Kapazitätsbereitstellung zugeordnet wird.
- **Dienstleistungsbereitstellung** («Anschluss» der Kunden ans Netz): Der Dimension „Dienstleistung“ werden Parameter zugeordnet, welche jene Kosten abbilden, welche Grundvoraussetzung für die Belieferung von Einzelkunden mit Gas sind. Hierzu zählt die potenzielle Anschließbarkeit eines Kunden (versorgtes Gebiet), der Anschlusspunkt eines Einzelkunden

²⁰ Von CONSENTEC und Frontier wurden in der RP2 die drei Dimensionen „Kapazitätsbereitstellung“, „Netzausdehnung“ und „Granularität“ verwendet. Letztere beiden stellen keine eigentlichen Outputs dar, sondern sind in der nachfolgenden Logik Teilaspekte, die sich aus der Dienstleistungsdimension ergeben. Müssen z.B. mehr Anschlüsse bedient werden, ergibt sich eine erhöhte Granularität. Liegen die Anschlüsse weiter auseinander, ergibt sich eine höhere Netzausdehnung. Die Transportdimension ist demgegenüber neu.

inkl. Kundenverwaltung (Vertragsmanagement, Zählung und Abrechnung) und dessen Anbindung an Einspeisepunkte durch ein Leitungsnetz. Aus der Kombination der erbrachten Dienstleistungen ergeben sich wesentliche Teilaspekte wie die „Netzausdehnung“ und die „Komplexität der Netztopologie“ (Verästelung, Vermaschung), die mit einer höheren Granularität einhergeht, inklusive entsprechender Flexibilitätserfordernisse (soweit nicht schon durch die Kapazitätsdimension abgebildet). Bei der Beurteilung von Effizienzvergleichsmo-
dellen wird später darauf geachtet, dass diese wichtigen Teilaspekte durch die Parameterwahl angemessen abgebildet sind. Ein Parameter der Dienstleistungs-Dimension ist z.B. die Anzahl der Ein- und Ausspeisepunkte. Der Parameter bildet zum einen direkt die mit einem Anschluss einhergehenden fixen Betriebskosten ab, zum anderen stellt er einen Proxy für die Komplexität der Versorgungsaufgabe dar.

Die Versorgungsdimensionen stellen eine „top-down“ Zerlegung der Gesamtheit an Versorgungsaufgaben dar, die von den zu untersuchenden FNB im regulierten Bereich erbracht werden. Ein Großteil der Parameter kann einer Versorgungsdimension zugeordnet werden. Gleichwohl ist das Ergebnis der Zuordnung von Parametern zu Versorgungsdimensionen nicht so zu verstehen, dass jeder Parameter bzw. jede Parametergruppe ausschließlich zu einer Versorgungsdimension gezählt werden muss. Dies wird insbesondere deutlich, wenn man bedenkt, dass einige Parameter sich als Aggregation aus anderen Parametern, die ggf. unterschiedlichen Versorgungsdimensionen zuzuordnen sind, ergeben.

Aus der Zuordnung eines Parameters oder einer Parametergruppe zu einer einzelnen Versorgungsdimension folgt nicht, dass die Dimension durch diesen Parameter bzw. diese Parametergruppe vollständig abgebildet würde. Die Zuordnung erleichtert lediglich die Bildung grundsätzlich geeigneter Parametersätze, indem überprüft wird, ob ein vorgeschlagener Parametersatz die drei Versorgungsdimensionen einerseits vollständig und andererseits ohne Überschneidungen abdeckt.

Tabelle 6 zeigt die vorgenommene Zuordnung der Parametergruppen (bzw. Einzelparameter, soweit aus konzeptionellen Gründen eine Differenzierung angezeigt ist).

Tabelle 6: Zuordnung der Parameter zu den Versorgungsdimensionen

	Transport („Arbeit“)	Kapazität („Leistung“, „Vorhaltung“)	Dienstleistung („Anschluss“)
Parametergruppen	Jahresarbeit	Last	Anschlüsse
			Leitungslänge
			Rohrleitungsvolumen und –mantelfläche
	Mittlere Transportdistanz	Transportwurzelmoment	
		Transportmoment	Polygonfläche
		Transportmomentfläche (alle drei Dimensionen)	
	Verdichter (Treibenergie)	Verdichterleistung	
		Druck	Netzcharakteristiken
	Horiz. Transport Arbeit	Horiz. Transport Leistung	Gebietseigenschaften

Quelle: Eigene Darstellung

Der Tabelle lässt sich entnehmen, dass die *Polygonfläche* der Dienstleistungsdimension zugeordnet wird, da sie die Fläche ausdrücken soll, die vom Gasnetzbetreiber versorgt wird, was für

den Anschluss eines Kunden Voraussetzung ist. Das *Transportmoment* wird sowohl der Transport- wie auch der Kapazitätsdimension zugeordnet, da in der Berechnung dieses Parameters die Transportdistanz mit den transportierten Mengen (Jahresarbeit, maximale stündliche Mengen Q_{max}) kombiniert wird, und somit die über eine Distanz zu transportierende (Maximal)Menge ausdrückt. Demgegenüber wird das *Transportwurzelmoment* der Kapazitäts- und Dienstleistungsdimension zugeordnet, da es nicht auf der transportierten Menge (Arbeit) aufsetzt, sondern gestützt auf Q_{max} implizit die je Leitungsabschnitt notwendige Kapazität abbildet, welche mit der Leitungsabschnittslänge gewichtet wird. *Rohrleitungsvolumen* und *Rohrleitungsmantelfläche* bilden als Kombination von Durchmesser (Kapazität) und Leitungslänge (Dienstleistung/Anschluss) die beiden Dimensionen Kapazitäts- und Dienstleistungsbereitstellung ab. Demgegenüber wird die *Leitungslänge* nur der Dienstleistungsdimension zugeordnet, da die Länge der Leitungsverbindung zwischen einzelnen Knoten selbst noch keine Aussage über die Kapazität der Röhre enthält, die Verbindung zum Kundenanschluss jedoch Voraussetzung für eine Belieferung ist. Die Leitungslänge gibt die (ungewichtete) Transportdistanz an und ist damit implizit auch lose mit der Dimension Transport verbunden.²¹

Exkurs: Zuordnung der netztechnischen Flexibilität zur Dienstleistungsdimension

Im Rahmen der Konsultation wurde von verschiedenen Netzbetreibern gefordert, mit der „netztechnischen Flexibilität“ eine vierte Dimension aufzunehmen, der die Kosten einer unterschiedlichen „Flexibilitätsbereitstellung“ abbilden soll. Als Begründung wird die ggü. den Untersuchungen zur RP2 erhöhte Zahl an FNB genannt, die eine größere Heterogenität zwischen den FNB zur Folge hätte.

Der Heterogenität der Netze wird an verschiedenen Stellen im Effizienzvergleich Beachtung geschenkt (Durchschnittskostenmodelle, Auffälligkeitsanalyse, Ausreißeranalysen, usw.). Dies gilt bereits für die RP2 und wird für die RP3 fortgeführt. Dabei wird einerseits eine gewisse Verfahrenskontinuität angestrebt, aus der jedoch weder zwangsläufig eine Ergebniskontinuität resultiert noch sollte hierdurch eine zumindest schrittweise Fortentwicklung der Verfahren – insb. in Bezug auf Sachgerechtigkeit und Nachvollziehbarkeit – eingeschränkt werden.

Die wesentlichen Versorgungsaufgaben, die heute von den in Deutschland tätigen FNB erbracht werden, wurden auch schon in und vor der RP2 erbracht. Die zusätzlich in den Markt eingetretenen Netzbetreiber erbringen im Grundsatz die gleiche Art energiewirtschaftlicher Leistungen wie die zwölf FNB in der letzten Untersuchung. Es haben sich lediglich Anzahl und Marktanteil der Unternehmen verändert, die als ähnlich gelagerte Gesellschaften vorrangig eine Transit-Transportaufgabe erbringen. Daher hat sich – zumindest aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht – zwar die Zahl der Unternehmen geändert, nicht aber die Heterogenität der erbrachten Leistungen. Auch die Erhöhung des Anteils von FNB mit dem Schwerpunkt auf internationalen Transporten verändert lediglich das Gewicht dieser Versorgungsaufgaben in der Gesamtbetrachtung über alle FNB. Um dies abbilden zu können wird u.a. die Parametergruppe horizontaler Transport gebildet und geprüft (vgl. 4.1.4).

²¹ Allerdings hängt der Transportaufwand, insbesondere die Betriebskosten für Verdichter, stark davon ab, ob in einem gestreckten Netz über eine lange Distanz transportiert, oder in einem eher sternförmig aufgebauten Netz verteilt werden soll. Darüber hinaus besitzt die zulässige Druckdifferenz zwischen Ein- und Ausspeisung einen erheblichen Einfluss auf die Transportkosten. Eine Parameterkombination von beispielsweise den Arbeitskosten für Verdichter und Leitungslänge sollte deshalb aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht nicht aufgrund einer doppelten Berücksichtigung der Transportdimension verworfen werden.

Auf die Einführung einer vierten Versorgungsdimension eigens für die netztechnische Flexibilität wird verzichtet, diese wird als Teilaspekt der Dienstleistungsdimension im Auge behalten. Die zur Abbildung der Flexibilität gebildeten Parameter gemäß Abschnitt 4.1.5 werden entsprechend der Dimension der Dienstleistungsbereitstellung zugeordnet. Diese ist eng mit der Flexibilitätsbereitstellung verwandt, was sich in den ihr ebenfalls zugeordneten Parametern Anschlüsse und Polygonfläche zeigt (wobei die Polygonfläche im Rahmen der Konsultation von Netzbetreibern als ein geeigneter Parameter bezeichnet worden ist, um die netztechnische Flexibilität abzubilden).

Von dieser Überlegung getrennt wird weiter hinten in Abschnitt 5.3.3 diskutiert, ob die Verwendung von Parametersätzen mit vier Parametern Sinn ergibt. Die Anzahl der Parameter wird dabei ausdrücklich nicht von der Anzahl Dimensionen bestimmt, beispielsweise wurden im EVS2 für die analogen drei Versorgungsdimensionen über zehn sich geeignet ergänzende Parameter verwendet.

4.2.3 Zuordnung nach Kontrollierbarkeit

Gemäß § 13 Abs. 3 ARegV unterstützen Parameter die Belastbarkeit des Effizienzvergleichs, wenn sie „nicht durch Entscheidungen des Netzbetreibers bestimmbar“ sind. Aktivitäten des Netzbetreibers können dabei unmittelbare oder mittelbare Wirkungen auf die beeinflussbaren Kosten haben. Eine unmittelbare Wirkung entsteht bspw. bei der Festlegung von Boni der Geschäftsleitung. Eine mittelbare Wirkung entsteht, wenn ein Netzbetreiber abwägt, ob er zur Erreichung einer bestimmten Kapazität Verdichter einsetzen oder größere Rohrdurchmesser verbauen soll. Demgegenüber wirken Parameter wie „Gasnachfrage“, „Grabbarkeit des Bodens“ oder „Preisniveau Leitungsbau bei Errichtung“ zwar kostentreibend, der Netzbetreiber hat hierauf aber keinen signifikanten Einfluss. In diesem Sinne nicht kontrollierbar durch den Netzbetreiber sind generell Z-Parameter – ein VNB kann beispielsweise den Bodentyp nicht beeinflussen, sondern muss mit dieser exogen vorgegebenen Rahmenbedingung umgehen, z.B. indem schwierige lokale Bedingungen entweder durch geeignete Trassenwahl umgangen oder optimal überwunden werden.

Bei Y-Parametern wird nachfolgend wie bspw. beim EVS2 nach deren Output- und Input-Orientierung unterschieden:

- *Inputorientierte X(Y)-Parameter* sind grundsätzlich direkt kontrollierbar. Die mit den Parametern widerspiegelten Inputs, z.B. Verdichter oder Leitungskapazitäten verursachen direkt Kosten, stehen aber nicht unmittelbar mit der erbrachten Dienstleistung (Output) im Zusammenhang. Bspw. bringt eine Verdoppelung der Rohrdurchmesser per se keine zusätzliche oder verbesserte Leistung, erhöht aber direkt die Kosten. Gerade bei weit in der Vergangenheit getätigten Investitionen ist allerdings heute die direkte Beeinflussbarkeit nicht gegeben. Ebenfalls können regulatorische Vorgaben oder Kontrollmechanismen einschränkend wirken. Insofern werden inputorientierte Parameter als eher endogene Parameter gewertet, sie werden aber nicht im Vorherein aus der Analyse ausgeschlossen, zumal auch die ARegV in § 13 Abs. 3 S. 4 teils eher input-orientierte Parameter als mögliche Vergleichsparameter vorsieht.
- *Outputorientierte Y-Parameter* sind demgegenüber grundsätzlich weniger gut kontrollierbar. Sie ergeben sich aus den von den Kunden nachgefragten Dienstleistungen, so etwa die Jahreshöchstlast oder die Ausspeisung. Outputorientierte Y-Parameter werden entsprechend als stärker exogene Parameter bezeichnet in dem Sinn, als dass sie durch Entscheidungen der Netzbetreiber weniger gut beeinflussbar sind.

Aus regulatorischer Sicht sind im Rahmen einer Anreizregulierung grundsätzlich outputorientierte Y-Parameter vorzuziehen.

Die vorgenommene Klassifizierung nach Kontrollierbarkeit umfasst somit folgende vier Kategorien:

- C(Y,Z): Aufwandsparameter (Totex, sTotex);
- Y: Output-/Nutzenorientierte, exogene Y-Parameter, bspw. Ausspeisung;
- X(Y): Input-/Anlagenorientierte, endogene Y-Parameter, bspw. Anzahl Verdichter;
- Z: Nicht kontrollierbare, exogene Z-Parameter, welche die Leistungserstellung begünstigen oder verteuern, z.B. Bodenbeschaffenheit.

Tabelle 7 fasst die vorgenommene Einordnung der Parameter nach Kontrollierbarkeit zusammen.

Tabelle 7: Einordnung der Parameter nach Kontrollierbarkeit

C(Y,Z)	X(Y): Input-/Anlagenorientiert, stärker endogen	Y, Z: Output-/Nutzenorientiert, stärker exogen
Totex	Rohrgeometrie	Jahresarbeit
sTotex (standardisiert)		Last
		Anschlüsse
	Verdichter	Druck
	Polygonfläche	Transportmoment
	Transportmomentfläche	Transportwurzelmoment
		Mittlere Transportdistanz
		Horizontaler Transport
	Maschen	Verzweigungen
		Gebietseigenschaften

Quelle: Eigene Darstellung

Da die *Polygonfläche* unabhängig von der Kundennachfrage ist und ausschließlich durch die äußeren Endpunkte des vom FNB betriebenen Leitungssystems bestimmt wird, ist diese durch die vom FNB betriebenen Anlagen definiert (Anschlüsse, Knoten). Der Netzbetreiber kann insb. über Bruchteilseigentum bzw. Pachtverträge Einfluss auf die Endpunkte des von ihm betriebenen Systems nehmen. In der Variante *yArea_all*, bei der alle Anschlusspunkte und Leitungen unabhängig von ihrer Verbundenheit berücksichtigt werden, ist die Polygonfläche noch klarer beeinflussbar durch die Netzbetreiber: Zum einen kann die vertragliche Hinzunahme eines einzelnen isolierten, weit entfernten Punktes die Fläche stark erweitern, ohne dass dies mit einer entsprechenden Vergrößerung der Versorgungsaufgabe einhergehen würde, wie wenn dieser Punkt mit einer neuen Leitung erschlossen worden wäre. Zum anderen kann auch das Angebot des FNB an VNB die Polygonfläche beeinflussen, da es unterschiedliche Verfahrensweisen der FNB hinsichtlich Zuständigkeit und Eigentum von Anschlussleitungen gibt. Zu bemerken ist in dem Zusammenhang, dass bei der Polygonfläche Mengen nicht berücksichtigt werden, es muss also am betreffenden Punkt keine effektive Ein- bzw. Ausspeisung erfolgen. Schließlich besteht für die FNB – anders als für VNB – keine Grundversorgungsverpflichtung zur Abdeckung gewisser Flächen. Aus diesen Erwägungen wird die Polygonfläche als stärker endogen klassifiziert, obgleich die Polygonfläche durch die zu beliefernden Entry- und Exitpunkte (zumindest vor Einführung der Genehmigungspflicht der BNetzA im Rahmen des Netzausbauplanes) auch einen gewissen exogenen Bezug aufweist. Da die *Transportmomentfläche* sich aus der Polygonfläche zusammensetzt, gilt gleiches auch für diesen Parameter.

Bei den Netzcharakteristiken wird zwischen *Maschen* und *Verzweigungen* differenziert. Während einzelne, zu verbindende Anschlüsse direkt die Anzahl Verzweigungen beeinflusst, liegt die Anzahl der Maschen stärker in der Hand der Netzbetreiber. Verzweigungen werden daher als eher exogen eingeordnet und Maschen als eher endogen.

Weitere Ausführungen zur Kontrollierbarkeit der Parameter finden sich in Abschnitt 4.3.1.

4.2.4 Zusammenfassung

Die Zuordnung der Vergleichsparameter nach Versorgungsdimensionen und Kontrollierbarkeit ist in **Tabelle 8** zusammengefasst. Dunkelblau eingefärbt sind die in der RP2 gewählten Vergleichsparameter.

Tabelle 8: Einordnung nach Versorgungsdimension und Kontrollierbarkeit

	Transport („Arbeit“)	Kapazität („Leistung“, „Vorhaltung“)	Dienstleistung („Anschluss“)
Y, Z	Jahresarbeit	Last	Anschlüsse
Output-/ Nutzen- orientiert; eher exogen	Transportmoment		
	Mittlere Transportdistanz	Transportwurzelmoment	
		Druck	Gebietseigenschaften
	Horiz. Transport Arbeit	Horiz. Transport Leistung	Verzweigungen
X(Y)			Leitungslänge
Input-/ Anlagen- orientiert; eher endogen	Rohrleitungsvolumen und -mantelfläche		
	Verdichter (Treibenergie)	Verdichterleistung	Polygonfläche
	Transportmomentfläche (alle drei Dimensionen)		
	Maschen		

Quelle: Eigene Darstellung

Mit Hilfe der Gruppenbildung und der Zuordnung zu Versorgungsdimensionen kann später beurteilt werden, inwieweit Parametersätze die verschiedenen Versorgungsdimensionen abbilden. Die drei Versorgungsdimensionen werden allerdings nicht als gleich wichtig erachtet:

- „Need to have“: Im finalen Modell soll die auslegungsrelevante Kapazitätsdimension abgebildet werden. Ebenso soll die Dienstleistungsdimension enthalten sein, darin eingeschlossen die Aspekte Netzausdehnung und Granularität der Versorgungsaufgabe mit Flexibilität/Komplexität der Netze.
- „Nice to have“: Nicht zwingend zu berücksichtigen ist die Transportdimension, da diese in der Regel für das Netz nicht auslegungsrelevant ist und zudem stark mit Parametern der Kapazitätsdimension korreliert. So lag beispielsweise im Modell der RP2 kein Parameter vor, der die Transportdimension abgebildet hätte, ebenso war beim EVS2 keiner der gewählten Parameter der Transportdimension zuzurechnen. Parameter der Transportdimension kommen daher insbesondere für die Ergänzung von Modellen in Frage, werden aber nicht a priori ausgeschlossen.

Die „Exogenität“ eines Parameters steht in einem Zusammenhang mit dessen einhergehender Kontrollierbarkeit. Je exogener ein Parameter, desto wünschenswerter seine Berücksichtigung in einem Effizienzvergleichsmodell. Stärker exogene, outputorientierte Parameter der oberen Tabellenhälfte werden also ceteris paribus inputorientierten Parametern vorgezogen, wobei die ARegV gemäß § 13 Abs. 3 S. 4 ARegV die vorliegend als eher endogen eingestuft Parameter Leitungslänge, Rohrvolumen und versorgte Fläche nicht ausschließt, sondern im Gegenteil zur Berücksichtigung gar nahelegt. Die genannten Parameter werden insofern aus Sicht des Verordnungsgebers explizit als ausreichend exogen eingestuft. Daher werden inputorientierte Parameter bei der Modellbildung grundsätzlich als gleichwertig betrachtet, und erst bei der finalen konzeptionellen Beurteilung von Modellen wird die Exogenität als ein Kriterium unter weiteren beurteilt.

4.3 Qualitative Diskussion der Parameter aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht

Die Parameter werden in diesem Kapitel in der durch Tabelle 5 vorgegebenen Reihenfolge qualitativ diskutiert. Im Anschluss werden einige ergänzende Überlegungen angestellt.

4.3.1 Diskussion der Parameter

4.3.1.1 Rohrgeometrie

Leitungslänge

Die Baukosten einer Leitung sind im Bereich der für FNB üblichen Entfernungen quasi längenproportional. Die Leitungslänge ist damit ein wichtiger Kostentreiber. Jedoch vermag die Leitungslänge alleine die Kapitalkosten nicht abzudecken, da diese auch wesentlich vom Rohrlängendurchmesser abhängen: Die Baukosten einer Leitung sind im Bereich der für FNB üblichen Querschnitte quasiproportional zum Durchmesser, vgl. vorgängig Abschnitt 4.1.3, was bei Einsatz der Leitungslänge in einem Effizienzvergleichsmodell einen geeignet komplementären Parameter erfordern würde. Gleiches gilt hinsichtlich Fremdnutzungsanteilen, da die Leitungslänge als Parameter der Dienstleistungsdimension nicht um Fremdnutzungsanteile bereinigt wird (vgl. Abschnitt I.1.2, üblicherweise wird ein Fremdnutzungsanteil über die volle Länge eines Leitungsabschnitts vereinbart und betrifft daher ggf. den Querschnitt bzw. die Mantelfläche).

Der Parameter besitzt einen eher endogenen Charakter, da im Grundsatz der Netzbetreiber bestimmt, ob er eine Leitung legen will und aus der Existenz einer Leitungsverbindung nicht automatisch folgt, dass diese tatsächlich auch heute bzw. künftig notwendig für den Betrieb eines effizienten Netzes ist.

Rohrleitungsmantelfläche

Die Rohrleitungsmantelfläche ergibt sich aus der Multiplikation von Länge einer Leitung und deren Umfang. Der Umfang, der die Kapazitätsdimension abbildet und um Fremdnutzungsanteile bereinigt wird, ist linear mit dem Durchmesser der Rundrohre verknüpft. Folglich trägt dieser aggregierte Parameter den sowohl mit der Leitungslänge als auch mit dem Durchmesser quasilinear steigenden Kosten in beiden Dimensionen angemessen Rechnung. Eine Verlängerung der Leitung wird kostenseitig in guter Näherung ebenso korrekt abgebildet wie die Veränderung des Durchmessers. Dieser Punkt stellt den wesentlichen Unterschied zu Parametern dar, die näherungsweise linear mit der Leitungslänge und dem Querschnitt verbunden sind (z.B. Transportmoment).

In der Rohrleitungsmantelfläche ist je Leitungsabschnitt die Leitungslänge mit dem Durchmesser verknüpft. Der Parameter weist damit im Vergleich zur Leitungslänge einen vergleichsweise endogeneren Charakter auf, da Netzbetreiber bei der Verlegung von Leitungen frei bezüglich der Bestimmung des Durchmessers sind.²²

²² Würde anstelle der realen Durchmesser nur der für den Transport von Q_{\max} notwendige Durchmesser angesetzt werden, wäre eine gute Verknüpfung mit einem zentralen Output, der Transportkapazität Q_{\max} , gegeben und entsprechende Parameter könnten als im Wesentlichen exogen eingestuft werden. Eine größere begriffliche Klarheit wird dadurch erreicht, dass man für einen solchen Parameter nicht die intuitiv eng mit der realen Rohrleitungsge-

Rohrleitungsvolumen

Die Baukosten einer Leitung steigen bei gegebenem Durchmesser quasi linear mit zunehmender Länge, also auch linear mit dem auf diese Weise zunehmenden geometrischen Volumen. Bei gegebener Länge dagegen steigen die Baukosten nicht linear, sondern mit abnehmenden spezifischen Kosten je zusätzlichem m^3 Rohrvolumen (das Rohrleitungsvolumen erhöht sich näherungsweise quadratisch mit dem Durchmesser, so dass der Durchmesser nur über die Wurzelfunktion, also unterproportional mit dem Volumen, steigt).²³ Ähnlich wie beim Transportmoment vermischt sich beim Rohrleitungsvolumen eine überhöhte Wichtung des Querschnitts mit der kostenlinearen Wichtung der Transportentfernung (vgl. auch Abschnitt 4.1.3). Etwaige Fremdnutzungsanteile werden angemessen berücksichtigt.

Das Rohrleitungsvolumen wird über die real verbauten, in der Entscheidung der FNB liegenden Durchmesser gebildet und hat deshalb wie die Mantelfläche einen eher endogenen Charakter.

4.3.1.2 Jahresarbeit

Während die Kapitalkosten für die Errichtung von Transportmöglichkeiten anfallen und die Abnutzung der vorgehaltenen Transportkapazität vorrangig über den Zeitablauf erfolgt und nur geringfügig von der tatsächlichen Nutzung abhängt, beeinflusst die tatsächlich über ein System transportierte Energiemenge im Wesentlichen nur die Betriebskosten. Das Niveau der Betriebskosten für eine gegebene Transportaufgabe hängt jedoch nicht unwesentlich von dem vorgehaltenen System ab. Insbesondere ergeben sich mit zunehmenden Durchmessern geringere Druckverluste, so dass für den Transport Verdichterleistung eingespart werden kann. Es besteht somit ein klassischer Trade-Off zwischen den Errichtungs- und Betriebskosten, dessen Optimum wesentlich durch die tatsächlich transportierte Jahresarbeit beeinflusst wird. Es ist also nicht zu erwarten, dass die Austauschbeziehung zwischen Errichtungs- und Betriebskosten durch ein festes Verhältnis gekennzeichnet ist. Vielmehr wird ein Gesamtkostenoptimum bei dauerhaft hoch ausgelasteten Leitungen regelmäßig durch Leitungen mit größeren Querschnitten – also höheren Investitionskosten – und bei nur gelegentlich hoch ausgelasteten Leitungen eher durch eine entsprechende Druckerhöhung erreicht. Aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht kann der Parameter Jahresarbeit daher nur bei zusätzlicher Berücksichtigung wesentlicher Leitungseigenschaften als Maßstab für den Betriebsaufwand Verwendung finden.

ometrie verbundenen notwendigen Rohrleitungsdurchmesser verwendet und daraus eine notwendige Rohrleitungsmantelfläche ableitet, sondern auf geeignete Weise die Leitungslänge direkt mit Q_{\max} und ggf. weiteren Größen verbindet, wie dies etwa beim Transportwurzelmoment der Fall ist. Darin sind die unmittelbaren Nutzenparameter „Gasmenge (pro Stunde)“ und „Transportentfernung“ so miteinander verknüpft, dass auch die wesentlichen Kostenwirkungen beider Nutzenparameter korrekt abgebildet werden und sowohl die Eignung als auch der im Wesentlichen exogene Charakter unmittelbar einsichtig sind.

²³ Aufgrund normativer Beschränkung ist die Auswahl an Durchmessern einerseits auf eine übersichtliche Zahl begrenzt. Ein Ausbau erfolgt üblicherweise nicht graduell, sondern stufig gemäß vorgegebener Rohrdimensionen nach Din oder ANSI. Es ergibt sich somit in der Einzelfallbetrachtung ein sprungfixer Kostenverlauf für die steigende Bereitstellung von Transportkapazität. Betreibt ein Unternehmen jedoch eine Vielzahl von Leitungsabschnitten, so ist davon auszugehen, dass sich die sprungfixen Kosten beim Ausbau einzelner Abschnitte bei der Betrachtung einer großen Zahl von kleineren Ausbaumaßnahmen in einer Weise mischen, die zu näherungsweise gleichmäßig mit dem Ausbau steigenden Kapazität führen. Diese Überlegung findet ihre praktische Anwendung regelmäßig bei der Berechnung von Baukostenzuschüssen, bei deren Ermittlung ebenfalls mittlere Ausbaukosten aus einer Vielzahl einzelner „stufiger“ Ausbaumaßnahmen zur Überwindung jeweils lokaler erreichter Auslastungsgrenzen abgeleitet werden.

Für die Bestimmung des Betriebsaufwands gelten folgende Überlegungen: In der Vergangenheit wurde der Energiebedarf der Verdichterleistung häufig aus dem transportierten Gas gedeckt, so dass sich der für den Transport notwendige Energiebedarf in dem Unterschied zwischen eingespeister und entnommener Energie abbildet. Aus verschiedenen Gründen (u.a. Lärmschutz) erfolgt seit einigen Jahren eine zügige Umrüstung der Verdichter auf elektrische Antriebe. Damit rücken die Jahresarbeit Ein- und Ausspeisung zunehmend zusammen und insbesondere entfällt die Möglichkeit, den betrieblichen Aufwand für die Verdichtung mit guter Näherung nur aus der Differenz zwischen den beiden Werten abzuleiten. In den Betriebsaufwand fließt neben der Differenz zwischen ein- und ausgespeister Arbeit auch der elektrische Energiebedarf von elektrisch angetriebenen Verdichtern ein. Da im Gasnetz die kapazitätsbedingten Kosten deutlich ggü. den Transport- und Dienstleistungskosten dominieren, kommt die Jahresarbeit nur als beigeordneter (korrigierender) Parameter in Betracht.

Die Jahresarbeit besitzt einen exogenen Charakter.

4.3.1.3 Last: (zeitgleiche) Netzlast und (zeitungleiche) Jahreshöchstlast

Die Errichtungskosten der einzelnen Leitungsabschnitte, in Aggregation also auch die eines ganzen FNB-Netzes, werden dominiert durch die Auslegung auf die maximal zu transportierende Leistung Q_{\max} pro Stunde, welche wiederum eng mit dem Rohrleitungsdurchmesser korreliert ist. Für eine Auslegung eines Leitungssystems kann mit einem gewissen Ausgleich durch Gleichzeitigkeitseffekte²⁴ gerechnet werden. Der Gleichzeitigkeitseffekt ist jedoch von den Abnahmestrukturen der angeschlossenen Kunden abhängig und nicht aus den vorliegenden Daten ohne Auswertung langjähriger Lastgänge auswertbar. Die Jahreshöchstlast besitzt daher einen exogenen Charakter.

4.3.1.4 Anschlüsse: Anzahl Ein- und Ausspeisepunkte

Auch wenn die Systemkosten wesentlich durch die Länge und Durchmesser der Rohrleitungen bestimmt werden, so treten bei auch verteilenden ggü. nur transitierenden FNB zusätzliche Kosten auf, die angemessen durch korrigierende Parameter erfasst werden können. Die **Anzahl der Einspeisepunkte** (die i.d.R. auch Ausspeisepunkte sind) variiert allerdings im Grundsatz nicht zwischen diesen FNB-Typen und ist daher zur Abbildung der Granularität weniger geeignet als die Anzahl der Ausspeisepunkte.

Die zur Errichtung der Rohrleitungen zusätzlich durch die Gesamtheit der Netzkoppel- und Anschlusspunkte entstehenden Kostenunterschiede beispielsweise für Verzweigungen und Kuppelanschlusspunkte, Sicherheitseinrichtungen etc. hängen vorrangig von der Zahl an Exit-Punkten des jeweiligen FNB ab. Durch die **Anzahl der Ausspeisepunkte** entsteht auch der Hauptteil der Kosten für erhöhte betriebliche Flexibilität (vgl. hierzu auch Abschnitt 4.3.2). Da im Gasnetz die Errichtungskosten von Leitungen deutlich die übrigen Kosten dominieren, kommt der Parameter als beigeordneter (korrigierender) Parameter in Betracht.

Da im Kapazitätsmanagement grundsätzlich jeder Einspeisepunkt auch ein Ausspeisepunkt ist, unterscheidet sich der Parameter **Anzahl Ein- und Ausspeisepunkte** (Netzkoppel-/anschluss-

²⁴ Gleichzeitigkeitseffekte ergeben sich durch die Aggregation verschiedene Lastgänge. Die Maximalwerte der Lastgänge werden nicht zeitgleich erreicht.

punkte – NKP/ NAP), um entsprechende Redundanzen bereinigt, vgl. Abschnitt I.2.4, nur geringfügig von der Anzahl der Ausspeisepunkte, so dass die Überlegungen zur Anzahl der Ausspeisepunkte übernommen werden können.

Bei der Parametergruppe ist von einem exogenen Charakter auszugehen.

4.3.1.5 Druck

Es wurden keine Erkenntnisse gewonnen, die wesentlich über die bereits zur RP2 von CONSENTEC dargestellten Zusammenhänge und Eignungseinschätzung hinausgehen.

Die Mindest- **Ein- und Ausgangsdrücke** hängen vom dem mit den vor und nachgelagerten Netzbetreibern vereinbarten Drücken und den Anforderungen der Netzkunden ab und besitzen daher einen eher exogenen Charakter.

Die **Druckdifferenz** kann insbesondere durch den Einsatz von Verdichtern verringert werden und besitzt somit einen eher endogenen Charakter. Die Druckdifferenz besitzt zwar endogenen Charakter, allerdings beeinflusst die mögliche ausnutzbare Druckdifferenz den ggf. notwendigen Einsatz von Verdichtern bzw. die Auslegungsdimensionierung der Rohrleitung und ist dementsprechend kostenrelevant. Da die beiden Lösungsansätze alternative Ansätze darstellen, die durch deutliche Unterschiede in den Errichtungs- bzw. Betriebskosten gekennzeichnet sind, ist dieser Parameter nur eingeschränkt präzise mit den Netzkosten korreliert.

Das **Druckniveau** auf einer Leitung schwankt über die Betriebszeit deutlich und ist daher als Vergleichsparameter nur eingeschränkt geeignet. Hohe Kostenrelevanz hat aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht für eine Ferngasleitung allerdings der Auslegungsdruck, mit dem die Leitung nachhaltig betrieben werden kann.

Die Druckparameter sind im Übrigen für den Einsatz im Effizienzvergleich schwierig operationalisierbar, vgl. hierzu Consentec und Frontier (2013).

4.3.1.6 Verdichter: Anzahl, Leistung, Treibenergie

Bereits in den Abschnitten 4.3.1 unter „Rohrleitungslänge“ und 0 unter „Jahresarbeit Ein- und Ausspeisung“ wird der Trade-Off zwischen Rohrlängendurchmesser und Verdichterleistung diskutiert. Unabhängig davon, inwieweit beide Ansätze zu näherungsweise gleichen Gesamtkosten führen, ist bezüglich der Entwicklung von Ferngasleitungen zu bedenken, dass diese für die Versorgung einer Vielzahl von Kunden errichtet werden, deren Anzahl und Gesamtbedarf sich über die betriebsüblichen Nutzungsdauern von mehreren Jahrzehnten hinweg deutlich verändern kann. Neben einer Änderung der Bevölkerungsdichte sind insbesondere staatliche Einwirkungen auf den Energieverbrauch und das Preisgefüge über die Einführung von Kosten zur Emission von CO₂ und die Förderung der Wärmedämmung zu nennen. Es ist daher zum Errichtungszeitpunkt besonders von Ferngasleitungen nicht sicher absehbar ob und wann die geplante Auslastung tatsächlich erreicht wird. Umgekehrt kann die Auslastung – u.a. infolge der genannten staatlichen Maßnahmen – auch deutlich vor dem Ende der geplanten Nutzungsdauer deutlich unter den Zielwert sinken.

Vor diesem Hintergrund kann es sinnvoll sein, Ferngasleitungen nicht auf einen Bedarf hin zu dimensionieren, der erst nach 10 oder mehr Jahren planmäßig erreicht wird. Stattdessen kann – ein entsprechendes Absatzwachstum vorausgesetzt – durch den Bau von Verdichterstationen die Transportkapazität bestehender Leitungen vergleichsweise kurzfristig wesentlich erhöht werden. Ist der Absatzanstieg absehbar nachhaltig, können dann weitere parallele Leitungen

errichtet werden. Diese Vorgehensweise führt jedoch naturgemäß zu höheren Kosten ggü. einem „theoretisch optimalen System“, bei dem schon zum Errichtungszeitpunkt hellsichtig die Entwicklung der Auslastung sicher bekannt war und die im Rückblick optimale Rohrgeometrie schon zu Beginn errichtet werden konnte.

Die Verwendung der **Verdichterleistung** oder der **Treibenergie** im Parametersatz bietet hier die Möglichkeit, solche Mehrkosten grundsätzlich zu berücksichtigen. Die **Anzahl der Verdichter** ist als Parameter eher ungeeignet, da die notwendige Verdichterleistung sowohl von mehreren kleineren oder wenigen größeren Anlagen erbracht werden kann und diese Auswahl weitestgehend endogen durch den FNB erfolgt.

Aggregierte Parameter wie das Transportwurzelmoment setzen auf die tatsächlich maximal transportierte Gasmenge Q_{\max} sowie die tatsächlich notwendige (trassentreue) Transportentfernung auf und sind „technologieoffen“, unterscheiden also nicht, ob ein zusätzlicher Transport über größere Rohrleitungsdurchmesser oder eine höhere Verdichterleistung ermöglicht wurde. Transportwurzelmoment und Verdichterleistung sollten also nicht im gleichen Parametersatz Verwendung finden, da es durch den Trade-Off zwischen Rohrleitungsdurchmesser und Verdichterleistung näherungsweise zu einer doppelten Berücksichtigung der Verdichterleistung kommen würde. Demgegenüber ist die Verdichterleistung grundsätzlich eine stimmige Ergänzung zu anlagenorientierten Parametern wie Rohrmantelfläche oder Rohrvolumen.

Alle drei Parametervarianten zum Verdichter besitzen einen eher endogenen Charakter.

4.3.1.7 Fläche: Polygonfläche

FNB erschließen mit ihren Netzen die von ihnen versorgten Gebiete und nutzen dabei wiederkehrend ähnliche Netzstrukturen für vergleichbare Versorgungsaufgaben. Es ist daher plausibel, dass die Netzkosten gut mit der Fläche des versorgten Gebietes korrelieren.

Zur Bestimmung der gaswirtschaftlich erschlossenen Fläche hat sich die Polygonfläche etabliert (zur Berechnung vgl. Anhang I.2.7). Die so bestimmte Fläche umfasst z.T. für unterschiedliche FNB in deutlich unterschiedlichem Umfang Flächenanteile ohne sichtbaren gaswirtschaftlichen Nutzen für die von der Regulierung beaufsichtigten Tätigkeiten. Insbesondere sind hier Wasserflächen, Flächen ohne leitungsgebundene Gasversorgung und – aufgrund der auf die deutsche Versorgung orientierten Regulierung – Polygonflächenanteile im Ausland zu nennen. Ein weiterer Kritikpunkt zeigt sich am Beispiel langgestreckter Netze. Der „Krümmungsgrad“ einer langgestreckten Leitungsverbindung über mehrere hundert Kilometer hat offensichtlich keinen Einfluss auf die netzwirtschaftliche Leistung – insbesondere, sofern die Verbindung im Wesentlichen nur für den Gastransport über die komplette Leitung genutzt wird (reiner Transit). Dies gilt aber näherungsweise auch dann, wenn über Ausspeisepunkte auf der Leitung nachgelagerte Netzgebiete oder – aus Sicht des FNB gleichwertig bei gleichartigem Bezug – Einzelverbraucher versorgt werden. Die Polygonfläche hingegen liegt zwischen „Null“ (bei grader Leitungsverbindung) und hohen Werten (bei starker Krümmung). Ein solcher „Bananeneffekt“ begründet aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht zunächst gewisse Zweifel an der grundsätzlichen Eignung dieses Parameters als Kostentreiber. Mit Blick auf die Beschaffenheit der Netze im Datensatz ist jedoch auch sichtbar, dass die langgezogenen Netze tendenziell von deutlich geringerer Komplexität sind als die übrigen Netze. Insofern vermag die Polygonfläche allenfalls implizit die Komplexität der Netze abzubilden (für eine weiterführende Diskussion vgl. 4.3.2), was den Bananeneffekt relativieren würde.

Mit Blick auf die Beeinflussbarkeit gilt, dass sich die Polygonfläche eines Unternehmens durch eine Umwandlung von kurzfristigen Nutzungs- in entsprechende länger laufende Pachtverträge und die Vereinbarung von Bruchteilseigentum durch das regulierte Unternehmen auch selbst beeinflusst werden kann – die insbesondere dann, wenn bei der Bestimmung der Polygonfläche die physikalische Verbundenheit der Netze nicht beachtet wird (Parameter y_{Area_all}). Es handelt sich daher bei der Polygonfläche, wenngleich maßgeblich durch exogen vorgegebene Anschlüsse bestimmt, um einen anteilig auch endogen beeinflussbaren Parameter.

4.3.1.8 Transportmoment

Das Transportmoment ist ein aggregierter Parameter aus (maximal) transportierter Gasmenge (Leistung bzw. Arbeit) und Transportdistanz.

Bezüglich einer Verwendung der in Summe transportierten Gasmenge (Arbeit) oder der maximal transportierten Gasmenge (Leistung) ist folgendes zu bedenken: Wird beispielsweise Flüssiggas per Tankwagen über eine bestimmte Strecke transportiert, stellen die Betriebskosten einen erheblichen Anteil der Gesamtkosten dar und die über einen Vergleichszeitraum anfallenden Transportkosten hängen stark davon ab, wie oft der Tankwagen die Strecke zurücklegen muss (analoge Überlegungen gelten im Grundsatz auch für LNG-Transporte). In solchen Fällen ist es sinnvoll, ein Transportmoment mit der gesamten Gasmenge zu bilden, die zum Kunden gebracht wurde – also praktisch die transportierte Arbeit zu verwenden. Leitungsgebundene Transporte dagegen sind auch im Energiebereich durch vorwiegend kapazitätsabhängige Kosten geprägt; eine unterschiedliche Intensität der Nutzung führt zu einer vergleichsweise geringen Variation der Gesamtkosten. Damit besteht bei Ferngasleitungen ein weniger stark ausgeprägter kausaler Zusammenhang zwischen der transportierten Arbeit und den Gesamtkosten und – eine hohe Auslastung des Netzes im Starklastfall vorausgesetzt – ein deutlich stärker ausgeprägter kausaler Zusammenhang zwischen der maximal transportierten Leistung und den Gesamtkosten des Systems. In dem Sinn ist das Transportmoment gebildet mit Leistung seiner Entsprechung mit Arbeit vorzuziehen. Allerdings vermischt sich in ihm die überhöhte Wichtung der transportierten Gasmenge unauflöslich mit der kostenlinearen Wichtung der Transportentfernung (vgl. auch Abschnitt 4.1.3).

Soweit FNB bei der freien Trassenwahl beschränkt sind, kann dies berücksichtigt werden, indem für die Transportdistanz die reale Distanz (RD) anstelle der Luftlinienentfernung (Luftliniendistanz – LD) gewählt wird. Letztere ist im Normalfall aufgrund exogener geologischer und genehmigungsrechtlicher Faktoren praktisch nicht realisierbar.

Das Transportmoment hat exogenen Charakter. Die Varianten mit Luftliniendistanzen ($y_{Transportmoment_Qmax_LD}$, $y_{Transportmoment_Qyear_LD}$) sind stärker exogen als deren Entsprechungen mit realen Distanzen (..._RD), denen die grundsätzlich endogenen gemeldeten Leitungslängen zugrunde liegen. Da bei der Transportmoment-Bildung nicht benötigte Leitungsabschnitte implizit mit Null bewertet werden, werden die RD-Parameter $y_{Transportmoment_Qmax_RD}$ und $y_{Transportmoment_Qyear_RD}$ ihrerseits stärker exogen eingestuft als der Parameter Leitungslänge.

4.3.1.9 Transportwurzelmoment

Das Transportwurzelmoment wurde in Abschnitt 4.1.3 intensiv diskutiert. Es greift die Grundideen des Transportmomentes auf, aggregiert die auch dort beteiligten Teilparameter jedoch

auf eine Weise, die dem genähert kostenlinearen Zusammenhang der einzelnen Leitungsschnitte sowohl von der Transportdistanz sowie dem Durchmesser bestmöglichst Rechnung trägt.

Wie das Transportmoment besitzt dieser Parameter einen exogenen Charakter, wobei das Transportwurzelmoment die effektiv benötigten Leitungsdurchmesser besser abbildet bzw. zudem ein exogenes Maß für die benötigten Leitungsdurchmesser darstellt.

4.3.1.10 (Wurzel) Transportmomentfläche

Bei diesem hochaggregierten Parameter wird das Transportmoment multiplikativ mit einem weiteren Parameter, der Polygonfläche, verbunden. Dadurch kann der Hauptmangel des ersten Parameters, die unauflösliche Durchmischung von kostenlinearen und nicht kostenlinearen Anteilen in einem aggregierten Parameter, nicht korrigiert werden. Die ingenieurwissenschaftliche Interpretation des Parameters bleibt unklar. Auch die Anwendung der Wurzelfunktion auf die Transportmomentfläche kann die unauflösliche Durchmischung von kostenlinearen und nicht kostenlinearen Anteilen im anteilig einfließenden Transportmoment-Parameter nicht korrigieren.

4.3.1.11 Mittlere Transportdistanz

Die Wirkungen der mittleren Transportdistanz sind grundsätzlich angelehnt an die Überlegungen zur Rohrleitungslänge. Auch hier gilt, dass die enge Verknüpfung mit einem zentralen Output, dem Gastransport über eine bestimmte Distanz, gegeben ist, da die kürzestmögliche Transportentfernung zwischen Entry- und Exitpunkt verwendet wird. Auch bei diesem Parameter lässt sich die starke Beschränkung der FNB bei der Trassenwahl ohne weiteres durch die Verwendung realer Distanzen („trassentreue Distanz“) berücksichtigen.

Allerdings werden bei der Bestimmung der mittleren Transportdistanz die Transportdistanzen zu jedem Exit-Punkt mit der jeweils transportierten Menge gewichtet und unauflöslich miteinander verbunden.

Vorteilhaft dagegen ist der eher exogene Charakter des Parameters.

4.3.1.12 Netzcharakteristiken: Verzweigungen und Maschen

Verzweigungen

Exit-Punkte einer Ferngasleitung können grundsätzlich unmittelbar an der Leitung selbst liegen; vielfach liegen sie jedoch auch einige hundert Meter oder auch einige Kilometer von der Ferngasleitung entfernt am Endpunkt einer Verzweigung. Bildhaft kann von Blättern (=Exit-Punkten) gesprochen werden, die entweder direkt am „Stamm“ bzw. „Ast“, oder eben am Ende eines Zweiges sitzen. Aus der Anzahl der Exit-Punkte (bzw. Anschlusspunkte) kann daher nicht unmittelbar auf die Anzahl an Verzweigungen geschlossen werden. Denkbar ist allerdings, dass bei größeren Netzen der Anteil der direkt an die Hauptleitung angeschlossenen „Blätter“ im Verhältnis zu den am Ende von Verzweigungen angeschlossenen Exit-Punkten aufgrund der beschränkten Beeinflussbarkeit der Trassenwahl durch den FNB in Verbindung mit den vorrangig von den Netzkunden vorgegebenen Exit-Punkten weniger streut. In jedem Fall beschränkt dies den Einfluss der FNB auf die Zahl der Verzweigungen. Der Parameter besitzt daher einen eher exogenen Charakter.

Da die Zahl der Verzweigungen keinen dominanten Kostenblock im Ferngasnetz darstellt, kommt der Parameter aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht v.a. als beigeordneter Kostentreiber für die Dimension „Kapazität“ in Frage.

Maschen

Ob und wo ein Ring im Gasnetz und eine Masche geschlossen werden, entscheidet im regelmäßig nicht (n-1)-sicher ausgelegten Gasnetz i.d.R. der FNB.²⁵ Der Parameter besitzt somit einen eher endogenen Charakter.

4.3.1.13 Horizontaler Transport

Die Hintergründe der Parametergruppe wurde bereits in Abschnitt 4.1.4 besprochen. Der grundsätzlich geringste Aufwand entsteht einem FNB für Leitungen, die im Wesentlichen als Hauptleitung betrieben werden und die am Eingang aufgenommene Gasmenge nach und nach über Ausspeisepunkte an unterlagerte Kunden abgibt. Die Kundennachfrage wird in jedem Abstand vom Einspeisepunkt optimal in einer gemeinsam genutzten Rohrleitung gebündelt und der notwendige Rohrlungsdurchmesser nimmt mit zunehmendem Abstand vom Einspeisepunkt ab, ggf. muss an geeigneten Stellen über Verdichter der Ausgangsdruck gestützt werden. Dieser Typ kann vereinfachend als „linear transportierende Leitung“ bezeichnet werden.

Wird die Gasmenge im Wesentlichen vollständig über die gesamte Rohrleitung transportiert und am Endpunkt an einen unterlagerten Netzkunden oder an einen benachbarten Netzbetreiber auf gleicher Druckstufe übergeben, so kann man von einer „transitierenden Leitung“ sprechen. Ggü. der linear transportierenden Leitung sind die spezifischen Kosten höher, da keine Reduktion des Leitungsdurchmessers über die Strecke erfolgen kann. Wird nun jedoch vom transportierenden FNB eine Quellendiversifikation verlangt (vgl. beispielsweise die EU-Verordnung EU 2017/1938 vom 25. Oktober 2017), bedeutet dies i.d.R., dass eine "rückwärtige Speisung" möglich sein muss und hierzu Rohrdurchmesser von linear transportierenden Leitungen ggü. dem notwendigen Minimum zu erhöhen sind bzw. alternativ zusätzliche Verdichter eingesetzt werden, um die Versorgung auch aus zweiter oder dritter Quelle technisch zuverlässig zu gewährleisten. Dies hat zur Folge, dass die Kostenunterschiede zwischen FNB mit einem höheren Anteil transitierender Leitungen und solchen mit einem höheren Anteil linear transportierenden Leitungen reduziert werden. Bei höherem „horizontalem Transportanteil“ entwickelt sich der stärker linear transportierende FNB in Richtung eines transitierenden FNB, der Kostenvorteil reduziert sich mit höherem Transportanteil.

Der Zusatzaufwand „auch verteilender“ FNB ggü. linear transportierenden bildet sich aus ingenieurwissenschaftlicher Betrachtung vor allem auf zweifache Weise ab: Kosten für die Verlegung zusätzlicher Rohrleitungen zur Anbindung der nicht unmittelbar an den Haupt-Transportleitungen gelegenen Ausspeisepunkte sowie Kosten für eine erhöhte betriebliche Flexibilität (vgl. hierzu Abschnitt 4.3.2).

Die Menge oder der Anteil horizontaler Transporte sind deshalb für sich genommen bezüglich der Kostentreiberwirkung nur ein recht unscharf wirkender und somit eher ungeeigneter Parameter.

²⁵ Bzw. mit Einführung des Netzentwicklungsplans die gemeinsamen Anforderungen einer Netzplanung der FNB mit Freigabe der BNetzA.

Der Parameter hat exogenen Charakter.

4.3.1.14 Gebietseigenschaften

Bodenklassen und Grabbarkeit

Insbesondere die Verlegung von Rohrleitungsabschnitten in extremen Bodenklassen nach DIN 18300 VOB/C „Erdarbeiten“ (0, also Gewässer, 2, also sumpfig/fließend/torfig/moorig sowie 6 und 7, also felsig)²⁶ kann zu signifikant höheren Investitionskosten bei den FNB führen. Sofern ein erheblicher Anteil derartiger Bodenklassen vorliegt, können diese einen erhöhten baulichen Aufwand und hierdurch erhöhte Systemkosten verursachen. Die Schwankungen der Investitionskosten bei weniger extremen Bodenklassen sind dagegen deutlich geringer und dürften eher in einer Größenordnung liegen, die auch durch andere Besonderheiten bei der jeweiligen Baumaßnahme erreicht und mit gutem Grund aus Aufwand-/Nutzengründen bisher nicht abgebildet werden (z.B. technologische und organisatorische Varianten bei der Errichtung).

Obwohl sich die Technik insbesondere dort verbessert hat, wo mit den genannten extremen Bodenverhältnissen umzugehen ist, und dementsprechend vormals teure Bodenklassen heute vergleichsweise günstiger erschlossen werden können, sollte der Aufwand zur Lösung besonderer technischer Herausforderungen zur Erhöhung der Akzeptanz von Effizienzuntersuchungen nicht von vornherein ausgeschlossen werden. Allerdings sollte nicht übersehen werden, dass die Errichtung von Ferngasleitungen in Zeiten knapper Verfügbarkeit von Baukapazitäten ebenso zu erhöhten Kosten führen kann wie die Verlegung von Leitungsabschnitten in schwierigen Bodenklassen. Besondere bauliche Herausforderungen werden nicht alleine dadurch vernachlässigbar, dass es andere Erschwernisse in ähnlicher Größenordnung gibt.

Zu bedenken ist allerdings, dass derart extreme Bodenverhältnisse zum einen üblicherweise nur einen Teil des Netzes der weiträumige Netze betreibenden FNB betreffen (es liegen uns bisher keine Hinweise vor, dass ein oder mehrere FNB erhebliche Anteile ihrer Leitungen tatsächlich in extremen Bodenklassen errichten mussten) und zum anderen besteht nicht selten die Möglichkeit, durch „Ausweichbewegungen“ der Trasse derartige Bodenklassen weitgehend zu vermeiden. Somit müsste eine etwaige Berücksichtigung von Bodenklassen recht kleinteilig erfolgen, um zu berücksichtigen, dass in der Feinplanung der Trassen nicht selten derartige Umgehungsmöglichkeiten genutzt worden sein dürften. Die durch Ausweichbewegungen verursachte Verlängerung der Transportdistanz wird durch den Faktor Trassentreue, also die Berechnung der Transportentfernung auf Basis realer Trassen anstelle der Luftliniendistanz, bereits berücksichtigt (z.B. in Parametern wie Leitungslänge, Rohrvolumen aber auch TWM).

Bei kleinräumiger Versorgung kann der regional vorherrschenden Bodenklasse kaum ausgewichen werden. Bei großräumigen Projekten geht die technischen Schwierigkeiten von Trassenvarianten sicherlich in die Genehmigungsverfahren ein (z.B. als eine Art „technisch-wirtschaftlicher Raumwiderstand“), allerdings sind technische und wirtschaftliche Erschwernisse regelmäßig anderen Kriterien (z.B. Umweltschutz, Belastung der Bevölkerung) untergeordnet, so dass für den Trassenbau Deutschland aktuell allenfalls bedingte Ausweichmöglichkeiten gegeben sind. In summarischer Betrachtung ergibt sich so die Einschätzung, daß der Parameter einen eher exogenen Charakter besitzt.

²⁶ Boden- und Felsklassen nach ATV DIN 18300 der VOB/C DIN 18300 Ausgabe 2012-09.

Weitere Gebietseigenschaften

Mittlere Hangneigung: Der Parameter mittlere Hangneigung kann Mehraufwände der Verlegung von Rohrleitungen in gebirgige Lagen gegenüber einer Verlegung im flachen Gelände erklären. Bei Hanglagen treten Mehraufwände im Tiefbau und bei der Sicherung von Trassen gegen das Abrutschen auf. Dieser Parameter besitzt einen eher exogenen Charakter.

Maximale Höhendifferenz: Der Parameter maximale Höhendifferenz kennzeichnet gebirgige Trassen in einem Leitungssystem. Dort fällt einerseits zusätzlicher Errichtungsaufwand an und andererseits erfordern große Höhendifferenzen auch einen höheren betrieblichen Aufwand, um mit zusätzlicher Kompressorleistung die Höhendifferenzen zu überwinden.

4.3.2 Ergänzende Überlegungen zur Abbildung netztechnischer Flexibilität

U.a. aufgrund der Ergebnisse der Konsultation (vgl. Abschnitt 4.1.5) stellt sich die Frage, inwieweit die oben diskutierten Parameter die netztechnische bzw. betriebliche Flexibilität abbilden vermögen. Diese besteht anlagenseitig u.a. aus einem höheren Anteil von Einbauten (Molchschleusen, Zähler, Schieber...) und deren Betrieb sowie einem Anteil von Leitungsabschnitten in Maschen und bei verteilten Entry-Punkten, die rechnerisch nur zu Reservezwecken dienen.

Während zusätzliche Rohrleitungen zur Anbindung der Exit-Punkte z.B. im TWM über die Berücksichtigung realer Distanzen und der maximal zu transportierenden Leistung Q_{\max} je Leitungsabschnitt berücksichtigt werden können, wird für die Abbildung der netztechnischen Flexibilität ein Parameter benötigt, der die Kosten für die zusätzliche Komplexität im Netz gut abbilden kann. Naheliegend sind dafür insbesondere die Zahl der Anschlüsse, die Zahl der Verzweigungen im Netz und die Zahl der Maschen. Die Parametergruppe vertikaler Transport ist hierfür eher ungeeignet, da hier nicht zwischen vertikaler Entnahme direkt an einer Hauptleitung und vertikaler Entnahme aus der regionalen Verteilung unterschieden werden kann.

Ein Kandidat, der im Rahmen der Konsultation von einigen Netzbetreibern vorgeschlagen worden ist, ist die Polygonfläche. Aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht erschließt es sich zunächst nicht ohne weiteres, wie ein solches Flächenmaß die erhöhte oder verminderte Flexibilität eines FNB mit hoher Kausalität abbilden soll. Beispielsweise ist der Anteil energiewirtschaftlich ungenutzter Flächen für die verschiedenen FNB sehr unterschiedlich. Es ist jedoch nicht von der Hand zu weisen, dass – wie bereits von CONSENTEC belegt – die Polygonfläche für die Datensätze der realen Netze eine sehr hohe Korrelation zu den Kosten aufweist. Insofern liegt die Vermutung nahe, dass die Polygonfläche trotz begrenzter Kausalität Hinweise auf begründete Kostenunterschiede gibt. Dies könnte daran liegen, dass die Polygonfläche für FNB mit wenig verzweigten Netzen, die bei der Trassenrealisierung einen möglichst geraden Röhrenverlauf angestrebt haben dürften, tiefere Werte ausweist und derartige Netze gleichzeitig eine eher geringe Komplexität und Flexibilität aufweisen, da sie stark optimiert auf die Transportaufgabe errichtet und betrieben werden können (vgl. hierzu auch „Bananeneffekt“ in Abschnitt 4.3.1.7). Historisch gewachsene Transportnetzbetreiber weisen dagegen möglicherweise vor allem deshalb einen hohen Wert für die Polygonfläche auf, da diese FNB – historisch bedingt – für den assoziierten Vertrieb alle vertraglichen Lieferquellen über teilweise sehr lange Anbindungsleitungen erschließen mussten. Insofern wirkt die in den historisch gewachsenen Netzen gewonnene zusätzliche Polygonfläche im Grundsatz ausgleichend zu den Kostennachteilen der in suboptimalen Netzen verteilenden FNB ggü. kostenoptimal vorwiegend geradeaus transportierenden FNB.

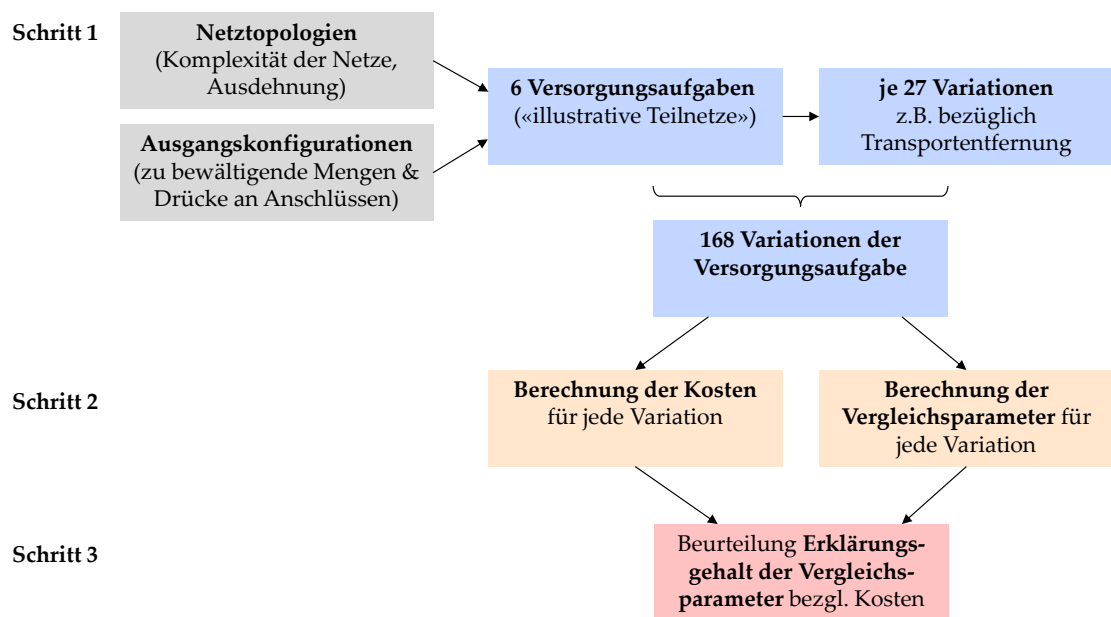
4.4 Quantitative Analyse ausgewählter Parameter im Rahmen einer Referenznetzanalyse

4.4.1 Übersicht, Ziele, Einsatzbereich und Grenzen der Referenznetzanalyse

Übersicht: Ansatz und Gliederung

Um den Erklärungsgehalt ausgewählter Vergleichsparameter analytisch besser beurteilen zu können, werden diese im Rahmen einer Referenznetzanalyse (RNA) auf ihre kostentreibende Wirkung in abstrakten Netztypen, sog. „illustrativen Teilnetzen“ untersucht. Mit diesem Ziel werden ausgehend von den realen Netzen grundlegende Netztopologien hergeleitet und konfiguriert. Die so definierten grundlegenden Versorgungsaufgaben werden systematisch variiert, um den Erklärungsgehalt potenzieller Vergleichsparameter quantitativ zu untersuchen.²⁷

Abbildung 14: Versorgungsaufgaben und Variationen hiervon



Quelle: Eigene Darstellung

Der Ansatz ist in **Abbildung 14** dargestellt und wird entlang der nachfolgenden drei Schritte durchgeführt und dokumentiert (Details folgend weiter unten).

- **Festlegung illustrativer Teilnetze und zugehörigen Versorgungsaufgaben (Abschnitt 4.4.2 nachfolgend):** In einem ersten Schritt werden die realen Netze der FNB in sechs grundlegende Netztopologien „entmischt“ und für jedes dieser Netze eine Ausgangskonfiguration festgelegt. Diese „illustrativen Teilnetze“ bilden je eine grundlegende Versorgungsaufgabe ab. Um später die Wirkung der Parameter bei variierten Versorgungsaufgaben zu untersuchen, werden grundlegende Variationen der Versorgungsaufgaben festgelegt, welche in allen illustrativen Teilnetzen gleichermaßen untersucht werden.
- **Für alle illustrativen Teilnetze und Versorgungsaufgaben: Berechnung von zugehörigen Kosten und Vergleichsparametern (Abschnitt 4.4.3):** In einem zweiten Schritt werden für die illustrativen Teilnetze die zugehörigen synthetischen („optimalen“) Kosten gestützt auf Erfahrungswerte und externe Datenquellen ermittelt und plausibilisiert. Anschließend wird

²⁷ Im Rahmen der RNA muss somit keine eigentliche Netzplanung oder detailgetreue Abbildung der vollständigen realen Netze der Netzbetreiber erfolgen.

für jede Variation der Versorgungsaufgabe der Effekt auf die berechneten synthetischen Kosten einerseits und auf die die zugehörigen Vergleichsparameter andererseits berechnet.

- **Diskussion des Erklärungsgehalts von Vergleichsparametern hinsichtlich der berechneten Kosten (Abschnitt 4.4.4):** Die je Versorgungsaufgabe berechneten Kosten werden in einem dritten Schritt den zugehörigen Vergleichsparametern gegenübergestellt. Hieraus ergeben sich in Beachtung der Referenznetzanalyse zugrundeliegenden Annahmen Erkenntnisse, welche Parameter in welchen Konstellationen geeignet sind, um die Kosten der FNB aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht zu erklären.

Der Ansatz lehnt sich grundsätzlich an die früheren Analysen von CONSENTEC (2010, 2012) an. Die wichtigsten Unterschiede betreffen die verwendeten illustrativen Teilnetze in Schritt 1 sowie die Beibehaltung der Ausgangs-Netztypologien bei der Kostenberechnung in Schritt 2.

Zielsetzung, Einschränkungen und Kontext

Ziel der vorgenommenen Referenznetzanalyse ist die Beurteilung der Wirkung der wesentlichen Vergleichsparameter für illustrative Netzstrukturen, denen möglichst reale Strukturen der teilnehmenden Netzbetreiber zugrunde liegen und die die Bandbreite an den typischen, von den FNB erbrachten Versorgungsaufgaben im Grundsatz abbilden. Dies ermöglicht – unter Berücksichtigung der zugrundeliegenden Annahmen – ein besseres Verständnis dafür, welche Kosteneffekte die Vergleichsparameter abzubilden vermögen und welche gerade nicht. Durch Letzteres informiert die Analyse auch über mögliche analytisch sinnvolle Kombinationen von Kostentreibern. Somit wird eine bessere analytische Einschätzung der Geeignetheit einzelner und kombinierter Vergleichsparameter im Rahmen der KTA Ing ermöglicht. Ziel ist damit ausdrücklich nicht das möglichst umfassende und genaue Abbilden der gesamten Kosten der gemeldeten integralen Netze oder die Beurteilung, inwieweit die Vergleichsparameter die realen Kosten der Netzbetreiber (inkl. Ineffizienzen) erklären können. Diese Beurteilung wird später in der KTA Oec vorgenommen, in welcher u.a. der Erklärungsgehalt der Vergleichsparameter auf die gemeldeten Kosten anhand der realen Daten beurteilt wird. Da die KTA Oec eigenständig durchgeführt wird, sind Ziel und Aussagekraft der KTA Ing mit der Referenznetzanalyse entsprechend relativiert zu betrachten: Die KTA Ing leistet keine ausschließende Vorauswahl oder gar die endgültige Festlegung geeigneter Parameter oder Parametersätze, sondern liefert eine technische Einschätzung von Parametern hinsichtlich ihrer Geeignetheit als Kostentreiber und gibt Hinweise, welche Kombinationen von Parametern schlüssig sind und welche – auch bei möglicherweise guter Korrelation in der KTA Oec – keine kausale Erklärung für diesen Zusammenhang liefern können. Idealerweise liefert später die KTA Oec als Ergebnis Parameterkombinationen, deren sachlogische Kausalität sich möglichst durch die KTA Ing nachvollziehbar erklären lässt.

Abstraktionsgrad und Interpretation der Ergebnisse

Um in der Referenznetzanalyse relevante analytische Aussagen treffen zu können, muss von realen Netzstrukturen in geeigneter Weise abstrahiert werden. Die Referenznetzanalyse basiert auf realen, praxisüblichen Standard-Netzstrukturen, die insb. durch eine optimale Auslastung zu 100 % effizienten Netzen ausgestaltet wurden. Im zweiten Schritt werden die Kosten dieser Netze mit Standard-Kostenansätzen ermittelt. Ausgehend davon, dass die Kosten von Gasnetzen für alle betrachteten FNB maßgeblich vom Umfang der für die Verbindung von Einspeise- und Ausspeisepunkten notwendigen Rohrleitungen abhängen (untermauert durch hohe Korrelationen der rohrleitungsbasierten Parameter im realen Datensatz, vgl. Abschnitt 5.3.2), wird

die Referenznetzanalyse hierauf ausgelegt und von Punkten wie Bodenbeschaffenheit usw. abstrahiert. Wie bereits bei CONSENTEC wird auch in der vorliegenden Referenznetzanalyse bewusst auf die gleichzeitige Berücksichtigung der Verdichter verzichtet. Hierdurch kann z.B. die relative Kostenwirkung einzelner Dimensionen der Versorgungsaufgaben analytisch klarer verglichen werden. Dies bedeutet jedoch nicht, dass für den Effizienzvergleich Verdichter nicht wesentlich wären und für den Einsatz im Effizienzvergleich nicht in Frage kommen würden. Insofern vermag die vorliegende Referenznetzanalyse – wie grundsätzlich jede Referenznetzanalyse – nicht sämtliche Kostenwirkungen in allen Aspekten vollständig abzubilden.²⁸ Die relativierende Beachtung der in der Referenznetzanalyse zugrunde gelegten Annahmen ist daher genauso wesentlich wie die Schlüsse, welche sie nahelegt.

4.4.2 Versorgungsaufgaben und deren Variation

In Schritt 1 sind zunächst die Versorgungsaufgaben festzulegen, welche anschließend systematisch variiert werden.

Herleitung von Versorgungsaufgaben

In CONSENTEC (2010) wurden vier Netztypen analysiert (groß, weit, lang, klein). Zwei Jahre später wurden in CONSENTEC (2012) zusätzlich «regionale Fernleitungsnetze» mit Abdeckung im Bereich eines Bundeslandes und einer Einzelregion analysiert.

Um den Erklärungsgehalt von potenziellen Vergleichsparameter in den vorliegenden Netzen möglichst umfassend beurteilen zu können, werden Netztopologien untersucht, welche als Grundbausteine für die zu vergleichenden Netze der Netzbetreiber herangezogen werden können. Aus diesen Grundbausteinen könnten also die realen Netze annähernd gebildet werden. Da Mengen, Drücke und Punkte später variiert werden, werden zunächst folgende Dimensionen unterschieden, welche zu sechs zu untersuchenden Netztopologien führen:

- Komplexität des Leitungssystems (unverzweigt, verzweigt, vermascht²⁹), da sich diese als vermuteter Kostentreiber nicht direkt aus Mengen, Drücken und Punkten ableitet;
- Ausdehnung des Leitungssystems (klein, gross), um Effekte wie Rohrreibung und Druckabfall berücksichtigen zu können.

Für jede der sechs Topologien wird anhand der Daten und Netzdarstellungen der Netzbetreiber ein geeigneter Ausschnitt der realen Netze aus den Datensätzen extrahiert, sodass die im Effizienzvergleich teilnehmenden Netzbetreiber grob mit diesen grundlegenden Typologien gebildet werden könnten. Mit Blick auf die Optimierungsrechnungen werden die Topologien soweit möglich und sinnvoll vereinfacht, z.B. können einzelne Leitungsabschnitte zwischen Kreuzungen, Anschlusspunkten oder Druckreglern und Verdichtern zu einem einzigen Leitungsabschnitt zusammengefasst werden, solange die zugehörigen effektiven Leitungslängen dem zusammengefassten Leitungsabschnitt zugeordnet werden.

²⁸ Ein detaillierterer Abstraktionsgrad wäre wünschenswert, wenn die individuelle Effizienz nach § 22 (4) ARegV direkt anhand einer relativen Referenznetzanalyse beurteilt werden müsste. Vorliegend wird jedoch ein Effizienzvergleich gestützt auf § 22 (2) ARegV durchgeführt, weshalb die Referenznetzanalyse lediglich als analytische Methode verwendet wird im Vorgang zum eigentlichen Effizienzvergleich.

²⁹ Beim illustrativen Netz in Abbildung 13 handelt es sich um ein vermaschtes Netz (das Gas kann auf mehreren unterschiedlichen Wegen zu den Ausspeisepunkten zirkulieren). Für jede Masche gilt das zweite Kirchhoffsche Gesetz.

Anschließend werden den verschiedenen Netztopologien ausgehend von den zugrundeliegenden Originaldaten der Netzbetreiber (Strukturdaten) realistische und lösbare Ausgangskonfigurationen bezüglich Ein- und Ausgangsdrücken (P) sowie am Punkt maximal zu liefernde stündliche Mengen zugrunde gelegt (Q_{max}). Für die Drücke dienen als Ausgangswerte die angegebenen mengengewichteten Betriebsdrücke, die von den vorhandenen Angaben am ehesten die effektiven Druckverläufe der Netze abbilden. Die Mengenangaben (Q_{max}) für maximale Ein- und Ausspeisung pro Stunde wurden jeweils aufeinander abgeglichen, sodass sich in jedem Netz Ein- und Ausspeisung entsprechen. Von einer Hinterlegung der Jahresarbeit wurde abgesehen, da Q_{max} für die Netzauslegung aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht wichtiger ist.

Im Resultat liegen somit sechs Versorgungsaufgaben vor, jeweils definiert durch

- die geographischen Koordinaten aller Leitungsabschnitte (jeweils Anfangs- und Endpunkte) inkl. Längen der Leitungsabschnitte;
- die geographischen Koordinaten aller Einspeisepunkte mit zugehörigen maximalen stündlichen Einspeisemengen (Q_{max}) und Eingangsdrücken (P_{ein});
- die geographischen Koordinaten aller Ausspeisepunkte mit zugehörigen maximalen stündlichen Ausspeisemengen (Q_{max}) und Ausgangsdrücken (P_{aus}).

Die Analyse so festgelegter, auf realen, repräsentativen Begebenheiten basierender „Grundbausteine“ sehen wir als Stärke des gewählten Ansatzes, da von den eigentlichen Netzen der Netzbetreiber abstrahiert werden kann, aber gleichsam unter Idealbedingungen der Erklärungsgehalt aller untersuchten Parameter für die verschiedenen Versorgungsaufgaben untersucht werden kann. Besonders geeignet für die KTA sind aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht diejenigen Parameter, die über alle grundlegenden Versorgungsaufgaben hinweg in ähnlicher (hoher) Güte die abgebildeten Kosten für alle oder einzelne Variationen der Versorgungsaufgabe erklären vermögen.

Variationen der Versorgungsaufgabe

Die Versorgungsaufgaben werden entlang der folgenden Dimensionen variiert, wobei die Variationen sich grundsätzlich an CONSENTEC (2012) anlehnen:

- *Q_{max} / Netzlast (6 Variationen)*: Höhe der maximalen ein- bzw. ausgespeisten Gasmenge je Stunde [m³/h] an allen Ein- und Ausspeisepunkten, Variation um ± 5, 15, 50%;
- *Transportentfernung und Netzfläche (6)*: Anpassung (Streckung) der Standorte und Leitungslängen, Variation um ± 5, 15, 50%;
- *Horizontaler Transport (4)*: Variation der ausgespeisten Gasmengen (Q_{max}) an allen MüP, GüP und NKP für den horizontalen Transport ± 25, 50%;
- *Druckdifferenz (3)*: Differenz der Ein- und Ausspeisedrücke [bar] Variation um + 5, 10, 20 bar. Der Punkt mit dem höchsten Druck wird jeweils um die Hälfte der Variation nach oben angepasst und der tiefste Druck wird um die Hälfte der Variation nach unten angepasst (d.h. bei der Variation +5 Bar, wird der höchste Druck um 2.5 Bar erhöht und der tiefste Druck um 2.5 Bar gesenkt);
- *Druckniveau (6)*: Höhe des Druckniveaus [bar], integrale Absenkung/Erhöhung im Wertebereich bis ± 4, 8, 16 bar, max. 100 bar;
- *Anschlussdichte (2)*: Aggregation der unveränderten gesamten Ausspeisemenge auf 25%, 50% der Ausspeisepunkte entlang der Leitungen. Es werden jeweils die Punkte mit den tiefsten Ausgangsdrücken entfernt. Dies erhöht die Chance, dass das Gassystem lösbar bleibt.

Für jede Ausgangskonfiguration werden damit $6+4+6+3+6+2 = 27$ Variationen berechnet. Insgesamt ergibt dies $6*28=168$ Variationen der Versorgungsaufgabe.

Untersuchte Parameter

Für die so festgelegten Versorgungsaufgaben und Variationen hiervon werden folgende Parameter untersucht:³⁰

- Rohrvolumen (yPipevolume)
- Rohrleitungsmantelfläche (yPipesurface)
- Zeitgleiche Jahreshöchstlast (vorliegend yPeakload_injec_Qmax \equiv yPeakload_deliv_Qmax)
- Anschlusspunkte (yPoints_num)
- Druckdifferenz (yPressure_diff_Poperating_Qmax)
- Druckniveau (yPressure_level_Poperating_Qmax)
- Polygonfläche (yArea)
- Transportmoment Luftlinien (yTransportmom_Qmax_LD)
- Transportmoment reale Distanzen (yTransportmom_Qmax_RD)
- Transportwurzelmoment (yTransportmomWurzel_Qmax_RD)
- Wurzel Transportmomentfläche (yTransportmomAreaRoot_Qmax_LD)³¹
- Mittlere Transportentfernung (yAveragedistance_Qmax_RD)
- Horizontaler Transportanteil (yTransportH_Qmax)

Die sechs Versorgungsaufgaben zeigen bezüglich dieser Parameter die in **Tabelle 9** ausgewiesenen Eigenschaften. Die Parameterbezeichnungen sind teils gekürzt.

³⁰ Für die als relevant betrachteten und abbildbaren Gruppen wurden in Anlehnung an CONSENTEC (2012) jeweils die wichtigsten Parameter ausgewählt. Da es sich bei den untersuchten Netztopologien jeweils um vollständige Netze handelt, sind einige GIS-basierte Parameter identisch, bspw. yArea und yArea_all bei Polygonfläche.

³¹ Es wurde die Wurzel der Transportmomentfläche untersucht, da diese in CONSENTEC (2012) gegenüber der Transportmomentfläche einen „besseren“, linearen Zusammenhang gezeigt hat.

Tabelle 9: Untersuchte Netztopologien und deren Eigenschaften

	Netz 1: K1	Netz 2: K2	Netz 3: K3	Netz 4: G1	Netz 5: G2	Netz 6: G3
Ausdehnung	kleine Ausdehnung			große Ausdehnung		
Komplexität	unverzweigt	verzweigt	vermascht	unverzweigt	verzweigt	Vermascht
yPipevolume	282'486	5'231	25'871	3'820'940	1'134'242	321'654
yPipesurface	608'724	73'078	152'667	4'333'081	2'268'880	851'566
yPeakload	1'401'458	20'795	70'213	6'828'749	6'772'963	567'074
yPoints_num	5	11	14	6	23	58
yPressure_diff	11.3	13.9	10.8	11.4	4.4	11.1
yPressure_level	60.3	47.3	50.6	89.4	75.3	69.4
yArea	7.82E+08	6.18E+08	5.90E+08	8.66E+09	2.30E+10	6.05E+09
yTransportmom_LD	1.12E+11	9.20E+08	2.14E+09	1.61E+12	6.18E+11	3.51E+10
yTransportmom_RD	1.41E+11	1.36E+09	2.54E+09	1.83E+12	7.58E+11	8.22E+10
yTrnsp.momWurzel_RD	126'356	11'060	15'628	894'371	459'085	155'453
yTrnsp.momAreaRoot	9.34E+09	7.54E+08	1.12E+09	1.18E+11	1.19E+11	1.46E+10
yAveragedistance	100'488	65'380	36'240	267'941	111'842	144'880
yTransportH	94%	0%	0%	100%	43%	6%
Integr. Rohrrauhigkeit k	0.1	0.2	0.5	0.1	0.2	0.5
Berechnete Kosten	7'217'901	1'057'758	2'094'992	50'665'367	27'560'355	11'028'386

Quelle: Eigene Darstellung

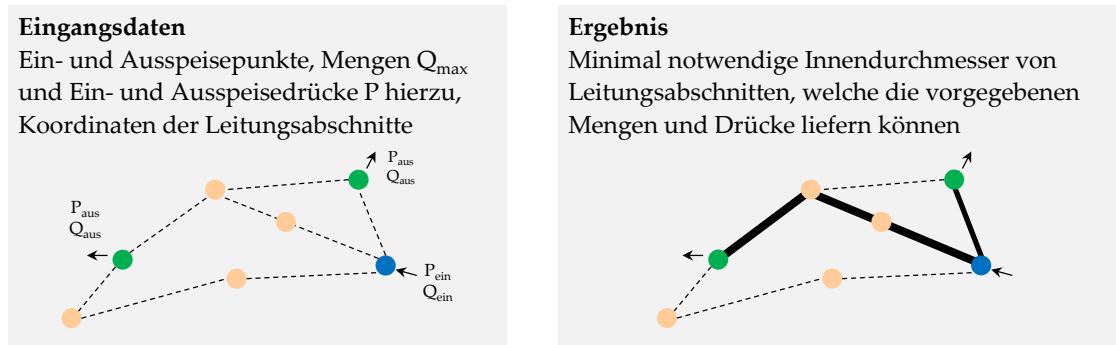
4.4.3 Berechnung synthetischer Kosten und zugehöriger Vergleichsparameter

In einem zweiten Schritt werden für die oben definierten Versorgungsaufgaben und Variationen hiervon synthetische Kosten geschätzt und die zugehörigen Vergleichsparameter berechnet. Die Berechnung der *Vergleichsparameter* erfolgt analog zur Berechnung bei den realen Netzen und ist in Anhang I.2 dokumentiert. Nachfolgend ist die Berechnung der *synthetischen Kosten* beschrieben.

Zur Berechnung der Kosten wird approximiert, welche Rohrdurchmesser je Leitungsabschnitt benötigt werden, um die aus Netztopologie kombiniert mit zu leistenden Mengen und Drücken gegebene Versorgungsaufgabe ohne den Einsatz von Verdichtern erfüllen zu können. Der Ansatz ist in Abbildung 15 dargestellt. Es wird somit implizit davon ausgegangen, dass die Trassenverläufe gegeben die geographischen Gegebenheiten bereits optimiert bzw. nicht veränderbar sind.³² Die Optimierung erfolgt nach dem Newton-Verfahren, wobei die Kirchhoffschen Gesetze sowie das Widerstandsgesetz zur Berechnung des Druckabfalls über die Distanz als Restriktionen zu erfüllen sind. Die Details der Optimierung finden sich in Anhang IV. Verzweigte bzw. vermaschte Netze weisen grundsätzlich durch den Einbau von Schiebergruppen und Abzweigungen leicht höhere Rohrwiderstände auf. Um diese abzubilden, werden bei der Berechnung der integralen Rohrrauhigkeiten der einzelnen Leitungsabschnitte unterschiedliche *k*-Werte zugrunde gelegt, die der Tabelle 9 zu entnehmen sind.

³² Dies im Gegensatz zu CONSENTEC (2012), wo der Leitungsverlauf unter Annahme einer homogenen Fläche ohne geographische Hindernisse usw. jeweils neu konstruiert wurde.

Abbildung 15: Illustration der Optimierung



Quelle: Eigene Darstellung

Für die so berechneten Innendurchmesser der einzelnen Leitungsabschnitte werden die annuitätischen Kosten geschätzt, die sich aus deren Errichtungskosten zu Tagesneuwerten ergeben mit der kalkulatorischen Abschreibung über eine mit 65 Jahren angenommene betriebsübliche Nutzungsdauer (Stahl kathodisch geschützt) und einem kalkulatorischen (realen) Zinssatz auf das im Sachanlagevermögen gebundene Gesamtkapital i.H.v. konstant 3%. Die für den Betrieb des Leitungsabschnitts notwendigen jährlichen Betriebskosten werden gestützt auf unsere Erfahrungswerte mit einem festen Pauschalkostenzuschlag i.H.v. 1% der Errichtungskosten geschätzt. Als Bezugsgröße für Tagesneuwerte für eine DN1200 Röhre wird der Kostensatz von 1.000.000 EUR/km angesetzt (inklusive Tiefbaukostenanteil). In dem Zusammenhang sei festgehalten, dass vorliegend nicht die absolute Höhe der so geschätzten Kosten entscheidend ist, sondern die jeweils relative Kostenwirkung bei Änderungen der Versorgungsaufgabe. Die relative Kostenwirkung ist jedoch gänzlich unabhängig vom angenommenen Standardkostensatz.

Die Abstufung der Standardkostenfaktoren für verschiedene Nenndurchmesser ist in **Tabelle 10** angegeben (vgl. auch Darstellung der Kostenfunktion in Abbildung 11 auf Seite 35). Aus den so aktualisierten Standardkostenfaktoren (Spalte 3) wurde eine Kostenfunktion in Abhängigkeit des Nenndurchmesser geschätzt, d.h. es wurden keine sprungfixen Kosten nach Nenndurchmesser unterstellt, sondern ein stetiger Kostenverlauf angenommen, damit die Ergebnisse nicht durch sprungfixe Kostenstrukturen überlagert werden.³³

³³ Kostenfunktion vgl. IV.3. Bei der Betrachtung der Netze realer FNB – insbesondere der „auch verteilenden“ unter ihnen – mit ihren zahlreichen Leitungsabschnitten durchmischen sich die Zusatzkosten bei beispielsweise ansteigender Last auf eine Weise, die trotz sprungfix ansteigender Kosten auf Ebene der Einzelkomponenten (aufgrund der Beschränkung auf Standarddurchmesser) zu einem näherungsweise gleichmäßigen Kostenanstieg führen.

Tabelle 10: Standardkostenfaktoren für unterschiedliche Durchmesserklassen

Nenndurchmesser	Standardkostenfaktor CONSENTEC 2012	Standardkostenfaktor neu	Standardkostensatz neu pro Leitungskilometer in EUR
DN 100	8%	10%	100000
DN 200	16%	20%	200000
DN 300	26%	29%	290000
DN 400	33%	40%	400000
DN 500	40%	47%	470000
DN 600	47%	53%	530000
DN 700	60%	59%	590000
DN 800	78%	66%	660000
DN 900		74%	740000
DN 1000	82%	82%	820000
DN 1100		90%	900000
DN 1200	100%	100%	1000000
DN 1400	150%	120%	1200000

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf CONSENTEC (2010), NEP Gas 2015 und internen Werten 4Management

4.4.4 Ergebnisse

In einem dritten Schritt werden die für die jeweiligen Variationen der Versorgungsaufgaben berechneten Vergleichsparameter und synthetischen Kosten miteinander verglichen. Die Parameter und Kosten für die sechs Ausgangs-Versorgungsaufgaben sind in Tabelle 9 dargestellt.

Die Ergebnisdarstellung wird in drei Teile gegliedert:

- **Validierung:** Als Validierung der Berechnungen wird der Erklärungsgehalt der endogenen Parameter Rohrvolumen und Rohrmantelfläche gezeigt, welche aufgrund ihres direkten Zusammenhangs mit den modellierten Kosten per Annahme eine besonders hohe Korrelation aufweisen sollten;
- **Variationen:** Darstellungen, wie sich die einzelnen Variationen der Versorgungsaufgabe auf die verschiedenen Vergleichsparameter auswirken bzw. diese Variationen in den verschiedenen Netzen von den Vergleichsparametern erklärt werden können;
- **Einzelparameter:** Darstellungen, wie einzelne Vergleichsparameter alle 168 Variationen der Versorgungsaufgabe zu erklären vermögen.

4.4.4.1 Validierung: Endogene Parameter Rohrmantelfläche und Rohrvolumen

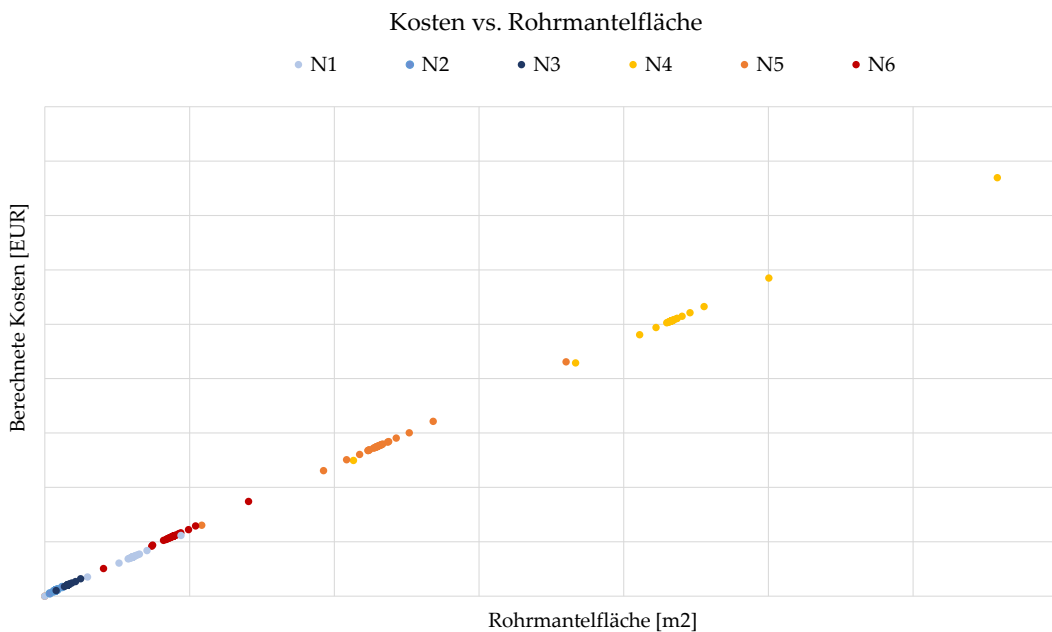
Wie in Abschnitt 4.4.3 dargelegt, wird eine mit dem Durchmesser der Rohrleitungen stetige, lineare Kostenfunktion angenommen und ansonsten hierzu proportionale Kosten modelliert. Da die Rohrmantelfläche linear mit dem Durchmesser steigt, das Rohrvolumen jedoch näherungsweise quadratisch, müsste sich bei richtiger Kostenberechnung für die Rohrmantelfläche per Annahme ein jeweils linearer Zusammenhang des Parameters mit den modellierten Kosten ergeben. Dies wird in **Abbildung 16** bestätigt, welche für alle 168 Ausprägungen der Versorgungsaufgabe einerseits den berechneten Wert der Rohrmantelfläche und andererseits die modellierten zugehörigen Kosten mit einem Punkt im Scatter-Plott darstellt. Die verschiedenen Farben stellen die verschiedenen Netze dar. Ein gelber Punkt repräsentiert also eine Variation

der Versorgungsaufgabe von Netz 4. Insofern wurden die Kosten ausgehend von einer gegebenen Optimierungslösung korrekt hochgerechnet.

Rohrmantelfläche

Unter den getroffenen Annahmen bedeutet dies, dass die Rohrmantelfläche sowohl bei einer Verdoppelung der Entfernung wie auch bei einer Verdoppelung der Kapazität je Leitungsabschnitt ein korrekter Indikator für die Errichtungskosten einer Rohrleitung ist. Inwieweit die Rohrmantelfläche jedoch tatsächlich geeignet ist, die Kosten der gesamten realen Netze abzubilden, hängt davon ab, ob einerseits der angenommene lineare Zusammenhang zutrifft und andererseits in welchem Ausmaß nicht modellierte Kostenkomponenten wie Verdichter relevant sind. Hierüber vermag die vorliegende RNA keine Auskunft zu geben bzw. dies wird später im Rahmen der KTA Oec geklärt.

Abbildung 16: Erklärungsgehalt der Rohrmantelfläche

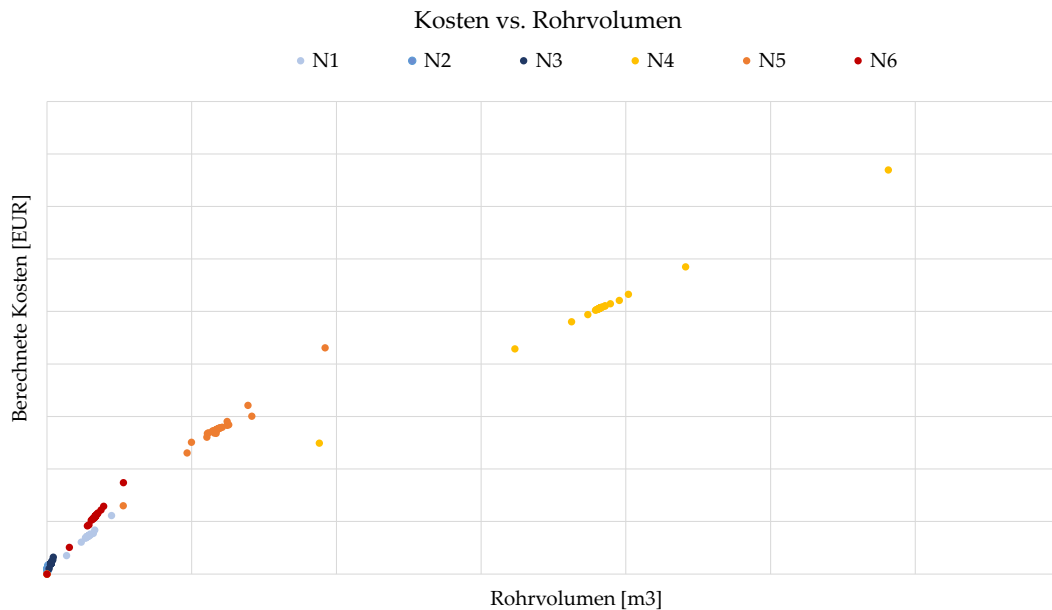


Quelle: Eigene Darstellung

Rohrvolumen

Abbildung 17 zeigt die Berechnungsergebnisse für den Parameter Rohrvolumen. Eine genaue Analyse zeigt, dass über alle Versorgungsaufgaben hinweg unter Ausnahme der Variation zur Transportentfernung, wo eine Längenverdoppelung eine Kostenverdoppelung ergibt, eine leichte Krümmung auszumachen ist. Wie erwartet, bewertet somit das Rohrvolumen längenbezogene Variationen der Versorgungsaufgabe mit anderem funktionalen Zusammenhang als Variationen, welche die Kapazität der Leitungen betreffen (linear vs. quadratisch). Relativ gesehen ist dieser Effekt bei den untersuchten Variationen eher geringfügig bzw. kaum sichtbar.

Abbildung 17: Erklärungsgehalt des Rohrvolumens



Quelle: Eigene Darstellung

4.4.4.2 Variationen von Versorgungsaufgaben

Als nächstes wird anhand ausgewählter, jeweils stellvertretender Netze aufgezeigt, wie die verschiedenen Parameter einzelne Variationen der Versorgungsaufgabe abzubilden vermögen. Es wird jeweils der Erklärungsgehalt relativ zur Ausgangskonfiguration des jeweiligen Netzes aufgezeigt (100%, „Benchmark“). In den Abbildungen entspricht die dicke gestrichelte Kurve jeweils den modellierten Kosten (wiederum relativ zur Ausgangskonfiguration).

Variationen Mengen (Netzlast bzw Q_{max})

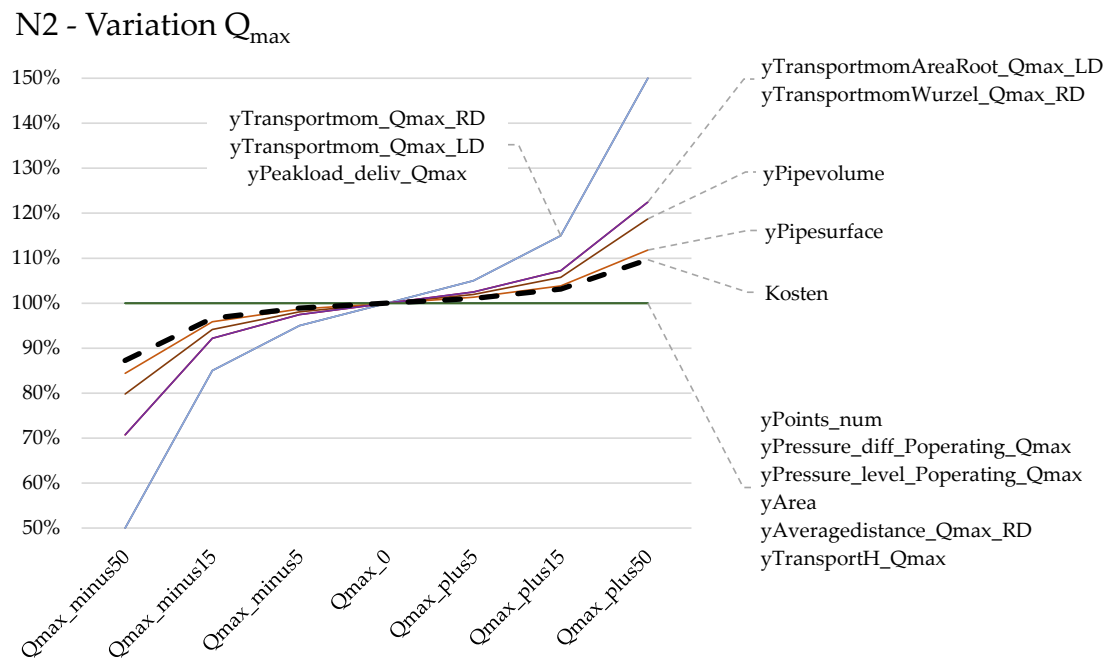
Abbildung 18 zeigt anhand von Netz 2, wie die Vergleichsparameter die von sieben verschiedenen Höchstlast-Variationen verursachten Kostenwirkungen erklären. Die Kurven sind teils überlagert, weshalb nicht alle Parameter sichtbar sind. Die Abbildung zeigt folgendes:

- Die beiden endogenen Parameter Mantelfläche und Rohrvolumen bilden die Kosten am genauesten ab. Das Rohrvolumen überschätzt die mit Kapazitätsunterschieden einhergehenden Kostenwirkungen etwas stärker. Müsste ein Netz mit 50% mehr Kapazität errichtet werden (Szenario ganz rechts in der Abbildung), überschätzt das Rohrvolumen die hier berechneten Mehrkosten um ca. 10%.
- Von den exogenen Parametern zeigen das Transportwurzelmoment und die Wurzel Transportmomentfläche Kapazitätsdifferenzen am besten an, wenn auch überhöht. Eine Überhöhung muss später im Effizienzvergleich per se kein Problem sein, da der Parameter mit einer

angepassten (die Kosten optimal erklärenden) Gewichtung einfließt und so z.B. Überhöhungen reduziert oder eliminiert werden können.³⁴

- Ebenfalls grundsätzlich geeignet, jedoch mit der stärksten Überhöhung einhergehend sind die Parameter Transportmoment und Höchstlast, wo eine Verdoppelung der Mengen zu einer Verdoppelung des Parameters führt.
- Unverändert bei Mengen/ Q_{max} -Variationen bleiben die Parameter Anschlusspunkte, die durchschnittliche Transportentfernung, alle Druckparameter sowie die Polygonfläche.

Abbildung 18: Erklärungsgehalt der Parameter für Variationen der Höchstlast



Quelle: Eigene Darstellung

Variationen Transportentfernung / Netzfläche

Abbildung 19 zeigt stellvertretend anhand Netz 3 die Variationen zur Transportentfernung (durch Streckung des Netzes um minus 50 bis zu plus 50 Prozent). Die Distanz ist demnach ein sehr wesentlicher Kostentreiber, indem eine Verdoppelung der Transportentfernung auch zu doppelten Kosten führt. Hinsichtlich der Abbildung dieser Kostenfolgen durch die Parameter lässt sich Folgendes festhalten:

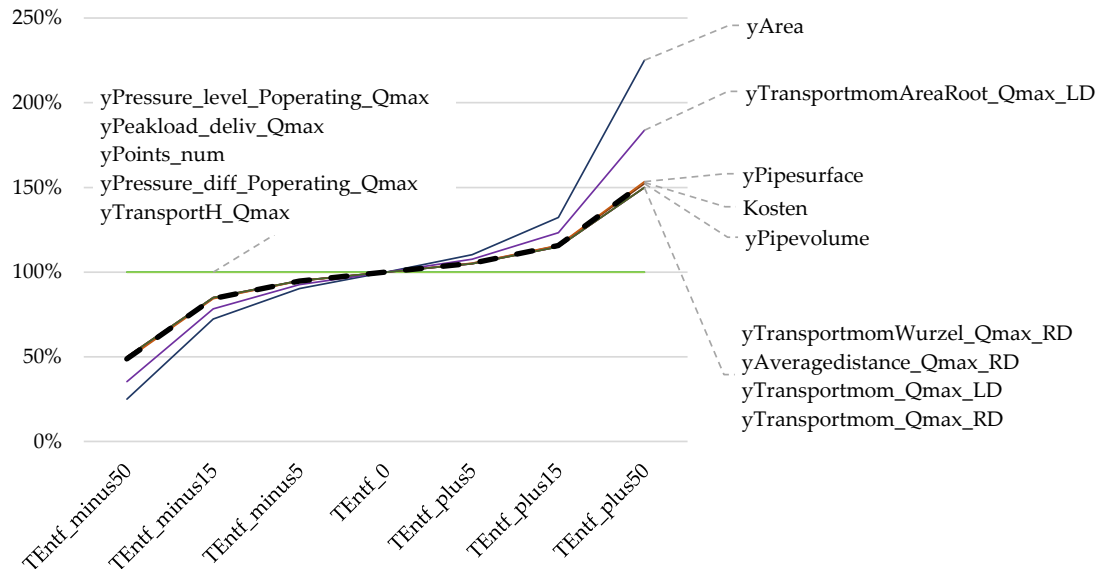
- Die Parameter Transportwurzelmoment, Transportmoment, durchschnittliche Transportdistanz, Volumen und Rohrmantelfläche vermögen die modellierten Kostenfolgen einer Änderung der Netzausdehnung mit sehr genauer Abbildung zu fassen;
- Der Parameter Polygonfläche und in etwas geringfügigerem Umfang die Wurzel Transportmomentfläche zeigen die Kosten einer Streckung überhöht an, jedoch grundsätzlich in richtiger Richtung.

³⁴ Problematischer können Wirkungen wie oben diskutiert bei der Rohrmantelfläche sein, welche mit Gewichtungsfaktoren nicht gelöst werden können, es sei denn es werden im Effizienzvergleichsmodell gegenläufige Parameter verwendet oder die in der vorgenommenen Kostenmodellierung relevanten Kosten, die sich mit der Kapazitätserhöhung linear verhalten, nicht abbildet.

- Unverändert bleiben die Druckparameter, Anschlusspunkte, horizontaler Transportanteil und Höchstlast, bzw. diese Parameter vermögen ceteris paribus Änderungen in der Netzausdehnung nicht abzubilden.

Abbildung 19: Erklärungsgehalt der Parameter für Variationen der Transportentfernung

N3 - Transportentfernung



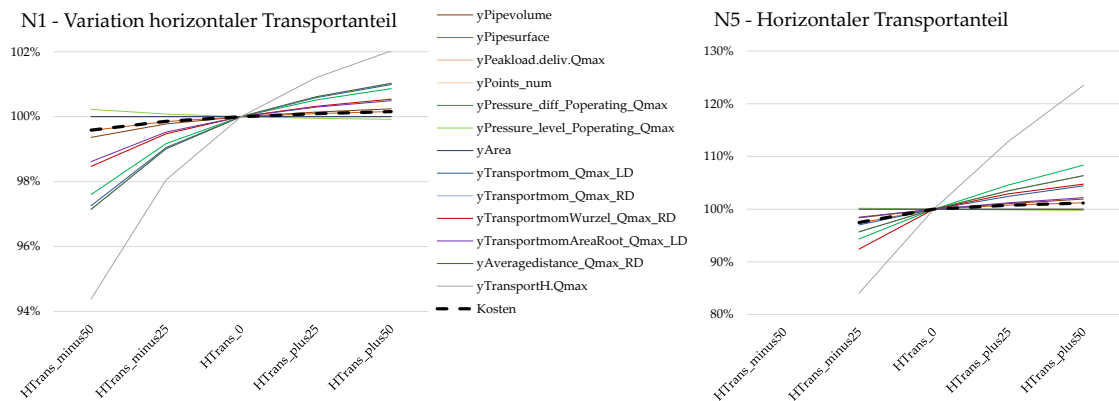
Quelle: Eigene Darstellung

Horizontaler Transportanteil

Abbildung 20 zeigt die Ergebnisse der Variationen des horizontalen Transportanteils für Netz 1 ausgehend von einem hohen Transportanteil (94%) und für Netz 5 ausgehend von einem mittleren Anteil (43%). Die Kostenfolgen der Variationen sind eher geringfügig (gestrichelte Linie weicht nicht stark ab von der Horizontalen). Die Parameter erklären diese wie folgt:

- Der Parameter horizontaler Transportanteil verhält sich nicht linear mit Kostenänderungen;
- Die exogenen Parameter, welche Differenzen abbilden, zeigen mit Ausnahme der Druckdifferenz grundsätzlich die richtige Richtung an, reagieren jedoch stärker als die Kosten. Eine Rangierung ist nicht eindeutig bzw. hängt von der spezifischen Konstellation ab.
- Unverändert bezüglich Variationen im horizontalen Transportanteil bleiben Polygonfläche, Anschlusspunkte und Höchstlast.
- Letztlich werden die (geringfügigen) Kostenvariationen nur durch die endogenen Parameter Volumen und Mantelfläche abgebildet.

Abbildung 20: Erklärungsgehalt der Parameter für Variationen des horizontalen Transportanteils



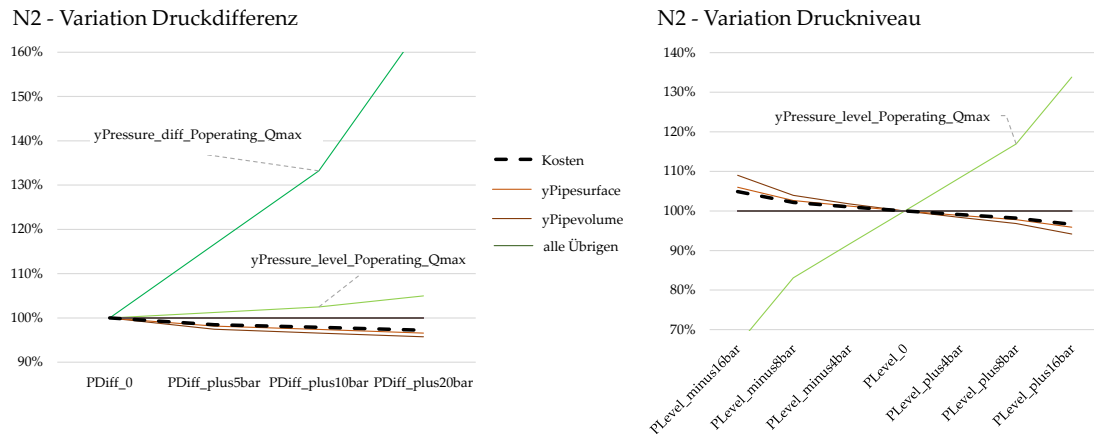
Quelle: Eigene Darstellung

Druckdifferenz und Druckniveau

Die Ergebnisse zu den Variationen von Druckdifferenz und Druckniveau sind in **Abbildung 21** dargestellt. Demnach hat eine erhöhte Druckdifferenz c.p. eine leicht kostensenkende Wirkung und ein tieferes Druckniveau ist mit höheren Kosten verbunden, da zur Erfüllung der gleichen Mengen mit tieferem Druck c.p. höhere Röhrendurchmesser notwendig sind. Vergleichsweise haben Veränderungen im Druckniveau höhere Kostenänderungen zur Folge als Änderungen in der Druckdifferenz. Bezüglich der erklärenden Parameter ergibt sich folgendes Bild:

- Die Druckvariationen können mit den endogenen Parametern am besten erklärt werden (insb. Mantelfläche);
- Die Variationen der Druckdifferenz können mit beiden Druckparametern (Druckdifferenz, mittleres Druckniveau) abgebildet werden, jedoch besteht innerhalb eines Netzes ein inverser Zusammenhang zu den modellierten Kosten. Variationen im Druckniveau können lediglich mit dem Druckniveau abgebildet werden, da jeweils die Druckdifferenz konstant gehalten wurde.
- Alle anderen untersuchten Parameter (Transport(wurzel)moment, Polygonfläche, Anschlüsse usw.) vermögen die von Druckvariationen hervorgerufenen Kostenunterschiede nicht abzubilden.

Abbildung 21: Erklärungsgehalt der Parameter für Druck-Variationen



Quelle: Eigene Darstellung

Anschlussdichte

Die Ergebnisse zur Anschlussdichte sind wenig aussagekräftig und daher nicht abgebildet. Da die Kosten eines Anschlusspunktes nicht modelliert wurden (z.B. Betriebskosten eines Anschlusspunktes), werden bei den Variationen ausschließlich Kosten im Zusammenhang mit der Erschließung der Punkte mit Leitungen abgebildet. Die Ergebnisse sind somit stark von der spezifischen Konstellation abhängig (wird z.B. ein Exitpunkt zusammengelegt, der gleichzeitig Endpunkt ist; weist der betreffende Exitpunkt eine spezifische Druckkonstellation auf, die im Ausgangsszenario stark kostentreibend wirkt). Über alle Netze hinweg ergibt sich darum kein eindeutiges Bild. Unabhängig davon vermögen (naturgemäß) die endogenen Parameter die Kostenfolgen am besten abzubilden.

4.4.4.3 Erklärungsgehalt der Parameter

Zusammenfassend wird anhand der nachfolgenden Abbildungen aufgezeigt, wie bzw. in welchen Teilaspekten ausgewählte Vergleichsparameter die berechneten 168 Variationen der Versorgungsaufgabe zu erklären vermögen.

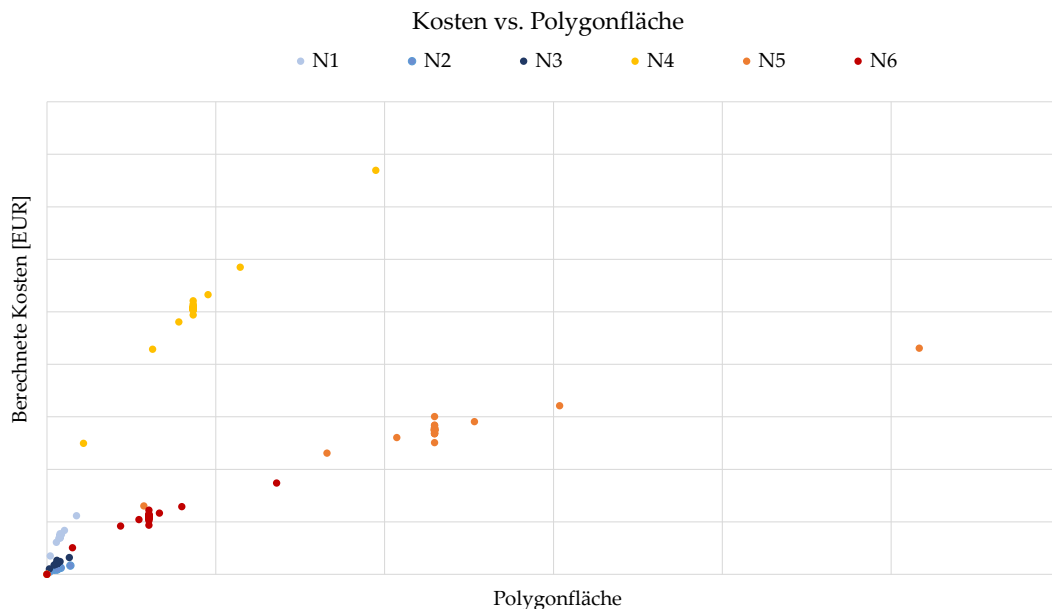
Polygonfläche

Abbildung 22 zeigt den Scatter-Plot zur Polygonfläche. Jeder Punkt repräsentiert wiederum eine der 168 analysierten Versorgungsaufgaben und zeigt für diese Versorgungsaufgabe einerseits den berechneten Wert der Polygonfläche und andererseits die modellierten zugehörigen Kosten. Die verschiedenen Farben stellen die verschiedenen Netze dar. Gestützt auf die Abbildung lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Die Polygonfläche vermag (naturgemäß) alle Druck- und Mengen-induzierten Kosten (Q_{max} , generell aber auch Jahresarbeit) nicht zu erklären (gegen oben und unten verschobene Punkte um die Ausgangskonfiguration je Netz, da zwar Kostenänderungen simuliert worden sind, der Parameter Polygonfläche aber seinen Wert nicht ändert (da die Fläche konstant bleibt wenn z.B. die Menge steigt). Dies ist allerdings nicht weiter problematisch, da ein Parameter nie alle Ausprägungen erklären können muss, weil er in einem Effizienzvergleichsmodell mit weiteren Parametern kombiniert würde, welche die nicht berücksichtigten Aspekte abdecken;

- Innerhalb der Netze (d.h. bei Betrachtung jeweils einer Punktfarbe) besteht ein nicht-linearer Zusammenhang. Die ist an einer leichten Krümmung der Punktwolke je Farbe zu erkennen, wobei die Punkte, welche diese Krümmung ausmachen, Variationen der Netzausdehnung darstellen. Der Parameter vermag also Änderungen der Netzausdehnung mit einheitlichem nichtlinearem Zusammenhang abzubilden, während er die übrigen Variationen der Versorgungsaufgabe „schweigt“. Der Parameter eignet sich somit grundsätzlich gut als komplementärer Parameter;
- Werden die sechs Netze miteinander verglichen, ergibt sich für die einfachen Leitungsstränge (N1 und N4) eine andere Kostenfunktion (insb. Steigung) als für die übrigen Netze. Dies liegt daran, dass diese beiden Netze für ihre Leitungslänge vergleichsweise wenig Polygonfläche aufspannen (vgl. auch Ausführungen in Abschnitt 4.3.1.7). Sind solche Leitungsstränge in der Realität tatsächlich mit weniger Kosten verbunden (z.B. aufgrund geringerer Flexibilitäts- oder Komplexitätsanforderungen), kann die Polygonfläche potenziell etwaige Unterschiede implizit abdecken.

Abbildung 22: Erklärungsgehalt der Polygonfläche



Quelle: Eigene Darstellung

Transportmoment

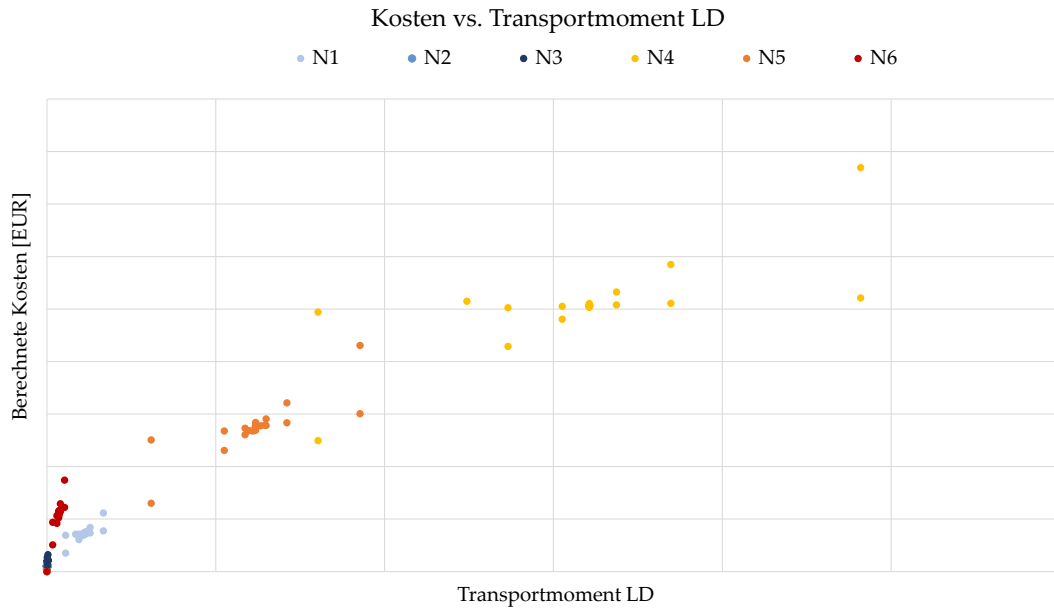
Die Ergebnisse für das Transportmoment LD mit Luftliniendistanzen sind in **Abbildung 23** dargestellt und gelten stellvertretend auch für das Transportmoment RD, welches mittels realer Distanzen gebildet wird. Daraus geht Folgendes hervor:

- Das Transportmoment erklärt innerhalb der Netze die Variationen der Versorgungsaufgaben uneinheitlich. Es reagiert (zu) stark bei Mengenänderungen, während es Variationen in der Netzausdehnung akkurat erklärt (Steigung je Netz jeweils in Richtung Nullpunkt);
- Zwischen den einzelnen Netztopologien ist für die beiden vermaschten Netze N3 und N6 eine andere Steigung auszumachen, bei welchen Entry- und Exitpunkte tendenziell weniger

weit auseinanderliegen. Entsprechend zeigt hier das Transportmoment vergleichsweise geringere Parameterwerte auf und könnte somit stark vermaschte Netze benachteiligen. Ebenso ist die Steigung bei den Mengenvariationen uneinheitlich (flacher bei Leitungssträngen, d.h. hier werden die Kostenwirkungen stärker überschätzt).

Insgesamt weist damit das Transportmoment somit einige Nachteile auf. Vergleichend betrachtet erklärt das Transportmoment RD die Kosten leicht besser als das Transportmoment LD.

Abbildung 23: Erklärungsgehalt des Transportmoments



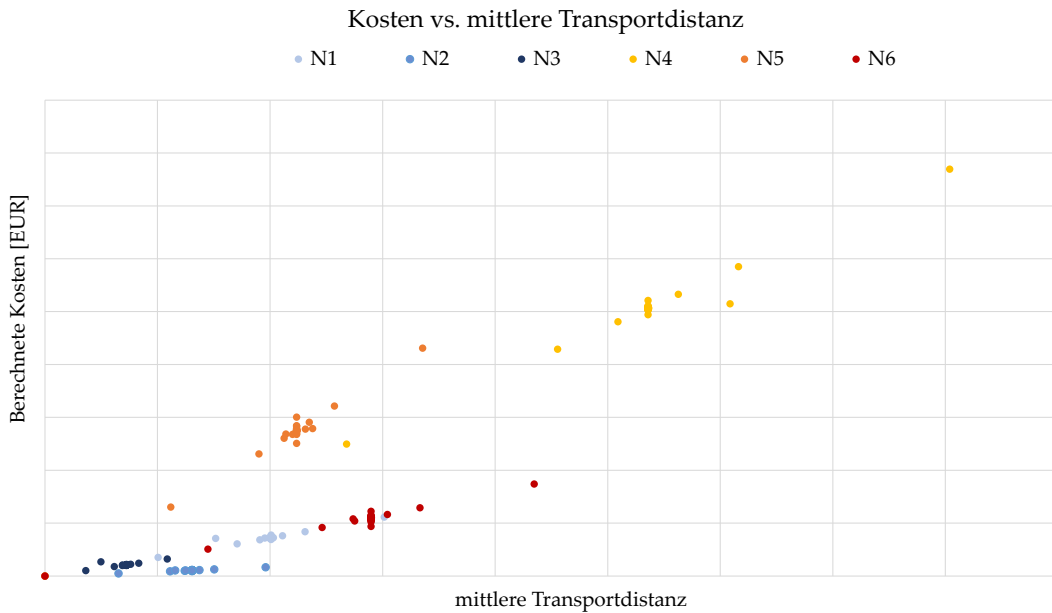
Quelle: Eigene Darstellung

Mittlere Transportdistanz

Abbildung 24 zeigt die Kosten-Parameter-Kombinationen für die mittlere Transportdistanz, die als Randprodukt aus der Transportmomentberechnung entspringt. Hier fällt folgendes auf:

- Je Netz liegen weitgehend einheitliche (lineare) Zusammenhänge vor, d.h. auf Ebene Netz lässt sich für die überhaupt vom Parameter erklärbaren Variationen ein guter Erklärungsgehalt feststellen;
- Jedoch kann der Parameter die Kostenunterschiede der verschiedenen Netztypen nicht einheitlich erklären (unterschiedliche Steigungen, kein erkennbares Muster).

Abbildung 24: Erklärungsgehalt der mittleren Transportdistanz

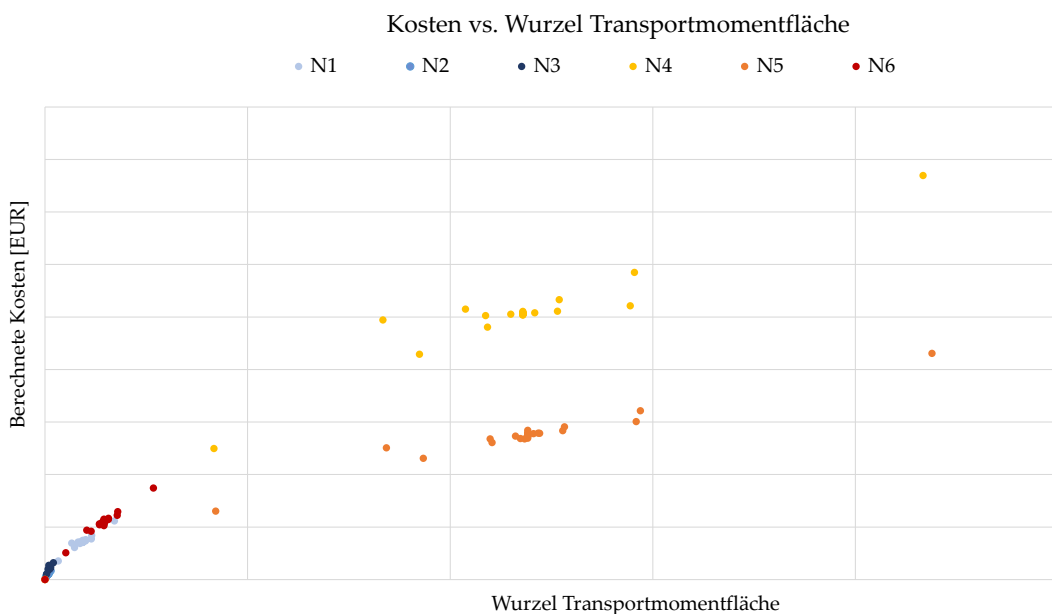


Quelle: Eigene Darstellung

Wurzel Transportmomentfläche

Abbildung 25 zeigt die Resultate für die Wurzel der Transportmomentfläche. Der Parameter vermischt die Ergebnisse von Transportmoment und Polygonfläche, wobei durch die Wurzel die Unterschiede im Vergleich zur Transportmomentfläche geringfügiger ausfallen, ebenso werden die Effekte des Transportmoments abgeschwächt. Im Resultat entsteht eine recht gute Erklärung für die Netze N1, N2, N3 und N6, mit ähnlichen Parameterwerten für N4 und N5 bei stark unterschiedlichen modellierten Kosten. Die Gründe hierfür sowie die Interpretation des Parameters sind jedoch unklar.

Abbildung 25: Erklärungsgehalt der Wurzel Transportmomentfläche



Quelle: Eigene Darstellung

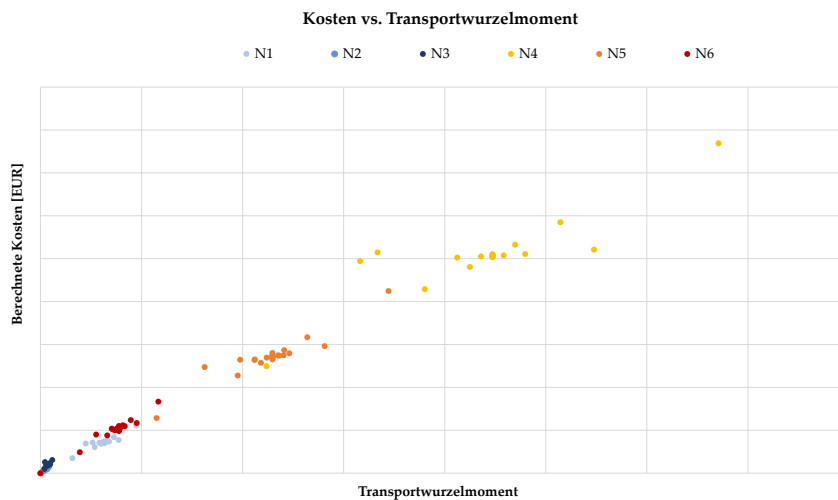
Transportwurzelmoment

Als letzten Parameter zeigt **Abbildung 26** die Ergebnisse für das Transportwurzelmoment:

- Innerhalb der Netze werden sämtliche relevanten Variationen abgedeckt (vertikale Punkte-Linien um Mittelpunkt/Basiszenario kaum sichtbar). Mengenänderungen werden wie beim Transportmoment überhöht – allerdings weit weniger ausgeprägt.
- Der Parameter kann die Kostenunterschiede zwischen den Netzen wie kein anderer Parameter erklären (weitgehend einheitliche Steigung zum Nullpunkt hin).

Insgesamt weist das TWM eine sehr gute Erklärung je Netz und der Netze untereinander auf mit einer Korrelation von 99.6% für die 168 Versorgungsaufgaben, mithin die größte aller untersuchten exogenen Parameter.

Abbildung 26: Erklärungsgehalt des Transportwurzelmoments



Quelle: Eigene Darstellung

4.4.5 Fazit und Schlussbemerkungen zur Referenznetzanalyse

Zusammenfassend werden folgende Folgerungen aus der Referenznetzanalyse gezogen:

- Insgesamt besteht eine sehr hohe Korrelation der endogenen Parameter Rohrmantelfläche und etwas weniger ausgeprägt Rohrvolumen mit den berechneten Kosten. Bei der Rohrmantelfläche ist dies insbesondere eine Folge der getroffenen Annahmen (Errichtungskosten von Rohrleitungen linear zu deren Durchmesser). Beim Rohrvolumen zeigt sich, dass dieses die Folgen von Mengenänderungen (Q_{max}) mit anderem Zusammenhang abbildet als Änderungen bei der Netzausdehnung.
- Von den exogenen Parametern vermag das Transportwurzelmoment die relativen Kostenunterschiede zwischen Netzen einerseits und Variationen deren Versorgungsaufgabe andererseits am besten zu erklären.
- Beim Transportmoment vermag die Variante gebildet mit realen Distanzen (RD) die Kostenunterschiede leicht besser zu erklären als die Variante mit Luftliniendistanzen (LD). Jedoch vermag das Transportmoment die Kostenunterschiede der sechs Netztypen – wie auch u.a. die Parameter Rohrvolumen, Höchstlast, Wurzel Transportmomentfläche, durchschnittliche

Transportdistanz – nur unzureichend erklären. V.a. auch in der LD Variante unterschätzt es die Kosten von verzweigten und vermaschten Netzen.

- Die Polygonfläche ist nützlich, wenn ein Kostentreiber gesucht wird, der spezifisch möglichst die Netzausdehnung abbilden soll. Er weist einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen Netzausdehnung und Kosten auf. Netze, die lediglich einfache Stränge aufweisen, spannen im Verhältnis zu ihrer Leitungslänge vergleichsweise wenig Polygonfläche auf. Sind solche einfache Leitungsstränge tatsächlich mit weniger Kosten verbunden (z.B. aufgrund geringerer Flexibilitäts- oder Komplexitätsanforderungen), kann die Polygonfläche etwaige Unterschiede potenziell implizit abdecken.
- Die untersuchten Druckvariationen (Druckdifferenz, Druckniveau) sowie Variationen beim horizontalen Transportanteil haben vergleichsweise eine geringe Kostenwirkung. Die hierfür definierten Parameter (Druckdifferenz, Druckniveau, horizontaler Transportanteil) können jedoch die berechneten Kostenfolgen weniger akkurat abbilden als andere Parameter (z.B. endogene Parameter, Transportwurzelmoment).
- Welche Parameter die Kostenwirkung der Anzahl von Anschlusspunkten am besten abzubilden vermögen, kann im Rahmen der Referenznetzanalyse nicht beantwortet werden aufgrund der zugrundeliegenden Annahme, dass ein Anschlusspunkt vollständig vom Endkunden (bzw. nachgelagerten Netzbetreiber) finanziert wird und beim Netzbetreiber keine Kosten verursacht. Die netzseitigen Kostenfolgen können am genauesten mit den endogenen Parametern abgebildet werden.

Einschränkend sei auf Folgendes hingewiesen (vgl. auch die RNA einleitende Ausführungen):

- Die Referenznetzanalyse zeigt auf, welche potenziellen Vergleichsparameter besonders kostenrelevante Merkmale der Versorgungsaufgabe der Gasfernleitungsnetzbetreiber zum Ausdruck bringen können.
- Da jedoch von den realen Netzstrukturen und –kosten abstrahiert wurde bzw. vereinfachende Versorgungsaufgaben analysiert wurden, kann die Referenznetzanalyse keine definitive Parameterauswahl leisten. Diese erfolgt unter Berücksichtigung des erzielbaren Erklärungsgehalts von Parameter-Kombinationen hinsichtlich der Kosten der im Effizienzvergleich teilnehmenden FNB (vgl. nachfolgend in Kapitel 5).
- Insbesondere kann die RNA die Kostenfolgen im Zusammenhang mit Netzflexibilität durch wechselnde Einspeisungen, Marktgebietszusammenlegungen oder erforderliche Netzausbau durch Anforderungen benachbarter Marktgebiete nicht ausreichend stark darlegen. Darüber hinaus kann die Referenznetzanalyse keine Aussage zur Eignung von Vergleichsparametern machen, die primär auf eine Aufdeckung von Unterschieden in den Inputkosten der Unternehmen für identische Outputs zielen.
- Die Referenznetzanalyse ergänzt somit die ingenieurwissenschaftliche Beurteilung der Parameter, welche die Parameterauswahl für den Effizienzvergleich vorbereitet, sie hat aber nicht den Anspruch, die Eignung jedes grundsätzlich denkbaren Parameters abschließend zu beurteilen.

4.5 Fazit

Gestützt auf die obigen Analysen, namentlich

- vor dem Hintergrund der vorgenommenen Gruppierung der Parameter nach sachlogischer Zusammengehörigkeit, ihrer Einordnung zu Versorgungsdimensionen und ihrer Beeinflussbarkeit durch die Netzbetreiber;
- aufgrund einer qualitativen Analyse der Parameter auf wesentliche Zusammenhänge mit Netzkosten, ausgehend von früheren Kostentreiberanalysen basierend auf analytischen Kostenzusammenhängen und unseren einschlägigen Erfahrungen sowie
- in Beachtung der quantitativen Untersuchungen im Rahmen der vorgenommenen Referenznetzanalyse

werden die untersuchten potenziellen Vergleichsparameter aus ingenieurwissenschaftlicher Perspektive hinsichtlich ihrer Eignung als Kostentreiber geordnet. Die Sortierung nach Eignung wird mit Blick auf das im Rahmen der Modellentwicklung durchgeführte „Top-Down-Verfahren“ erstellt, bei dem ausgehend von jedem Parameter mit bester Eignung jeweils eine Kostenfunktion entwickelt wird. Es gilt folgende Einteilung:

- **Gute Eignung:** Kostentreiber dieser ersten Kategorie eignen sich aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht besonders gut, um die Kosten der Netzbetreiber abzubilden;³⁵
- **Komplementäre Eignung:** Parameter der zweiten Kategorie werden als Kostentreiber eingeschätzt, welche wesentliche Teilaspekte abzubilden vermögen. Sie eignen sich im Besonderen als Komplemente für Parameter der ersten Kategorie, wobei die Eignung unterschiedlich ausfallen kann. Beispielsweise eignet sich die Verdichterkapazität als Komplement zur Rohrmantelfläche oder zum Rohrvolumen, nicht aber zum Transportwurzelmoment (vgl. Ausführungen in Abschnitt 4.3.1.5);
- **Partielle Eignung:** Parameter der dritten Kategorie werden als am wenigsten geeignet eingestuft, können jedoch potenziell gleichwohl wesentliche Teilaspekte in ein Modell einbringen.

Tabelle 11 zeigt das Ergebnis der vorgenommenen Einteilung. Im oberen Teil sind die stärker exogenen Parameter eingeordnet, im unteren Teil die eher endogenen. Dies bedeutet, dass kein Parameter allein aufgrund seiner Beeinflussbarkeit (eher exogen vs. eher endogen) als weniger geeignet klassifiziert wurde. Ebenso hat die Geeignetheit keinen Ausschluss eines Parameters zur Folge, da die Modellentwicklung in Kapitel 5 vielschichtig erfolgt (u.a. Bottom-up-Verfahren, Weiterentwicklung des Modells der PR2, auch Parameter mit partieller Eignung sind offen für das Top-Down-Verfahren, Second-Stage-Analyse).

³⁵ Dies bedeutet jedoch nicht, dass diese Parameter kombiniert werden sollten. Vorliegend eignen sich bspw. die beiden gut geeigneten Parameter – Transportwurzelmoment und seine endogene Entsprechung Rohrmantelfläche – nicht zur gleichzeitigen Verwendung, da sie grundsätzlich den gleichen Kostenzusammenhang abbilden (vgl. hierzu Ausführungen in Abschnitt 4.3).

Tabelle 11: Darstellung der Parameter nach Eignung aus Sicht der KTA Ing

Gute Eignung	Komplementäre Eignung	Partielle Eignung
Stärker Exogen		
Transportwurzelmoment	Gebietseigenschaften	Transportmoment
		Mittlere Transportentfernung
	Last	Jahresarbeit
	Ausspeisepunkte	Einspeisepunkte
	Ein- und Ausspeisepunkte	Druck
		Horizontaler Transport
Stärker Endogen		
Rohrleitungsmantelfläche	Leitungslänge, Rohrleitungsvolumen	
	Verdichter (Leistung, Energie)	Verdichter (Anzahl)
	Polygonfläche	(Wurzel) Transportmomentfläche
	Verzweigungen	Maschen

Quelle: Eigene Darstellung

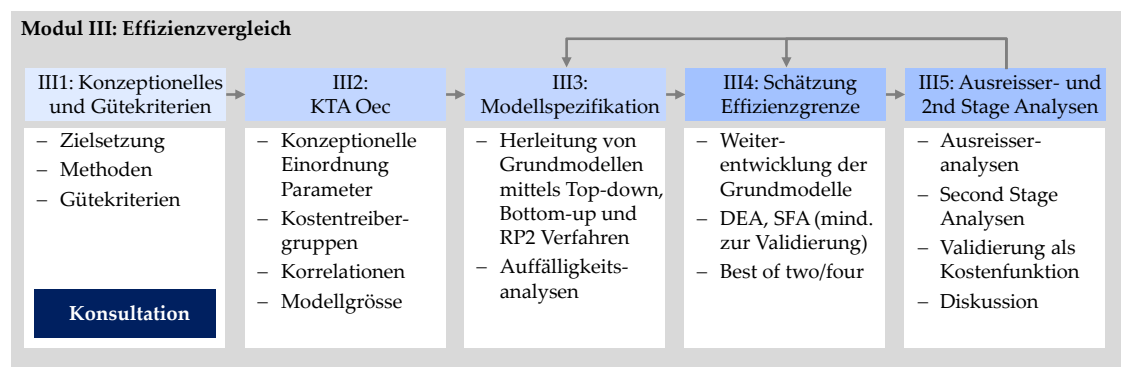
5 Effizienzvergleich

5.1 Vorgehen

Ausgehend von den validierten Daten und den Ergebnissen der KTA Ing wird in diesem Kapitel der eigentliche Effizienzvergleich dokumentiert. **Abbildung 27** stellt das gewählte Vorgehen dar:

- Zunächst werden die für den Effizienzvergleich eingesetzten Methoden und Gütekriterien definiert, diskutiert und erläutert (Arbeitspaket III1, nachfolgend Abschnitt 5.2);
- Im Rahmen einer KTA Oec werden vorbereitende Arbeiten ausgeführt, darunter Gruppen- und Korrelationsanalysen und Betrachtungen zur optimalen Modellgröße (Arbeitspaket III2, nachfolgend Abschnitt 5.3);
- Danach erfolgen die Analysen mehrstufig und stark iterativ:
 - Im Rahmen der Modellspezifikation werden mittels drei verschiedener Verfahren anhand von Durchschnittskostenmodellen optimale Parameterkombinationen hergeleitet und auf ihre Eignung als Kostenfunktion und Grundmodell für den Effizienzvergleich untersucht. Beim Top-down-Verfahren wird auf die Ergebnisse der KTA Ing zurückgegriffen. Dieses wird ergänzt durch das Bottom-up-Verfahren, welches unabhängig von der vorgenommenen ingenieurwissenschaftlichen Einschätzung statistisch optimale Kostentreiber-Kombinationen identifiziert. In einem dritten Verfahren wird das Modell der RP2 auf seine Eignung für die Daten der RP3 geprüft. Bei allen Verfahren werden mittels robuster Regression Auffälligkeitsanalysen durchgeführt. Die Arbeiten sind in Arbeitspaket III3 zusammengefasst und nachfolgend in Kapitel 5.4 wiedergegeben;
 - Die Grundmodelle werden danach auf ihre Eignung als Effizienzgrenze geprüft und aus konzeptioneller und regulatorischer Sicht weiterentwickelt. Hierbei werden u.a. Ausreißeranalysen bezogen auf die Effizienzgrenze durchgeführt und die bestabgerechneten Effizienzwerte bestimmt. Die geeignetsten Modelle werden anschließend als Kostenfunktion und mittels Second-Stage-Analysen überprüft. Zum Schluss wird das Modell gewählt, im Detail spezifiziert und erneut validiert, welches die in III1 gesetzten konzeptionellen, statistischen und regulatorischen Gütekriterien am besten erfüllt (Arbeitspakete III.4 und 5, nachfolgend Kapitel 5.4).

Abbildung 27: Vorgehen Effizienzvergleich



Quelle: Eigene Abbildung

5.2 Methoden und Kriterien

Die zentrale Herausforderung beim Effizienzvergleich ist es, von den 55 definierten Parametern gemäß Anhang II diejenigen zu identifizieren, die konzeptionell sinnvolle Kostentreiber sind und sich gegenseitig gut ergänzen. Die angewandten Methoden werden nachfolgend direkt in den einzelnen Kapiteln vorgestellt. Das finale Modell soll den folgenden Kriterien möglichst gut entsprechen, wobei konzeptionelle, statistische und regulatorische Kriterien unterschieden werden:

Konzeptionelle Kriterien

- Möglichst einfache Interpretation der Parameter und des Modells;
- Aufbauend auf ingenieurwissenschaftlicher Kostentreiberanalyse (Kapitel 4);
- Möglichst vollständiges Modell: Wenn möglich sollen neben den Netzebenen (vorliegend Druckstufen) alle drei Versorgungsdimensionen – Transport, Kapazität- und Dienstleistungsbereitstellung – abgebildet werden, wobei die letzten beiden Dimensionen gemäß Abschnitt 4.2.4 als „need to have“ behandelt werden);
- Die Eigenschaften der Modellspezifikation sollen natürlich sein, also eine solide ökonomische Grundlage in der Produktionstheorie haben.

Statistische Kriterien

- Unverzerrte, konsistente und effiziente Schätzer;
- Signifikante Parameter mit richtigem Vorzeichen;
- Die detaillierten statistischen Anforderungen finden sich in den Abschnitten 5.4.1 und 5.5.1 nachfolgend.

Regulatorisch

- Konform mit der ARegV, also insb. Erfüllung aller ARegV-Vorgaben;
- Berücksichtigung von Parametern, die möglichst vollständig für alle FNB vorliegen;
- Verwendung möglichst exogener Parameterdefinitionen und Vermeidung von Parameteraggregationen, bei denen die einzelnen Komponenten in arbiträrer Weise gewichtet werden;
- Robustheit gegenüber kleinen Datenänderungen;
- Konstanz mit früheren Effizienzvergleichen einerseits hinsichtlich des gewählten Modells („Modellkontinuität“) und andererseits hinsichtlich der Ergebnisse im dem Sinne, dass individuelle Effizienzveränderungen nachvollziehbar sein sollen („Ergebniskontinuität“);
- Beachtung des Vorsichtsprinzips, bei dem im Zweifelsfall die Netzbetreiber nicht schlechter gestellt werden sollen, damit sich ein möglicher Spezifikationsfehler nicht zu ihren Lasten auswirkt.

5.3 Ökonomische Kostentreiberanalyse (KTA oec)

Die KTA Oec findet vorbereitend zur Modellentwicklung statt und hat ein besseres Verständnis der Parameter im Datensatz zum Ziel. Folgende Arbeitsschritte werden durchgeführt:

- Identifikation der wichtigsten Kostentreiber je Parametergruppe im Sinne von Parametern, welche die Kostenunterschiede zwischen den FNB am besten erklären können;
- Korrelationsanalyse zur Entwicklung eines Grundverständnisses für Zusammenspiel und Wirkungsweise der verschiedenen Parameter im Datensatz;
- Analyse zur optimalen Anzahl von Parametern, die im späteren Effizienzvergleichsmodell idealtypisch verwendet werden sollen.

Ausgangspunkt ist die bereits im Rahmen der KTA Ing. vorgenommene konzeptionelle Gruppierung und Einordnung der Parameter nach Versorgungsdimension und Kontrollierbarkeit (vgl. Abschnitt 4.2).

5.3.1 Kostentreibergruppen

Tabelle 12: Gruppenanalyse: Erklärungsgehalt der einzelnen Parameter

Parameter	t-Wert	BIC (sTotex)	Parameter	t-Wert	BIC (sTote)
yPipelength	9.52	623.36	yArea	18.13	604.37
yPipevolume	15.29	609.56	yArea_all	18.24	604.19
yPipesurface	12.90	614.64	yTransportmom_Qmax_LD	6.24	634.25
yEnergy_injected_Qyear	9.89	622.28	yTransportmom_Qmax_RD	7.72	628.98
yEnergy_delivered_Qyear	7.62	629.30	yTransportmom_Qyear_LD	4.39	641.69
yPeakload_injec_simult	12.67	615.17	yTransportmom_Qyear_RD	5.23	638.22
yPeakload_deliv_simult	13.24	613.87	yAveragedistance_Qyear_RD	0.81	654.79
yPeakload_injec_Qmax	17.72	605.06	yTransportmomWurzel_Qmax_RD	19.69	601.83
yPeakload_deliv_Qmax	14.17	611.85	yTransportmomArea_Qmax_LD	10.49	620.62
yPoints_entry_num	7.45	629.88	yTransportmomAreaRoot_Qmax_LD	17.20	605.97
yPoints_exit_num	4.06	643.09	yBranches_num	6.26	634.16
yPoints_num	4.23	642.38	yBranches_exklNKPCustomer_num	6.51	633.25
yPressure_In_Pmin_Qmax	-0.86	654.71	yMeshes_num	7.13	630.99
yPressure_In_Pmin_Qyear	-1.06	654.31	yTransportH_Qmax	-0.84	654.74
yPressure_In_Poperating_Qyear	-1.12	654.17	yTransportH_Qyear	-0.70	654.99
yPressure_Level_Pmin_Qmax	-1.21	653.94	yTransportV_abs_Qmax	9.18	624.34
yPressure_Level_Pmin_Qyear	-1.24	653.87	yTransportV_abs_Qyear	9.77	622.64
yPressure_Level_Poperating_Qyear	-1.09	654.23	yTransportH_abs_Qmax	5.25	638.13
yPressure_Out_Pmin_Qmax	-1.52	653.09	yTransportH_abs_Qyear	3.27	646.45
yPressure_Out_Pmin_Qyear	-1.36	653.55	zGeo_DGM_RANGE	1.72	652.47
yPressure_Out_Poperating_Qyear	-0.95	654.54	zGeo_NEIG_MEAN	0.97	654.49
yPressure_Diff_Pmin_Qmax	0.81	654.80	zSoil_BK4567V02	8.81	625.48
yPressure_Diff_Pmin_Qyear	0.22	655.48	zSoil_BK4567M02	8.25	627.24
yPressure_Diff_Poperating_Qyear	-0.29	655.44	zSoil_BK567V02	9.42	623.64
yCompressor_num	7.43	629.97	zSoil_BK567M02	10.76	619.90
yCompressor_power_sum	6.18	634.46	zSoil_BK0267V02	12.67	615.17
yCompressor_ener_used	8.05	627.90			

Quelle: Eigene Darstellung.

Zum BIC-Kriterium vgl. Abschnitt 5.4.1.

t-Werte mit Betrag über 1.96 zeigen eine Signifikanz im 95% Vertrauensintervall des Parameters in der Schätzung an.

Zunächst werden die Parameter der in Tabelle 5 angegebenen Gruppen untersucht. Diese Arbeiten geben Hinweise darauf, welche Parameter sich eher nicht als primäre Kostentreiber eignen. Innerhalb der Gruppen werden die Kostentreiber hinsichtlich ihrer Signifikanz (t-Wert) und ihres Informationsgehalts (BIC) hinsichtlich der der Aufwandsparameter s_{Totex} und Totex beurteilt. **Tabelle 12** zeigt die Resultate für s_{Totex} (für Totex analog).

Hieraus lässt sich Folgendes ableiten. Den höchsten Erklärungsgehalt haben Parameter, die das Rohrleitungssystem (insb. Rohrvolumen, ebenfalls Mantelfläche), die Kapazitätsnutzung (Höchstlast) sowie die Fläche beschreiben. Den höchsten Erklärungsgehalt hinsichtlich s_{Totex} weist der neu gebildete Parameter Transportwurzelmoment auf, bei dem die Jahreshöchstlast an den einzelnen Ein- und Ausspeisepunkten mit den gemeldeten Trassenverläufen vermengt werden (vgl. Abschnitt I.2.9). Dies bedeutet, dass der neu gebildete Parameter die Kostenunterschiede zwischen den Netzbetreibern speziell gut zu erklären vermag, was die diesbezüglichen Überlegungen im Rahmen der KTA Ing untermauert. Die Anschlusspunkte kommen – wie aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht erwartet – aufgrund ihres eher tieferen Erklärungsgehalts nicht als primärer Parameter in Frage, entscheidend für eine etwaige Berücksichtigung wird daher ihre Komplementarität mit anderen Parametern sein.

In **Tabelle 13** wird die Rangfolge der ausgehend vom Transportmoment gebildeten Parameter angegeben. Die Ergebnisse der KTA Ing werden dabei weitgehend bestätigt. Der Parameter Transportmoment der RP2 weist eine eher geringe Korrelation mit den Kosten aus, insbesondere bei der Verwendung von Luftliniendistanzen und bei der Hinterlegung von Jahresarbeit. Dies untermauert die Vermutung, dass die realen Distanzen (Trassenverläufe) und die stärker auslegungsrelevanten Höchstlasten die Kosten der Netzbetreiber besser abzubilden vermögen. Demgegenüber erreicht das Transportwurzelmoment besten Wert noch vor der Wurzel Transportmomentfläche. Letztere ist aus analytischer Sicht schwierig zu interpretieren. Gleichwohl wird der Parameter insb. im Rahmen des Bottom-up-Verfahrens näher untersucht (Abschnitt 5.4.3).

Tabelle 13: Gegenüberstellung Parameter ausgehend vom Transportmoment

Rang	Parameter	t-Wert	BIC (s_{Totex})
1	yTransportmomWurzel_Qmax_RD	19.69	601.83
2	yTransportmomAreaRoot_Qmax_LD	17.20	605.97
3	yTransportmomArea_Qmax_LD	10.49	620.62
4	yTransportmom_Qmax_RD	7.72	628.98
5	yTransportmom_Qmax_LD	6.24	634.25
6	yTransportmom_Qyear_RD	5.23	638.22
7	yTransportmom_Qyear_LD	4.39	641.69

Quelle: Eigene Darstellung

5.3.2 Korrelationen

In einem weiteren Schritt wurden die Korrelationen zwischen den Struktur- und Aufwandsparmetern (sTotex und Totex) sowie zwischen den Strukturparametern untereinander analysiert. Dies dient u.a. der Identifikation möglicher Quellen von Multikollinearität einerseits³⁶ und der Wechselwirkungen der Parameter andererseits. **Tabelle 14** zeigt die Ergebnisse für ausgewählte Parameter. Generell liegt eine hohe Korrelation der Vergleichsparameter zu den Aufwandsparmetern und oft auch untereinander vor (grün hinterlegte Zellen).

Tabelle 14: Korrelationstabelle (Auszug)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
sTotex	1.00																														
Totex	1.00	1.00																													
yPipeLength	0.93	0.91	1.00																												
yPipeVolume	0.97	0.96	0.93	1.00																											
yPipeSurface	0.96	0.95	0.98	0.98	1.00																										
yEnergy_delivered_Qyear	0.90	0.91	0.70	0.88	0.79	1.00																									
yPeakload_deliv_simult	0.96	0.97	0.83	0.95	0.90	0.95	1.00																								
yPoints_entry_num	0.89	0.89	0.91	0.83	0.87	0.69	0.80	1.00																							
yPoints_exit_num	0.74	0.72	0.85	0.67	0.75	0.43	0.60	0.81	1.00																						
yPoints_num	0.75	0.73	0.86	0.68	0.76	0.45	0.62	0.83	1.00	1.00																					
yPressure_Diff_Pmin_Qmax	0.21	0.22	0.32	0.24	0.30	0.09	0.10	0.18	0.27	0.27	1.00																				
yPressure_Level_Pmin_Qmax	-0.31	-0.27	-0.46	-0.24	-0.33	-0.03	-0.16	-0.54	-0.57	-0.58	0.17	-0.24	1.00																		
yArea	0.98	0.98	0.87	0.94	0.92	0.91	0.96	0.88	0.63	0.65	0.17	-0.24	1.00																		
yArea_all	0.98	0.98	0.87	0.94	0.92	0.91	0.96	0.89	0.64	0.66	0.16	-0.24	1.00	1.00																	
yTransportmom_Qmax_LD	0.86	0.87	0.70	0.87	0.80	0.92	0.94	0.62	0.47	0.48	0.10	0.07	0.86	0.86	1.00																
yTransportmom_Qmax_RD	0.90	0.91	0.74	0.90	0.84	0.94	0.96	0.69	0.51	0.52	0.12	0.01	0.90	0.90	0.99	1.00															
yTransportmomWurzel_Qmax	0.98	0.98	0.91	0.98	0.96	0.91	0.97	0.85	0.68	0.69	0.23	-0.19	0.97	0.97	0.92	0.95	1.00														
yTransportmomArea_Qmax_LD	0.94	0.95	0.82	0.92	0.88	0.88	0.96	0.80	0.62	0.63	0.08	-0.17	0.96	0.96	0.89	0.92	0.94	1.00													
yTransportmomAreaRoot_LD	0.98	0.98	0.85	0.95	0.91	0.94	0.98	0.83	0.61	0.63	0.14	-0.17	0.99	0.99	0.92	0.95	0.98	0.97	1.00												
yAveragedistance_Qyear_RD	0.21	0.23	0.12	0.24	0.20	0.29	0.31	0.01	0.06	0.06	-0.19	-0.55	0.24	0.23	0.51	0.48	0.34	0.28	0.31	1.00											
yTransportH_Qmax	-0.22	-0.20	-0.38	-0.15	-0.26	0.05	-0.03	-0.43	-0.53	-0.53	-0.09	0.76	-0.14	-0.15	0.14	0.08	-0.11	-0.07	-0.07	0.67	1.00										
yTransportV_abs_Qmax	0.93	0.92	0.93	0.92	0.95	0.77	0.84	0.86	0.73	0.74	0.29	-0.40	0.88	0.88	0.72	0.77	0.90	0.83	0.87	-0.03	-0.45	1.00									
yFranches_num	0.86	0.85	0.90	0.82	0.86	0.62	0.80	0.84	0.92	0.93	0.16	-0.45	0.80	0.80	0.68	0.71	0.82	0.83	0.79	0.19	-0.31	0.78	1.00								
yMeshes_num	0.89	0.87	0.88	0.88	0.88	0.70	0.88	0.81	0.78	0.78	0.06	-0.35	0.86	0.86	0.77	0.80	0.87	0.92	0.87	0.25	-0.14	0.77	0.96	1.00							
yCompressor_power_sum	0.86	0.86	0.64	0.80	0.71	0.93	0.90	0.65	0.44	0.45	-0.07	-0.14	0.88	0.87	0.81	0.84	0.82	0.87	0.89	0.19	0.05	0.69	0.64	0.73	1.00						
yCompressor_ener_used	0.91	0.92	0.71	0.87	0.80	0.93	0.94	0.71	0.51	0.52	0.02	-0.09	0.93	0.93	0.90	0.93	0.90	0.96	0.96	0.33	0.01	0.77	0.72	0.82	0.93	1.00					
zGeo_DGM_RANGE	0.42	0.40	0.41	0.40	0.40	0.40	0.36	0.35	0.34	0.34	0.38	-0.22	0.33	0.33	0.24	0.27	0.36	0.30	0.33	-0.24	-0.26	0.50	0.32	0.28	0.38	0.34	1.00				
zGeo_NEIG_MEAN	0.25	0.23	0.14	0.22	0.15	0.34	0.28	0.11	0.09	0.09	-0.26	-0.18	0.21	0.21	0.21	0.20	0.19	0.22	0.24	-0.06	0.15	0.13	0.20	0.26	0.53	0.34	0.55	1.00			
zSoil_BK0267V02	0.96	0.95	0.91	0.94	0.93	0.82	0.94	0.86	0.75	0.76	0.11	-0.34	0.94	0.94	0.82	0.86	0.93	0.96	0.94	0.21	-0.17	0.85	0.92	0.97	0.84	0.88	0.36	0.31	1.00		
zSoil_CB0378V02	0.93	0.92	0.90	0.90	0.90	0.77	0.91	0.87	0.77	0.78	0.11	-0.40	0.91	0.91	0.77	0.81	0.90	0.93	0.90	0.14	-0.23	0.85	0.93	0.97	0.79	0.85	0.45	0.35	0.98	1.00	

Quelle: Eigene Darstellung

Eine hohe Korrelation der potentiellen Vergleichsparameter zu den Aufwandsparmetern ist grundsätzlich zu begrüßen (Spalten Tabelle 14 mit Überschrift 1 und 2). Über alle Parameter hinweg liegt die Rangfolge gemäß Tabelle 16 auf Seite 95 vor. Am stärksten mit sTotex korreliert das Transportwurzelmoment, am stärksten mit Totex die Flächenparameter (yArea und yArea_all).

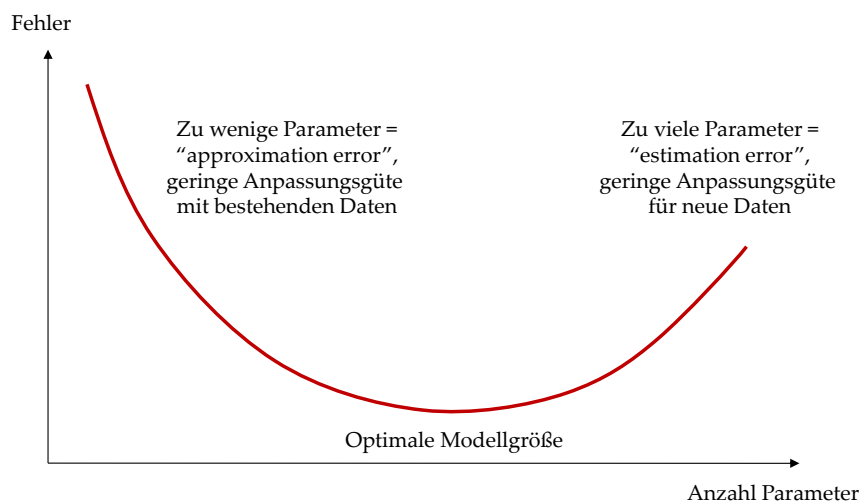
Aus Tabelle 14 geht ebenfalls hervor, dass die Vergleichsparameter untereinander stark korrelieren (grüne Felder ab der Spalte mit Überschrift 3). Diese teils ausgeprägte Korrelation der Parameter untereinander bedeutet, dass bei der Modellentwicklung und der Beurteilung des finalen Modells ein spezielles Augenmerk auf eine mögliche Multikollinearität gelegt werden muss (vgl. auch Fußnote 36).

³⁶ Wenn zwei Parameter sich sehr ähnlich sind, z.B. Ein- und Ausspeisung, dann kann es sein, dass eine Kombination dieser beiden Parameter, bei welcher einer mit negativem und der andere mit positivem Koeffizient aus der Schätzung hervorgeht, zusammen ein Muster ergeben, welches einen Teil der Varianz der erklärenden Variablen abbildet. Somit kann das Vorzeichen nicht mehr gedeutet werden und es liegt eine Überspezifikation vor. Eine Begrenzung der stark korrelierten Parameter verhindert ein solches Oszillieren, ebenfalls Techniken wie NNLS (vgl. Kapitel 4.2.1.4), da keine negativen Koeffizienten zugelassen werden.

5.3.3 Untersuchungen zur Modellgröße

Eine wesentliche Frage ist, wie viele Parameter das finale Modell aufweisen soll. Werden aus statistischer Sicht zu wenige Parameter verwendet, ist die Anpassungsgüte des Modells an die Daten zu gering. Ein Modell sollte aber auch nicht zu viele erklärende Variablen enthalten. Bei zu vielen Parametern steigt zwar die Anpassungsgüte laufend, jedoch ist dies zunehmend nur auf Zufall zurückzuführen und es wird das Risiko einer Fehlspezifikation erhöht. Das Modell könnte bei einer erneuten Anwendung mit zukünftigen Daten eine deutlich geringere Anpassungsgüte aufweisen, d.h. es müsste davon ausgegangen werden, dass sich das Modell in künftigen Regulierungsperioden nicht mehr eignet. **Abbildung 28** zeigt diesen Zusammenhang auf.

Abbildung 28: Illustration optimale Modellgröße



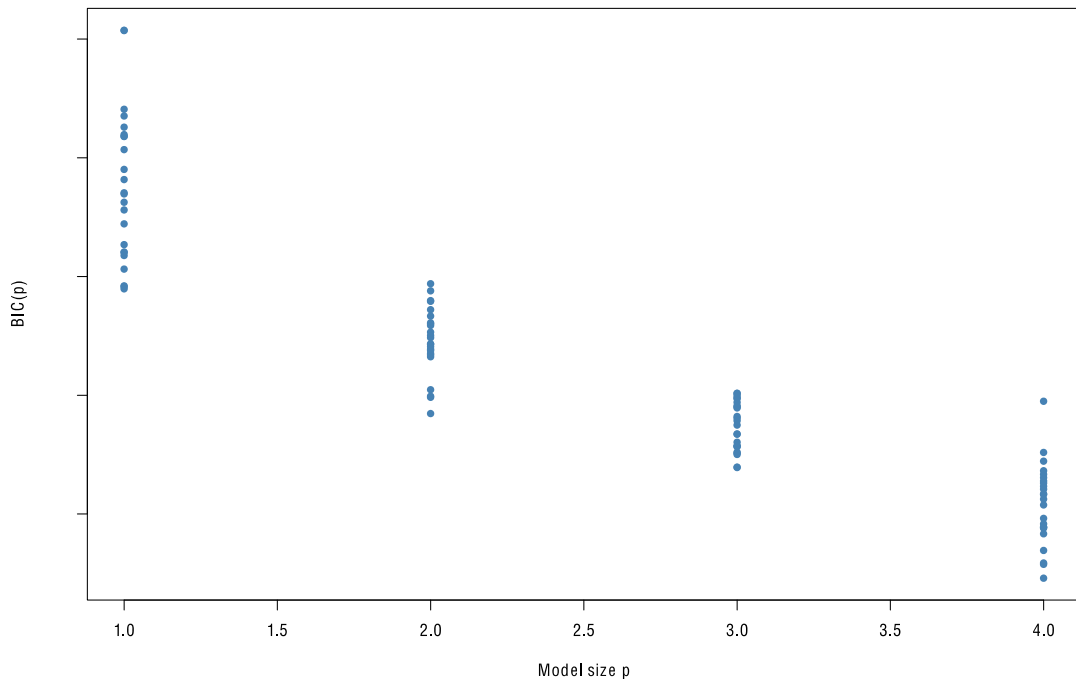
Quelle: EVS2

Zur Schätzung der optimalen Modellgröße wird das Bottom-up-Verfahren mit Durchschnittskostenmodellen verwendet (Details hierzu vgl. Abschnitt 5.4.1 nachfolgend).

Abbildung 29 zeigt, dass der Informationsgehalt der Bottom-up-Modelle grundsätzlich steigt (niedrigere BIC Werte), wenn ein zusätzlicher Parameter hinzugefügt wird. Jedoch gibt es bei 4-Parameter-Modellen viele Modelle, die entweder einen geringeren Informationsgehalt aufweisen oder in vielfacher Hinsicht den statistischen Kriterien nicht genügen (falsche Vorzeichen, insb. aber auch Multikollinearität. Modelle mit vier Parametern müssen daher ausreichend komplementär sein.³⁷ Modelle mit fünf Parametern kommen mit Blick auf die DEA aufgrund der Banker-Regel nicht in Frage (vgl. Abschnitt 5.5.1.3).

³⁷ Für Modelle mit vier Parametern gelten später bei der DEA strengere Kriterien hinsichtlich der zulässigen Anzahl Ausreißer (vgl. Abschnitt 5.5.1.3).

Abbildung 29: Optimale Anzahl Parameter – Auswertung BU-Modelle



Informationsgehalt BIC(p) von Modellen mit 1, 2, 3 und 4 Parametern (p)
 Quelle: Eigene Abbildung gestützt auf Parameterstand V11.

Aus konzeptioneller Sicht wurde in Abschnitt 4.2.2 dargelegt, dass die Vergrößerung der Zahl an Netzbetreibern im Datensatz allein keine Notwendigkeit begründet, das Modell um einen Vergleichsparameter zu erweitern – stattdessen sollte zunächst untersucht werden, ob die bisher gewählte Parameterzahl bei Anwendung der Kostentreiberanalyse auf eine größere Zahl von Fällen (=Netzbetreibern) zu plausiblen und sachgerechten Ergebnissen führt.

Dabei ist zu bedenken, dass durch die größere Zahl an Netzbetreibern im Grundsatz auch zusätzliche Ideen in die Betrachtung kommen können, wie das FNB-Geschäft effizienter abzuwickeln ist. Gerade neue Wettbewerber können durchaus neue (effizientere) Verfahren zur Anwendung bringen, die in einer aktualisierten Effizienzuntersuchung möglicherweise Veränderungen beim Effizienzwert von Unternehmen bewirken, die sich selbst ggü. der letzten Untersuchung gar nicht wesentlich verändert haben. Diese Überlegung begründet wesentlich, dass die schon in Kap. 4.2.2 nicht ausgeschlossene Ergebnisdiskontinuität aufgrund des von den FNB in die Diskussion gebrachten Anstiegs an Heterogenität u.U. weniger in einer erhöhten Vielfalt an erbrachten energiewirtschaftlichen Leistungen begründet ist, sondern möglicherweise mehr aus der Art und Weise resultiert, wie diese Leistungen erbracht werden.

Tatsächlich erklären im Datensatz verschiedene Parameter die Kosten in einem sehr hohen Maße, d.h. es stehen diverse Parameter zur Verfügung, welche die vorhandene Heterogenität grundsätzlich gut abzubilden vermögen. Dies deutet darauf hin, dass auch in der vorliegenden Untersuchung die Heterogenität im Datensatz mit einem dreidimensionalen Parametersatz durchaus abbildbar ist. Gleichzeitig eröffnet die Aufnahme eines vierten Parameters bei einem gegebenen Modell die Möglichkeit, zusätzliche komplementäre Aspekte abzubilden.

5.3.4 Zusammenfassung

Viele Parameter weisen eine gute Korrelation mit den Aufwandsparemtern auf. Viele dieser Parameter sind untereinander stark korreliert. Werden solche Parameter im gleichen Modell verwendet, können die resultierenden Koeffizienten möglicherweise nicht mehr direkt interpretiert werden bzw. bedingen eine Analyse der Kollinearität. Die Anwendung von Regressionen, bei denen für die Koeffizienten nur positive Werte zugelassen werden (NNLS, vgl. Abschnitt 5.4.1 nachfolgend), kann diese Problematik abmildern.

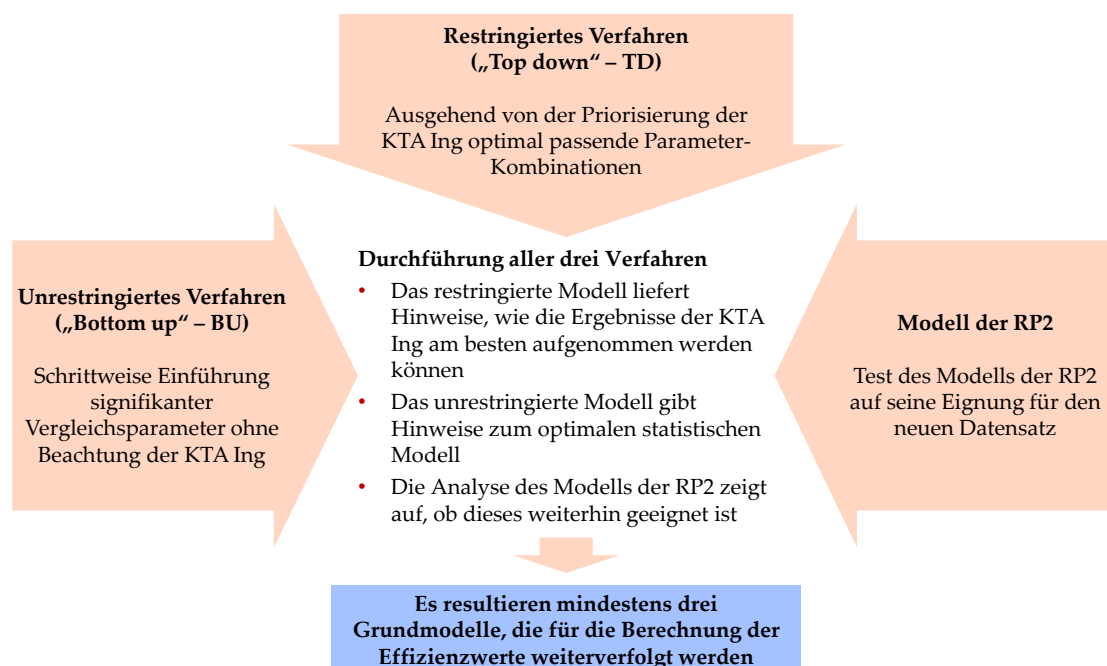
Hinsichtlich optimaler Modellgröße deuten die Analysen darauf hin, dass ein Modell mit drei Parametern die Heterogenität der Netzbetreiber bereits sehr gut abdecken kann. Gleichzeitig kann davon ausgegangen werden, dass sich der Informationsgehalt bei Modellen mit vier komplementären Parametern gegenüber Modellen mit drei Parametern noch erhöht.

5.4 Modellspezifikation: Herleitung von Grundmodellen

Die Phase der Modellspezifikation hat zum Ziel, stimmige Kombinationen von Parametern zu identifizieren, welche als Kostenfunktion der Netzbetreiber geeignet sind und den gesetzten konzeptionellen, statistischen und regulatorischen Gütekriterien gemäß Abschnitt 5.2 möglichst weitgehend entsprechen. Bei der Modellspezifikation werden die in **Abbildung 30** dargestellten drei Verfahren durchgeführt:

- **Top-down-Verfahren** zur Herleitung von Kostenfunktionen, welche die Ergebnisse der KTA Ing möglichst weitgehend aufnehmen;
- **Bottom-up-Verfahren**, um Grundmodelle mit möglichst hohem Informationsgehalt zu identifizieren;
- **RP2-Modell**: Eignung des Modelles der RP2 als Kostenfunktion für die neuen Daten.

Abbildung 30: Verfahren zur Herleitung der Grundmodelle



Quelle: Eigene Darstellung

Resultat hiervon sind mindestens drei Grundmodelle, welche im Rahmen der Schätzung der Effizienzgrenze untersucht und ggf. weiterentwickelt werden. Die in diesem Kapitel verwendeten Methoden werden später bei der Modellierung mit Hilfe der DEA und ggf. SFA genutzt, um zusätzliche Kostentreiber vorzuschlagen oder Kostentreiber zu identifizieren, welche weggelassen werden können. Ebenfalls wird das finale Modell betreffend seiner Eignung als Kostenfunktion validiert.

5.4.1 Methodisches

Durchschnittskostenmodelle inkl. Auffälligkeitsanalyse

Mit dem Ziel, ein möglichst aussagekräftiges, robustes Effizienzvergleichsmodell zu finden, welches sich nicht nur aus technischer Sicht als Effizienzgrenze eignet, sondern auch eine stimmige Kostenfunktion darstellt, werden wie einleitend dargestellt in der „Pre-run“ Phase verschiedene Modellkandidaten anhand der oben dargestellten drei Verfahren hergeleitet und auf ihre Eignung als Kostenfunktion geprüft. Zum einen sollen die dabei berücksichtigten Parameter aus analytischer Sicht möglichst aussagekräftig sein (vgl. auch Kriterien in Abschnitt 5.2), zum anderen sollen die nachfolgenden statistischen Kriterien möglichst gut erfüllt sein. Methodisch kommen hierzu Durchschnittskostenmodelle³⁸ zum Einsatz.

- Modellgüte / Anpassungsgüte:³⁹
 - Bayessches Informationskriterium (BIC) minimiert für eine vorgegebene Modellgröße;
 - Mallows' Cp (minimiert für Modellgröße);
 - Adjustiertes Bestimmtheitsmaß (adjusted R2);
- Erwartete Vorzeichen und Signifikanz der Parameter: $p < 0.05$;⁴⁰
- Keine Multikollinearität:⁴¹
 - Belsley Test: condition index < 30 ;
 - VIF (variance inflation factors) < 10 ;
- Homoskedastizität / keine Heteroskedastizität: Breusch–Pagan-Test: $p \geq 0.05$;⁴²

³⁸ Ein Durchschnittskostenmodell wird verwendet, um die erwarteten durchschnittlichen Kosten (Totex) abzuschätzen. Demgegenüber steht in SFA und DEA die Identifikation von Best-practice bzw. von Effizienzgrenzen im Vordergrund. Durchschnittskostenmodelle können zur Validierung von geschätzten Effizienzgrenzen dienen, dies insbesondere, wenn diese mittels DEA bestimmt werden.

³⁹ Die Informationskriterien geben einen Anhaltspunkt darüber, ob die Nachteile von weiteren Parametern durch die zusätzliche Information wettgemacht werden. Das Bestimmtheitsmaß gibt Auskunft darüber, in welchem Ausmaß die unabhängigen Variablen (Vergleichsparameter) die abhängige Variable (Aufwandsparameter) erklären. Bei diesen beiden Kriterien werden im Gegensatz zu den übrigen Kriterien keine Grenzwerte vorgegeben. Sie dienen dazu, die Informations- und Anpassungsgüte einer Modellspezifikation im Vergleich zu alternativen Spezifikationen zu beurteilen. Die beiden Kriterien sind somit relativ zu sehen und werden minimiert bzw. maximiert, weshalb sich ein Grenzwert erübrigt.

⁴⁰ Bezüglich der Hypothese, dass ein Parameter signifikant von Null abweicht, darf demnach die Irrtumswahrscheinlichkeit nicht gleich oder höher als 5% sein.

⁴¹ Die beiden Maße zeigen, wie stark die errechnete Varianz eines Koeffizienten durch Kollinearität erhöht ist. Liegt der Wert über den Schwellenwerten, ist dies ein Hinweis auf Multikollinearität.

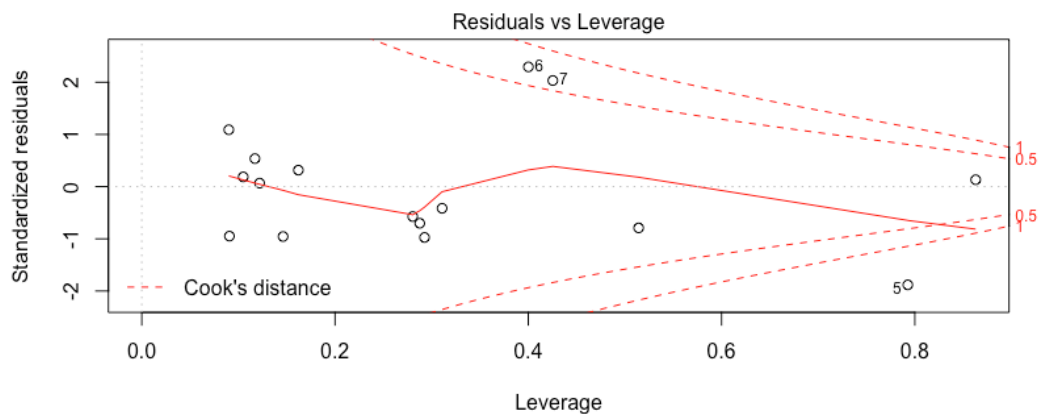
⁴² Es wird getestet, ob die Varianz der Residuen größenabhängig ist (vorliegend also „kostenabhängig“). Die Nullhypothese (Homoskedastizität bzw. Varianz der Residuen nicht größenabhängig) muss verworfen werden, wenn $p < 0.05$.

- Robustheit gegenüber einzelnen Beobachtungen: Signifikanz mit ROLS: $p < 0.05$ (vgl. Ausführung nachfolgend).

Ein gutes Modell erklärt demnach die Kosten gut, weist möglichst signifikante Parameter auf und ist frei von Multikollinearität und Heteroskedastizität. Ebenso ist es robust, d.h. es wird nicht durch einzelne Netzbetreiber übermäßig beeinflusst. Dies bedeutet, dass ein einzelner FNB die Lage der Kostenfunktion als Gesamtes nicht zu stark dominieren soll. Dies wird vorerst anhand einer „Auffälligkeitsanalyse“ mittels robuster Regressionen (ROLS) sichergestellt (in Abgrenzung zur Ausreißeranalyse im Rahmen der Schätzung der Effizienzgrenze, bei welcher der direkte Einfluss eines FNB auf die Effizienzwerte der übrigen FNB im Vordergrund steht, vgl. Abschnitt 5.5.1.2). Die Auffälligkeitsanalyse wird bei den Top-down und Bottom-up-Verfahren systematisch integriert, indem nach jeder Regression automatisch auch eine robuste Regression durchgeführt wird. Dabei ist zu beachten, dass sich bei diesen iterativen Verfahren der Status eines einzelnen FNB oder Parameters in der robusten Regression ändern kann: Durch die Berücksichtigung eines weiteren Parameters kann beispielsweise ein zuvor in der robusten Regression als auffällig eingestuftes FNB wieder als unauffällig bzw. „normal“ erscheinen. Auffällige FNB werden daher nie per se ausgeschlossen, sondern bei der nächsten Iteration wiederum berücksichtigt.

Abbildung 31 zeigt die im Rahmen der Auffälligkeitsanalyse zulässigen Schwellenwerte der Cook's Distance (gestrichelt) für sTotex. Das Residuum der Schätzung⁴³ befindet sich auf der vertikalen Achse und ein Größenmaß („Leverage“) auf der horizontalen Achse. Idealerweise wäre die Abweichung des Residuums (gezogene Linie) möglichst flach, was bedeuten würde, dass die Schätzung keine Verzerrung enthält und alle Beobachtungen innerhalb der Schwellenwerte liegen. Im abgebildeten Spezialfall liegen die Beobachtungen 5, 6 und 7 außerhalb der Grenze und beeinflussen somit die getestete Kostenfunktion übermäßig. Daraus kann jedoch nicht gefolgert werden, dass diese Beobachtungen auch in alternativen Kostenfunktionen als Ausreißer auffallen würden oder gar generell als Ausreißer zu klassieren sind. Das Resultat bedeutet lediglich, dass dieses konkrete Modell noch nicht im Rahmen einer einfachen OLS-Schätzung gerechtfertigt werden kann und die Resultate der robusten Regression herangezogen werden müssen.

Abbildung 31: Beispiel Ökonometrische Ausreißeranalyse

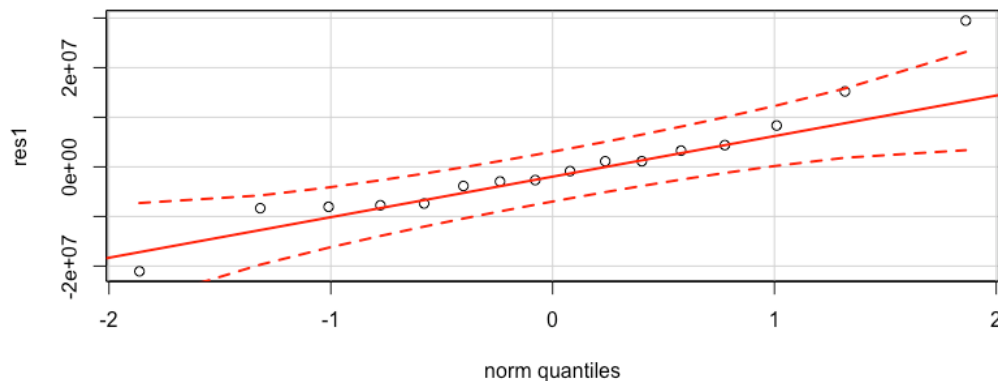


Quelle: Eigene Abbildung. Es werden die FNB 5, 6 und 7 als Ausreißer identifiziert.

⁴³ Differenz von realisiertem und von der Schätzung prognostiziertem Wert des Aufwandsparameters.

Durchschnittskostenmodelle vermögen nicht zwischen Fehlerterm und Ineffizienz zu unterscheiden. Falls die Ineffizienz in einem Sektor groß ist, würde sich dies in einer asymmetrischen Verteilung der Residuen zeigen, da die Ineffizienz definitionsgemäß einseitig ist (alle Einheiten liegen innerhalb des Produktionsraumes, aber nie außerhalb). Als Folge davon könnten bei der OLS-Schätzung die Koeffizienten der Parameter verzerrt sein. Um dies zu überprüfen, wird das Residuum auf Asymmetrie und Normalität getestet. Hierfür kommen der Shapiro-Wilk-Test (Normalverteilung), der D'Agostino Test (Schiefe) und eine graphische Überprüfung zum Einsatz. Konkret sollten die Residuen in **Abbildung 32** innerhalb der statistischen Schwellenwerte (gestrichelt) liegen. Dies ist im Beispiel für alle Beobachtungen außer einem Ausreißer der Fall. Alle finalen Modelle bestehen diesen Test, was nicht selbstverständlich ist. Dies kann mit einem relativ geringen Anteil an Ineffizienz im Datensatz und mit einer stark linearen Technologie erklärt werden.

Abbildung 32: Beispiel Test für Schiefe und Normalverteilung der Residuen



Quelle: Eigene Abbildung. Im Beispiel ist der Test bestanden (ein Ausreißer).

Bottom-up-Verfahren

Beim Bottom-up-Verfahren werden statistisch möglichst optimale Parameterkombinationen zur Erklärung der Kosten weitgehend losgelöst von analytischen Überlegungen gesucht. Hintergrund ist das Vorsichtsprinzip in dem Sinn, dass auch bei etwaig falschen vorgängigen analytischen Überlegungen Modelle und Parameter getestet werden, welche die Kosten im Sinne der Netzbetreiber möglichst gut erklären.

Das Bottom-up-Verfahren wird ausgehend von besonders gut mit den Kosten korrelierten Parametern gestartet (Details vgl. nachfolgend Abschnitt 5.4.3). Für jeden Startparameter wird je Aufwandsparemeter für eine vorgegebene Modellgröße (1 bis 4 Parameter) das Modell mit dem höchsten Informationsgehalt gesucht, wobei Kombinationen aus allen möglichen verfügbaren Parametern zugelassen sind unabhängig von der zugehörigen Gruppe oder der ingenieurwissenschaftlichen Relevanz. Als Resultat liegt für jeden Startparameter und Modellgröße eine Liste von Modellen vor, die nach Informationskriterium (BIC), Signifikanz und Vorzeichen der Parameter in OLS und ROLS, Heteroskedastizität, Ausreißern und Multikollinearität gefiltert werden können (im Hintergrund zudem Verteilungstests). Bei diesem Verfahren stehen nicht berücksichtigte Parameter sowohl bei neuen Startparametern als auch bei einer neuen Modellgröße stets wieder zur Verfügung. Die Resultate des Bottom-up-Verfahrens bilden somit je Modellgröße die oberen Schranken der mit dem Datensatz erreichbaren statistischen Qualität ab.

Top-down-Verfahren

Im Gegensatz zum Bottom-up-Verfahren stehen beim Top-down-Verfahren analytische Überlegungen im Vordergrund. Ausgangspunkt hierfür ist die Einschätzung der Vergleichsparameter gemäß der KTA Ing (Tabelle 11).

Die Modelle werden jeweils um die am geeignetsten eingestuft Parameter entwickelt (d.h. Transportwurzelmoment, Rohrmantelfläche). Für jeden Startparameter wird danach von der Teilmenge der Parameter mit zweitbesten Eignung („komplementäre Eignung“) der beste passende Kandidat gesucht. Die resultierenden Modelle werden auf Signifikanz, Vorzeichen usw. geprüft, wobei ein zweiter Parameter nicht das Vorzeichen des primären Startparameters ändern darf. Mit Blick auf die DEA, die nur positive Vorzeichen für die verwendeten Kostentreiber zulässt, wird im Falle negativer Vorzeichen eines weiteren Parameters zudem eine restriktierte Regression durchgeführt, welche für die einzelnen Parameter nur positive Vorzeichen zulassen (sog. NNLS für „Non-Negative Least Squares“). Bei Nicht-Signifikanz wird das Modell entsprechend getrimmt. Dies bringt zwei Vorteile: Einerseits wird der erwähnten Einschränkung der DEA Rechnung getragen, andererseits kann die Multikollinearität begrenzt werden, indem ein gegenseitiges Oszillieren von Parametern verhindert wird. Wenn alle Tests bestanden sind, wird das potenzielle Modell behalten und es wird erneut getestet, ob es passende Ergänzungen gibt, wobei auch Parameter der dritten Gruppe zugelassen werden („partielle Eignung“). Die Prozedur wird fortgesetzt bis entweder die maximale Modellgröße erreicht ist oder es keine gute Ergänzung mehr gibt.

Das Verfahren resultiert je Startparameter in einer Liste von Modellen inklusive zugehöriger statistischer Tests analog dem Bottom-up-Verfahren.

5.4.2 Analyse Modell RP2

In einem ersten Schritt wird das Modell der RP2 als Benchmark im Rahmen der Durchschnittskostenmodelle untersucht (Rohrvolumen, Fläche, Anschlusspunkte). Dabei kommen grundsätzlich beide Flächenparameter y_{Area} und y_{Area_all} in Frage. Beide Modelle weisen je einen Ausreißer bei s_{Totex} und $Totex$ auf, erfüllen die relevanten statistischen Tests und haben somit gute statistische Eigenschaften. Im direkten Vergleich besitzen die Varianten mit y_{Area} den etwas besseren Informationsgehalt. D.h. die Spezifikation des RP2 Modells mit y_{Area} ist aus statistischer Sicht zunächst vorzuziehen. Eine marginale Verbesserung des BIC würde bei der Variante mit y_{Area} der Austausch von y_{Points_num} durch die Ausspeisepunkte $y_{Points_exit_num}$ bringen.

Das Modell der RP2 in **Tabelle 15** ist somit grundsätzlich weiterhin als Kostenfunktion geeignet und wird daher als Grundmodell für die Weiterentwicklung des Effizienzvergleichsmodells in Abschnitt 5.5 weiterverfolgt. Dabei werden insbesondere auch Varianten mit nur Ausspeisepunkten geprüft.

Tabelle 15: Grundmodell aus der RP2

ID	Parameter 1	Parameter 2	Parameter 3	BIC(T)	BIC(sT)
RP2	$y_{Pipevolume}$	y_{Area}	y_{Points_num}	580.8	583.3
	$y_{Pipevolume}$	y_{Area}	$y_{Points_exit_num}$	580.5	583.0
	$y_{Pipevolume}$	y_{Area_all}	$y_{Points_exit_num}$	582.8	585.4
	$y_{Pipevolume}$	y_{Area_all}	y_{Points_num}	583.1	585.7

Quelle: Eigene Darstellung

5.4.3 Resultate Bottom-up-Verfahren

Im Rahmen der Konsultation wurde gefordert, das Bottom-up-Verfahren mit den am höchsten mit den Kosten korrelierten Variablen durchzuführen, was nachfolgend umgesetzt wird. **Tabelle 16** zeigt die Parameter, welche eine Korrelation von über 90% aufweisen in der Reihenfolge ihrer Korrelation mit sTotex (dazu yPoints_num). Das Bottom-up-Verfahren wird für die wichtigsten Gruppen jeweils mit dem Parameter gestartet, der am stärksten mit den Kosten korreliert.⁴⁴ Insgesamt wird das Bottom-up-Verfahren somit ausgehend von zwölf unterschiedlichen Parametern gestartet (in der Tabelle fett und kursiv hervorgehoben).

Tabelle 16: Rangierung der Parameter nach Korrelation zu sTotex

Parameter	Korrelation sTotex	Korrelation Totex
<i>yTransportmomWurzel_Qmax_RD</i>	0.982	0.984
<i>yArea_all</i>	0.980	0.985
yArea	0.979	0.985
<i>yPeakload_injec_Qmax</i>	0.978	0.977
<i>yTransportmomAreaRoot_Qmax_LD</i>	0.977	0.984
<i>yPipevolume</i>	0.971	0.964
yPeakload_deliv_Qmax	0.967	0.972
yPeakload_deliv_simult	0.962	0.966
<i>yPipesurface</i>	0.960	0.951
zSoil_BK0267V02	0.959	0.952
yPeakload_injec_simult	0.959	0.961
zSoil_BK567M02	0.945	0.934
yTransportmomArea_Qmax_LD	0.942	0.949
<i>yEnergy_injected_Qyear</i>	0.935	0.945
yTransportV_abs_Qyear	0.934	0.931
zSoil_GB0378V02	0.931	0.921
<i>yPipelength</i>	0.931	0.915
zSoil_BK567V02	0.929	0.922
<i>yTransportV_abs_Qmax</i>	0.926	0.921
zSoil_BK4567V02	0.920	0.905
zSoil_BK4567M02	0.911	0.894
<i>yCompressor_ener_used</i>	0.907	0.920
<i>yTransportmom_Qmax_RD</i>	0.900	0.913
...		
<i>yPoints_num</i>	0.749	0.733

Quelle: Eigene Darstellung

⁴⁴ Bei der Gruppe Anschlüsse wird mit dem Parameter der RP2 gestartet. Bei der Rohrgeometrie werden zudem die Rohrmantelfläche und die Leitungslänge berücksichtigt.

Das Verfahren wird je Eingangsparameter jeweils einmal hinsichtlich sTotex und einmal hinsichtlich Totex optimiert. In **Tabelle 17** sind die Resultate für die sTotex Optimierung wiedergegeben.⁴⁵ Die letzte Spalte gibt an, ob die gefundene Spezifikation den in Kapitel 5.4.1 genannten statistischen Kriterien genügt (Y=Ja, N=Nein).

Tabelle 17: Resultatübersicht Bottom-up-Verfahren (sortiert nach BIC sTotex)

#Par	Eingangsparameter, resultierende Ergänzungen	BIC (sT)	BIC (T)	Stats ok?
4	yTransportmomWurzel_Qmax_RD, yPoints_entry_num, yTransportH_abs_Qmax, yCompressor_power_sum	553.8	575.8	Y
4	yEnergy_injected_Qyear, yArea, yCompressor_power_sum, zSoil_BK4567M02	557.4	573.3	(Y)
4	yArea_all, yEnergy_injected_Qyear, yCompressor_num, zSoil_BK4567M02	559.3	575.7	(Y)
4	yPipevolume, yArea, yBranches_exklNKPCustomer_num, yGasmixture_sum_corr	560.4	568.3	N
4	yPoints_num, yEnergy_delivered_Qyear, yArea, zSoil_BK4567M02	561.7	570.1	(Y)
4	yTransportmomAreaRoot_Qmax_LD, yCompressor_num, zSoil_BK4567V02, zSoil_GB0378V02	561.8	571.2	N
4	yPipelength, yTransportmom_Qmax_RD, yTransportmom_Qmax_LD, yCompressor_power_sum	562.1	577.1	N
4	yCompressor_ener_used, yPipelength, yPipevolume, yEnergy_delivered_Qyear	565.7	580.7	N
4	yPeakload_injec_simult, yArea, zSoil_BK4567V02, zSoil_BK567V02	565.8	574.8	N
4	yTransportV_abs_Qmax, yPoints_num, yTransportmomWurzel_Qmax_RD, yCompressor_num	566.1	583.1	Y
4	yPipesurface, yPipevolume, yEnergy_injected_Qyear, yCompressor_power_sum	567.6	579.1	N
3	yEnergy_injected_Qyear, yArea, zSoil_BK4567M02	569.9	572.1	Y
3	yArea_all, yEnergy_delivered_Qyear, zSoil_BK4567V0	570.0	575.9	Y

Quelle: Eigene Darstellung

Aus der Tabelle geht hervor, dass das hinsichtlich Informationsgehalt BIC beste Modell, hergeleitet ausgehend vom Transportwurzelmoment, die übrigen statistischen Kriterien besteht, also die Parameter insb. in der robusten Regression die erwarteten Vorzeichen aufweisen und auch die übrigen Kriterien erfüllen. Das Modell mit Eingangsparameter „vertikale Last“ (yTransportV_abs_Qmax) genügt ebenfalls allen statistischen Kriterien. Da es nahe am Modell mit

⁴⁵ Bei der Optimierung hinsichtlich Totex sind diesbezüglich alle Modelle ungenügend ausgefallen und daher nachfolgend nicht aufgeführt. Die hinsichtlich BIC besten Modelle sind anders als bei der sTotex-Optimierung stark durch den zusammengesetzten Parameter Wurzel Transportmomentfläche und seine Komponenten Fläche und Transportmoment getrieben. Eine Detailanalyse dieser Modelle ergibt mit einer Ausnahme Probleme mit Multikollinearität sowie Nicht-Signifikanz einiger Parameter in der (robusten) Regression. So ist z.B. beim hinsichtlich BIC besten Modell mit yTransportmomAreaRoot_Qmax_LD der Parameter yMeshes_num nicht robust. Wird die Anzahl Maschen weggelassen, wird im Modell die Rohrmantelfläche als Parameter negativ. Das einzige Modell bei der Totex-Optimierung, welche alle statistischen Test besteht ist ein 3-Parameter-Modell mit yPoints_num, yTransportmomAreaRoot_Qmax_LD und yTransportV_abs_Qmax. Seine BIC Werte sind mit 583 bei sTotex bzw. 571 bei Totex vergleichsweise hoch. Zudem ist der Parameter Wurzel Transportmomentfläche mit Problemen behaftet (vgl. Abschnitt 4.3.1.10), weshalb das Modell nicht weiterverfolgt wird.

Transportwurzelmoment liegt (gleiche Gruppen), wird nur dieses zur weiteren Analyse ausgewählt, jedoch bei dessen Weiterentwicklung im Rahmen vom Kapitel 5.5.2 entsprechende Anpassungen geprüft. Die drei mit (Y) bewerteten Modelle ausgehend von Jahresarbeit, Fläche und Anschlusspunkten schlagen jeweils bei der Totex-Validierung fehl (in robuster Regression insignifikante Parameter, dazu falsche Vorzeichen; im Übrigen Multikollinearität). Die beiden 3-Parameter-Modelle ausgehend von der Jahresarbeit bzw. der Fläche sind nahezu deckungsgleich und sind gegenüber ihren Versionen mit 4 Parametern vorzuziehen, da letztere drei Ausreißer und eine stärkere Multikollinearität aufweisen. Für die weiteren Analysen wird daher das Modell ausgehend von yEnergy_injected_Qyear aufgrund seines besseren Informationsgehalts ausgewählt.

Gestützt auf das Bottom-up-Verfahren werden bei der Entwicklung des Effizienzvergleichsmodells in Abschnitt 5.5 daher die in **Tabelle 18** angegebenen Grundmodelle weiterverfolgt.

Tabelle 18: Grundmodelle aus dem Bottom-up-Verfahren

ID	Parameter 1	Parameter 2	Parameter 3	Parameter 4	BIC(sT)	BIC(T)
BU1	yTWM	yPoints_entry_num	yTransportH_abs_Qmax	yCompressor_power	553.8	575.8
BU2	yArea	yEnergy_injected	zSoil_BK4567M02		569.9	572.1

Quelle: Eigene Darstellung

5.4.4 Resultate Top-down-Verfahren

Tabelle 19 fasst die Resultate des restringierten Top-down-Verfahrens zusammen.

Tabelle 19: Resultate Top-down-Verfahren (sortiert nach BIC sTotex)

#Par.	Eingangsparameter, resultierende Ergänzungen	BIC(sT)	BIC (T)
4	yPipesurface, yCompressor_power_sum, yPoints_entry_num, yEnergy_inj_Qyear	580	591
4	yTransportmomWurzel_Qmax_RD, yArea_all, yPoints_exit_num, zGeo_DGM_R.	581	577
3	yPipesurface, yCompressor_power_sum, yPoints_entry_num	583	595
3	yTransportmomWurzel_Qmax_RD, yArea_all, yPoints_exit_num	587	580
2	yPipesurface, yCompressor_power_sum	591	598
2	yTransportmomWurzel_Qmax_RD, yArea_all	596	588

Quelle: Eigene Darstellung

Die Resultate zeigen, dass die Modelle mit dem neu gebildeten Parameter Transportwurzelmoment bei sTotex von dessen stärker endogenen Entsprechung Rohrmantelfläche leicht dominiert werden, während umgekehrt die Modelle mit Transportwurzelmoment bei Totex den klar besseren Informationsgehalt aufweisen. Im Vergleich zu den Bottom-up-Modellen haben die obigen Modelle, die auf der ingenieurwissenschaftlichen Beurteilung der Einzelparameter aufbauen, einen etwas geringeren Informationsgehalt (höhere BIC-Werte), weisen jedoch bessere sonstige Eigenschaften auf (t-Werte der Parameter, Vorzeichen, Robustheit, Ausreißer, Multikollinearität, Heteroskedastizität, Konsistenz). Zu begrüßen ist, dass die Verdichterleistung als Komplement der Rohrmantelfläche erscheint, nicht aber beim Transportwurzelmoment (vgl. hierzu Ausführungen in Abschnitt 4.3.1.6).

Gestützt auf das Top-down-Verfahren werden bei der Entwicklung des Effizienzvergleichsmodells in Abschnitt 5.5 die in **Tabelle 20** angegebenen Grundmodelle weiterverfolgt. Da das Mo-

dell mit TWM über beide Aufwandsparameter gute BIC-Werte aufweist und zudem aus konzeptioneller Sicht bedeutend besser ist (u.a. fehlende Ausspeisepunkte und Fläche beim Modell mit Mantelfläche), wird dieses als TD1 geführt. Bei beiden Varianten wird später eine Variante mit drei Parametern geprüft, da sich durch die Hinzunahme des vierten Parameters die jeweiligen BIC-Werte nur geringfügig reduzieren.

Tabelle 20: Grundmodelle aus dem Top-down-Verfahren

ID	Parameter 1	Parameter 2	Parameter 3	Parameter 4	BIC(sT)	BIC(T)
TD1	yTWM	yArea_all	yPoints_exit_num	zGeo_DGM_RANGE	581	577
TD2	yPipesurface	yCompressor_power	yPoints_entry_num	yEnergy_injected_Qyear	580	591

Quelle: Eigene Darstellung

5.5 Schätzung der Effizienzgrenze

Die Arbeiten zur Schätzung und Validierung der Effizienzgrenze resultieren im finalen Modell für den Effizienzvergleich. Im Resultat soll ein Modell gefunden werden, welches den in Abschnitt 5.2 angegebenen konzeptionellen, statistischen und regulatorischen Kriterien möglichst weitgehend entspricht. Folgende Schritte werden durchgeführt:

- Schätzung von DEA und ggf. SFA inkl. Ausreißer- und Second-Stage-Analysen für die Grundmodelle sowie Weiterentwicklungen hiervon;
- Zur Beurteilung von möglichen Weiterentwicklungen der Grundmodelle und Sichtung möglicherweise bis hierhin noch nicht identifizierter Modelle strukturierte Auswertung von Permutationen von Modellen mit 3 bzw. 4 Parametern;
- Gegenüberstellung der besten Modelle;
- Detailspezifikation des gewählten Modells inkl. Darstellung detaillierter Resultate, Peer- und Ausreißeranalysen sowie Validierung als Kostenfunktion.

5.5.1 Methodisches

5.5.1.1 Anwendbarkeit SFA und DEA

Gemäß Anlage 3 zu § 12 ARegV sollen die beiden Methoden SFA und DEA angewendet werden (Details vgl. Abschnitt 2.2). Für die SFA sieht § 22 ARegV explizit vor, dass diese nur dann anzuwenden ist, falls ausreichend Daten vorhanden sind.

Die SFA ist im vorliegenden Datensatz mit 16 Vergleichsunternehmen nicht anwendbar. Dies zeigen verschiedenste Versuche, solche Funktionen zu schätzen. Konkret konvergieren Schätzungen meistens nicht, oder bei Konvergenz resultieren unplausible Werte. Das zugrundeliegende Problem ist, dass die Anzahl Beobachtungen zu klein ist, um einerseits die Parameter in linearen, log-linearen oder trans-log Kostenfunktionen zu schätzen, und andererseits auch den relativen Einfluss von Störterm und Ineffizienzen einzukalkulieren.

Gemäß Anlage 3 zu § 12 ARegV wird die DEA mit konstanten Skalenerträgen geschätzt (CRS). Eine DEA mit 16 Unternehmen weist gegenüber der SFA keine Konvergenz-Probleme auf. Die lineare Optimierung konvergiert in einer endlichen Anzahl von Schritten. Es existieren auch hier Faustregeln über die notwendige Datenmenge in einem DEA Modell, z.B. dass die Anzahl Beobachtungen mindestens drei Mal der Anzahl Inputfaktoren plus Outputfaktoren entsprechen sollte (vgl. Abschnitt 5.5.1.3 nachfolgend). Diese Faustregeln dienen jedoch mehr dazu sicherzustellen, dass das DEA-Modell die Ineffizienz nicht unterschätzt. Wird wie vorliegend das Vorsichtsprinzip im Sinne der Netzbetreiber angewendet, relativiert sich diese Anforderung.

5.5.1.2 Identifikation von Ausreißern in der DEA

Gemäß Anlage 3 zu §12 ARegV gilt bei der nicht-parametrischen Methode DEA „ein Wert dann als Ausreißer, wenn er für einen überwiegenden Teil des Datensatzes als Effizienzmaßstab gelten würde. Zur Ermittlung von Ausreißern sind statistische Tests durchzuführen. Dabei ist die mittlere Effizienz aller Netzbetreiber einschließlich der potenziellen Ausreißer mit der mittleren Effizienz der Netzbetreiber zu vergleichen, die sich bei Ausschluss der potenziellen Ausreißer ergeben würde [**Dominanz**]. Der dabei festgestellte Unterschied ist mit einer Vertrauenswahrscheinlichkeit von mindestens 95 Prozent zu identifizieren. Die auf diese Weise festgestellten Ausreißer sind aus dem Datensatz zu entfernen. Ergänzend ist eine Analyse der **Supereffizienzwerte** durchzuführen. Dabei sind diejenigen Ausreißer aus dem Datensatz zu entfernen,

deren Effizienzwerte den oberen Quartilswert um mehr als den 1.5-fachen Quartilsabstand übersteigen. Der Quartilsabstand ist dabei definiert als die Spannweite der zentralen 50 Prozent eines Datensatzes.“

Die Dominanz im Sinne einer Abschätzung des Einflusses von FNB i auf die durchschnittliche Effizienz E wird anhand nachfolgender Formel berechnet:

$$\frac{\sum_{k \in I \setminus i} (E(k; I \setminus i) - 1)^2}{\sum_{k \in I \setminus i} (E(k; I) - 1)^2}$$

Der Datensatz I besteht aus n FNB, und i ist ein potentieller Ausreißer. $E(k, I)$ ist die Effizienz von FNB k , wenn im Vergleich alle FNB verwendet werden und $E(k, I \setminus i)$ ist die Effizienz von k wenn der FNB i nicht berücksichtigt wird. Niedrige Werte aus dieser Formel (evaluiert mit einer $F(n-1, n-1)$ Verteilung, vgl. Banker, 1996 oder Bogetoft & Otto, 2011) indizieren, dass FNB i ein Ausreißer ist. Die kumulierte Effizienz im Vergleich ohne i im Zähler ist dann deutlich niedriger als die kumulierte Effizienz im Vergleich mit i im Nenner.

Zur Berechnung der Supereffizienz gilt FNB i als supereffizient, falls:

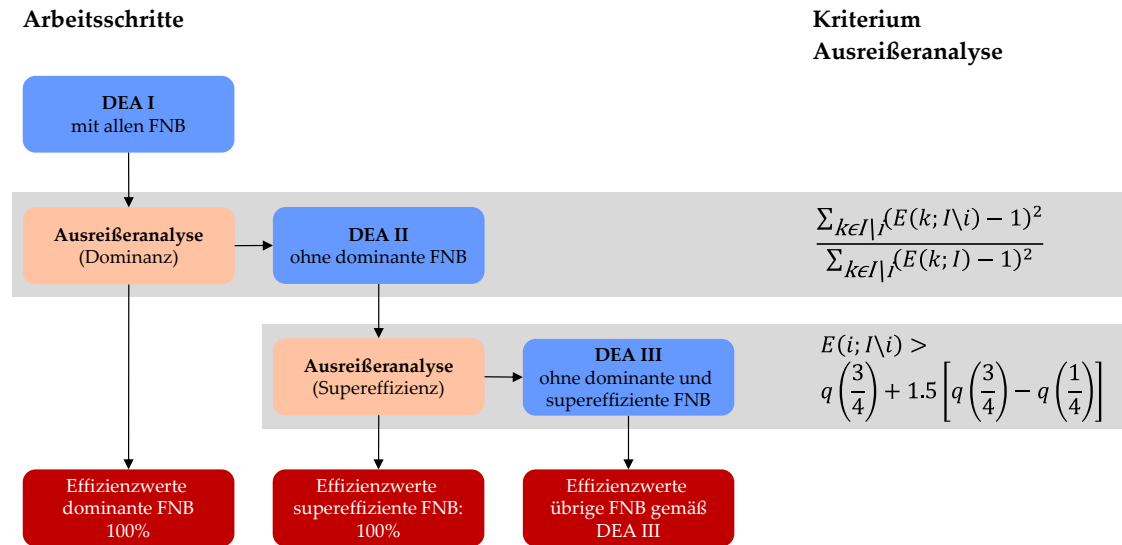
$$E(i; I \setminus i) > q(0.75) + 1.5[q(0.75) - q(0.25)]$$

$E(i, I \setminus i)$ ist die Effizienz von FNB i , wenn FNB i nicht in der DEA berücksichtigt wird und das Resultat dieser DEA auf i angewendet wird. Dieser Wert wird für alle FNB berechnet. Danach werden die Quartilswerte⁴⁶ $q(0.25)$ und $q(0.75)$ mit $E(i, I \setminus i) > 1$ bestimmt. FNB i gilt als Ausreißer, falls $E(i, I \setminus i)$ größer ist als die Summe des oberen Quartilswert $q(0.75)$ und dem 1.5-fachen Quartilsabstand, welcher durch die 50% der FNB, die in der Mitte der Effizienzwertverteilung liegen, aufgespannt wird ($q(0.75) - q(0.25)$). Die Kriterien werden wie in den vergangenen Effizienzvergleichen (FNB, VNB Gas und Strom) angewendet und stützen sich direkt auf die ARegV.

Das Vorgehen mit den angewendeten Kriterien ist in **Abbildung 33** dargestellt. Demnach erfolgt in Anlehnung an die ARegV zuerst die Dominanzanalyse. Hierfür wird eine erste DEA berechnet und der oben beschriebene Dominanztest durchgeführt. Eventuell so identifizierten „dominanten“ Ausreißern wird ein Effizienzwert von 100% zugewiesen. Danach erfolgt eine weitere DEA-Iteration ohne Berücksichtigung der dominanten FNB, welche als Grundlage zur Berechnung der Supereffizienz angewendet wird. FNB, welche als „super-effiziente“ Ausreißer identifiziert werden, erhalten wiederum einen Wert von 100%. Für die noch verbleibenden FNB (also alle nicht-Ausreißer) wird eine dritte DEA berechnet und die Effizienzwerte entsprechend zugewiesen. Dieses ARegV-basierte Vorgehen entspricht der Best Practice (vgl. z.B. Agrell und Niknazar, 2014).

⁴⁶ Aufgrund der kleinen Stichprobe wird für das finale Modell zudem untersucht, ob dieses robust gegenüber alternativer Methoden der Quantilsbestimmung ist.

Abbildung 33: Ausreißeranalyse in der DEA



Quelle: Eigene Darstellung

5.5.1.3 Anzahl zulässiger Ausreißer in der DEA

Aufgrund der eher geringen Anzahl von 16 Vergleichsunternehmen im vorliegenden Datensatz spielt die Anzahl der Ausreißer eine besondere Rolle. Aufgrund der iterativen Eliminierung von dominanten und supereffizienten Unternehmen (gemäß **Abbildung 33**) besteht ein inhärenter Zusammenhang mit der Anzahl der Parameter: Wenn beispielsweise drei Ausreißer vorliegen, wird die letzte DEA (DEA III) nunmehr mit 13 statt ursprünglich 16 Unternehmen durchgeführt. Die Anzahl der zulässigen Parameter ergibt sich damit modellspezifisch je nach Ausreißersituation, wobei jeweils die DEA III entscheidend ist.

Faustregeln zur maximalen Anzahl von Ausreißern

Als (generöse) Standardregel kann folgende Faustregel angewendet werden (Banker et al., 1989):

$$3 \cdot (1 + \# \text{Output-Parameter}) < \# \text{Beobachtungen}$$

Im vorliegenden Fall wird die Regel für die DEAIII zu:

$$3 \cdot (1 + \# \text{Output-Parameter}) < \# \text{Beobachtungen} - \# \text{AusreißerDEAI} - \# \text{AusreißerDEAII}$$

Dies führt bei 16 Netzbetreibern für eine gegebene Modellgröße zu folgenden maximal zulässigen Anzahl von Ausreißern:

- Modelle mit drei Parametern: Maximal drei Ausreißer, bzw. vier Ausreißer wenn die Schwelle gerade noch zugelassen wird (also die obige Gleichung statt „<“ mit „≤“);
- Modelle mit vier Parametern: Kein Ausreißer, bzw. ein Ausreißer.

Ein Blick auf das Modell der RP2 zeigt, dass damals 13 Beobachtungen zu zwei Ausreißern in Totex und einem Ausreißer in sTotex führten (gesamthaft waren zwei Unternehmen Ausreißer). Somit war das oben aufgeführte Kriterium damals in der DEAIII für Totex nicht erfüllt ($3 \cdot (1 + 3) \leq 11$). Will man somit denselben Maßstab wie in der RP2 anwenden, könnten bei einem Modell mit vier Parametern bis zu zwei Ausreißer akzeptiert werden.

Eine andere Faustregel bezieht sich auf das Verhältnis von Ausreißern zum zugrundeliegenden Datensatz ohne Berücksichtigung der Anzahl Parameter, vgl. Agrell & Niknazar, 2014:

„Ok“ wenn $\frac{\# \text{Ausreißer}}{\# \text{Beobachtungen}} \leq 6.5\%$

„May pass“ wenn $\frac{\# \text{Ausreißer}}{\# \text{Beobachtungen}} \leq 15\%$

Gemäß dieser Regeln würden Modelle mit drei oder vier Parametern als unproblematisch gesehen werden, wenn höchstens ein Ausreißer vorliegt. Zwei Ausreißer könnten ggf. akzeptiert werden, drei Ausreißer wären kritisch.

Zusammenfassend sollten Modelle mit vier Parametern gestützt auf diese Faustregeln möglichst nur einen Ausreißer aufweisen. Zwei Ausreißer sind bereits kritisch (bei Modellen mit drei Parametern jedoch noch gut vertretbar). Wesentlich ist, dass die Faustregeln primär dazu dienen, Ineffizienzen nicht zu tief auszuweisen. Soll hierbei jedoch vor allem das Vorsichtsprinzip im Sinne der Netzbetreiber angewendet werden, ergibt sich hieraus ein gewisser Spielraum in der Anzahl der Ausreißer. Vor dem Hintergrund werden nachfolgend bei Modellen mit vier Parametern zwei Ausreißer noch toleriert.

Wie viele Ausreißer in zwei Modellen?

Da vorliegend Modelle sowohl für sTotex wie auch Totex gerechnet werden, stellt sich die Frage, wie verschiedene Ausreißerkonstellationen gewertet werden sollen. Die Anzahl Ausreißer über Totex und sTotex hinweg können auf verschiedene Arten bestimmt werden:

- Max ($\# \text{Ausreißer in Totex}$, $\# \text{Ausreißer in sTotex}$);
- Anzahl Unternehmen, die in den bestabgerechneten Resultaten als Ausreißer gelten: Eine Konstellation (sTotex 1, Totex 2) ist dann besser, wenn insgesamt nur zwei statt drei Unternehmen als Ausreißer identifiziert werden, was der Fall ist, wenn der Ausreißer bei sTotex gleichzeitig auch Ausreißer bei Totex ist (und somit mit Bezug auf die Ausreißer eine größere Kohärenz zwischen den beiden Schätzungen besteht);
- $\# \text{Ausreißer in Totex} + \# \text{Ausreißer in sTotex}$;
- Durchschnitt: $(\# \text{Ausreißer in Totex} + \# \text{Ausreißer in sTotex}) / 2$;
- Nur Ausreißer in sTotex, da der Parameter sTotex unterschiedliche Altersstrukturen besser abbildet;
- „Best-of-impact“: Kombinierte Bewertung aufgrund des Einflusses der Ausreißer auf die bestabgerechneten Effizienzwerte. Eine (sTotex 2, Totex 0) und (sTotex 1, Totex 1) Konstellation ist gleichermaßen gut oder schlecht, wenn die beiden Modelle dieselbe Rolle spielen für die Bestimmung der bestabgerechneten Effizienzwerte. (sTotex 2, Totex 0) ist hingegen schlechter als (sTotex 1, Totex 1) wenn das erste (sTotex) Modell maßgeblich die bestabgerechneten Effizienzwerte bestimmt.

Aus rein statistischer Sicht mit Blick auf das Verhältnis der Anzahl Parameter zur Anzahl Datenpunkte (d.h. Vergleichsunternehmen) ist die erste Variante relevant, da der Blickpunkt auf diejenige(n) Schätzung(en) fällt, die am meisten Ausreißer aufweist. Auf dieses Kriterium wird zunächst bei der Weiterentwicklung der Modelle abgestellt (Abschnitt 5.5.2). Bei der qualitativen Beurteilung der Modelle bei der Modellwahl (Abschnitt 5.5.3) werden zudem das zweite („bestabgerechnete Ausreißer“) und das letzte Kriterium (best-of-impact) mit berücksichtigt.

Dominanz vs. Supereffizienz

Es wird nicht unterschieden zwischen den verschiedenen Typen von Ausreißern (Dominanz vs. Supereffizienz), da für die technische Beurteilung der Anzahl der Ausreißer dominante und supereffiziente Ausreißer gleichermaßen wichtig sind. Ein Fall von reiner Dominanz kann jedoch ein Hinweis darauf sein, dass ein Datenproblem besteht, da das Alleinstellungsmerkmal eines Netzbetreibers für das Anspringen des Dominanzkriteriums ungleich stärker ausgeprägt sein muss und es entsprechend weniger wahrscheinlich ist, dass dies in einer herausragenden Effizienz des Netzbetreibers begründet ist.

5.5.1.4 Bestabgerechnete Effizienzwerte

Liegen die mittels CRS-DEA berechneten Effizienzwerte (E-DEA) für Totex und sTotex vor, sind die individuellen Effizienzwerte je FNB nach dem Best-of Verfahren gemäß § 12 Abs. 3 und 4a ARegV festzulegen. Somit ist für jeden FNB der jeweils höchste Wert heranzuziehen, wobei ein Effizienzwert von 60% gemäß § 12 Abs. 4 ARegV in jedem Fall die Untergrenze bildet. Da wie in Abschnitt 5.5.1.1 ausgeführt vorliegend keine SFA durchgeführt werden kann, ergeben sich die bestabgerechneten Effizienzwerte nach der folgenden Formel:

$$\max(\text{E-DEA}(\text{Totex}), \text{E-DEA}(\text{sTotex}), 60\%),$$

5.5.1.5 Second-Stage-Analysen

Eine gängige Methode um zu ermitteln, ob einem untersuchten Modell relevante Kostentreiber fehlen („omitted variables“), ist die geschätzten Effizienzwerte mit den nicht berücksichtigten Variablen zu vergleichen, also eine sogenannte Second-Stage-Analyse durchzuführen. Die Idee ist, dass falls ein signifikanter Zusammenhang zwischen den geschätzten Effizienzen und einem nicht berücksichtigten potenziellen Kostentreiber besteht, das Vorzeichen bei der Schätzung in die erwartete Richtung geht und zudem einen relevanten Einfluss hat („impact“), in Betracht gezogen werden sollte, das Modell zu erweitern, um die bislang nicht berücksichtigte Variable zu integrieren. Solche Beurteilungen werden üblicherweise mithilfe einer Tobit Regression für stetige Variablen und dem nicht-parametrischen Test von Kruskal-Wallis für diskrete 0-1 Variablen durchgeführt (vgl. auch EVS2). Vorliegend sind solche Tests in ihrer Aussagekraft wegen der geringen Anzahl an Variablen eingeschränkt. Dem Vorsichtsprinzip folgend werden entsprechende Analysen gleichwohl durchgeführt.

5.5.1.6 Permutation

Analog zur RP2 wird zusätzlich eine Permutation für Modelle mit drei bzw. vier Parametern durchgeführt. Ziel ist einerseits die Analyse von kleineren Modellabweichungen rund um die in Abschnitt 5.4 hergeleiteten Grundmodelle und andererseits die etwaige Identifikation von guten Modellen, die im Rahmen der übrigen durchgeführten Verfahren möglicherweise noch nicht diskutiert worden sind. Für Letzteres wurde wie folgt vorgegangen:

- *Schritt 1:* Ausschluss von Modellen anhand folgender Kriterien:
 - Konzeptionell: Keine Doppelwirkungen (z.B. nicht Fläche und Transportmomentfläche im selben Modell, da die Fläche bereits in der Transportmomentfläche enthalten ist)
 - Statistisch: Nicht mehr als zwei Ausreißer bei sTotex oder Totex;
- *Schritt 2:* Positivselektion aus konzeptioneller und regulatorischer Sicht, d.h. stimmige Modelle mit möglichst geeigneten Parameter-Kombinationen mit ausreichender regulatorischer Kontinuität.

5.5.2 Weiterentwicklung Grundmodelle

Die in Abschnitt 5.4 aus RP2, Bottom-up- und Top-down-Verfahren und hergeleiteten fünf Grundmodelle werden nun näher auf ihre Eignung als Modell für den Effizienzvergleich im Rahmen der DEA statistisch untersucht und gezielt mit Blick auf die konzeptionellen und regulatorischen Kriterien gemäß Abschnitt 5.2 weiterentwickelt. Für die Modelle werden jeweils die Anzahl der Ausreißer in der DEA und die resultierende bestabgerechnete Durchschnittseffizienz angegeben.

Modell RP2 mit Rohrvolumen: `yPipevolume`, `yArea`, `yPoints_num`

- Aus statistischer Sicht (Fokus Effizienzgrenze, statistische Eigenschaften als Kostenfunktion vgl. Abschnitt 5.4) ist das Modell der RP2 auch in der Effizienzgrenzenbetrachtung weiterhin geeignet. Es weist keine Ausreißer auf. Die Effizienzwerte liegen bei einem Mittelwert von 90%, der minimale bestabgerechnete Wert beträgt 60%⁴⁷.
- Aus konzeptioneller Sicht berücksichtigt das Rohrvolumen die vorhandene Rohrdimensionierung, jedoch fehlt eine hierzu komplementäre Berücksichtigung der Verdichterleistung. Ebenso wird die Transportdimension nicht abgebildet. Das Rohrvolumen liefert im Vergleich zur Mantelfläche eine weniger konsistente Kostenprognose bei Änderungen von Transportdistanz und Last (vgl. Abschnitte 4.3 und 4.4).
- Aus regulatorischer Sicht ist das Rohrvolumen eher endogen. Es handelt sich um das Modell der RP2, insofern ist diesbezüglich die höchstmögliche Modellkontinuität gegeben. Mit Blick auf die Ergebniskontinuität fallen die individuellen Effizienzwerte teils deutlich geringer aus als in der RP2.

Das Modell der RP2 wird als Benchmark in die engere Auswahl übernommen. Gestützt auf die obige Beurteilung wird geprüft, ob eine stimmige Ergänzung um einen vierten Parameter möglich ist. Auf der Hand liegt die Ergänzung mit der Verdichterleistung, wodurch der Zielkonflikt „Leitungsdurchmesser vs. Verdichtereinsatz“ (vgl. Abschnitt 4.3.1.6) sinngemäß abgebildet werden kann. Entsprechende Modelle sind in **Tabelle 21** aufgeführt. Das Modell R1 erhöht die durchschnittliche Effizienz auf 96.8%. Werden die Ein- und Ausspeisepunkte durch Ausspeisepunkte ersetzt, sinkt die Effizienz in Modell R2 leicht. Wird ausgehend von Modell R1 in Modell R3 der Flächenparameter getauscht, erhöht sich die durchschnittliche Effizienz weiter auf 98.1%, wobei die gemäß Abschnitt 5.5.1.3 maximal tolerierte Anzahl Ausreißer erreicht ist (1 Netzbetreiber dominant und 1 supereffizient bei sTotex, 1 supereffizient bei Totex, insgesamt 2 Netzbetreiber in bestabgerechneten Werten als Ausreißer). Modell R4 erreicht mit Ausspeisepunkten statt Ein- und Ausspeisepunkte ausreißerbedingt eine leicht höhere Effizienz, allerdings ist hier die Anzahl der Ausreißer (1,3; 3 NB) zu hoch. Andere Ergänzungen (z.B. Jahresarbeit) bringen keine Verbesserung der Effizienzwerte mit sich. Soll das Rohrvolumen selbst ersetzt werden, bieten sich Transportwurzelmoment und Rohrmantelfläche sowie ggf. die Leitungslänge an. Erstere beiden werden nachfolgend separat diskutiert. Der Ersatz durch die Leitungslänge bedingt, dass ein weiterer Parameter hinzugefügt wird, der die Kapazitätserfordernisse des Leitungssystems abdeckt, wobei die Verdichterleistung nicht mehr notwendig ist. In Modell R5 werden darum Rohrvolumen und Verdichterleistung von Modell R1 durch die gesamte Leitungslänge und die Höchstlast ersetzt. Die Effizienz sinkt hierdurch leicht, während die Zahl

⁴⁷ Direkt aus Schätzung, also noch vor Anwendung des Minimums von 60%, welches in diesem Kapitel zur besseren Beurteilung der Modelle noch keine Anwendung findet.

der Ausreißer steigt. Das Modell wird daher nicht weiterverfolgt (im Übrigen bestehen bei der Leitungslänge Vorbehalte aufgrund von nicht korrigierten Fremdnutzungsanteilen, vgl. Abschnitt 4.3.1.1).

Aufgrund dieser Überlegungen wird das Modell R3 als Weiterentwicklung des Modells der RP2 in die engere Auswahl aufgenommen und als RP2+ referenziert.

Tabelle 21: Ausgewählte Variationen des RP2-Modells (Rohrvolumen)

Nr.	Vergleichsparameter				Max. #A.	Ø Eff.
RP2	yPipevolume	yArea	yPoints_num		0	0.903
R1	yPipevolume	yArea	yPoints_num	yCompressor_power_sum	1	0.968
R2	yPipevolume	yArea	yPoints_exit_num	yCompressor_power_sum	1	0.963
R3/RP2+	yPipevolume	yArea_all	yPoints_num	yCompressor_power_sum	2	0.981
R4	yPipevolume	yArea_all	yPoints_exit_num	yCompressor_power_sum	3	0.984
R5	yPipelength	yArea	yPoints_num	yPeakload_deliv_simult	2	0.966

Quelle: Eigene Darstellung

Modell TD1 mit Transportwurzelmoment:

yTransportmomWurzel_Qmax_RD, yArea_all, yPoints_exit_num, zGeo_DGM_RANGE

- Aus statistischer Sicht weist das Modell vier Parameter auf, mit nur einem Ausreißer bei der DEA ist dies tragbar. Die Effizienzwerte liegen durchschnittlich bei 90% (Minimum 73%).
- Aus konzeptioneller Sicht werden zur notwendigen Rohrdimensionierung (TWM) komplementäre Aspekte abgebildet (Dienstleistungsdimension mit Komplexität der Versorgungsaufgabe durch versorgte Fläche und Anzahl der Ausspeisepunkte). Hinzu kommt die Höhendifferenz, d.h. gebietsstrukturelle Faktoren werden hier teilweise berücksichtigt.
- Aus regulatorischer Sicht handelt es sich um weitgehend exogene Variablen und eine deutliche, aber stimmige Weiterentwicklung der RP2-Modellierung (Ersatz des Rohrvolumens durch den stärker exogenen und stimmigen Parameter TWM, Fokus auf Ausspeisepunkte, Ergänzung auf vier Parameter mit Gebietseigenschaften). Allerdings ist auch hier die Ergebniskontinuität eher nicht gegeben.

Das Modell eignet sich somit mit Ausnahme der Ergebniskontinuität grundsätzlich gut als Effizienzvergleichsmodell. Eine Analyse der Permutationen gemäß Abschnitt 5.5.1.5 führt zum Ergebnis, dass Varianten des Modells vorliegen, in denen die Ergebniskontinuität eher gegeben ist und zudem für die DEA geeigneter Parameter als die Höhendifferenz verwendet werden. **Tabelle 22** dokumentiert die vielversprechendsten Varianten. Die Variante mit nur drei Parametern (T1) ohne Höhendifferenz und mit ausgetauschtem Flächenparameter yArea verbessert die Durchschnittseffizienz auf 93% mit drei Ausreißern. Die hinsichtlich Ergebniskontinuität beste Alternative aus den Gebietseigenschaften stellt Modell T2 dar (durchschnittliche Neigung, noch vor Boden- und Grabbarkeitsklassen). Die durchschnittliche Effizienz steigt auf 94.1% bei einem Ausreißer. Die Variante T3 mit ausgespeister Jahresarbeit führt zu einer Effizienz von 95.5% bei zwei Ausreißern (sTotex 0, Totex 1+1).

Aufgrund der konzeptionellen Verbesserung (Abbildung der Transportdimension⁴⁸, zudem bessere Eignung des vierten Parameters für die DEA) wird das Modell T3 in die engere Auswahl übernommen und als Modell TD1+ referenziert. Leicht modifizierte Modelle (Ein- und Ausspeisepunkten statt Ausspeisepunkte, yArea_all, ausgespeiste Arbeit) schneiden bei Betrachtung von Varianten des Modells TD1+ bezüglich Ergebniskontinuität schlechter ab.

Tabelle 22: Ausgewählte Variationen des Modells TD1 (Transportwurzelmoment)

Nr.	Vergleichsparameter				Max #A	Ø Eff.
TD1	yTWM	yArea_all	yPoints_exit_num	zGeo_DGM_RANGE	1	0.902
T1	yTWM	yArea	yPoints_exit_num		3	0.932
T2	yTWM	yArea	yPoints_exit_num	zGeo_NEIG_MEAN	1	0.941
T3/TD1+	yTWM	yArea	yPoints_exit_num	yEnergy_injected_Qyear	2	0.955

Quelle: Eigene Darstellung

Modell TD2 mit Rohrmantelfläche:

yPipesurface, yCompressor_power_sum, yPoints_entry_num, yEnergy_injected_Qyear

- Aus statistischer Sicht ist die Beurteilung unverändert gegenüber dem Modell TD1 (4 Parameter, keine Ausreißer). Die Effizienzwerte liegen tiefer (Mittelwert 89.1%, Minimum 63.4%).
- Aus konzeptioneller Sicht wird die vorhandene Rohrdimensionierung konsistent abgebildet, wobei komplementär die Verdichterleistung berücksichtigt wird. Ebenso ist die Transportdimension abgebildet. Die Versorgungsdimension wird durch die Anzahl der Einspeisepunkte unzureichend repräsentiert, d.h. die Ausspeisepunkte und die versorgte Fläche fehlen im Modell.
- Aus regulatorischer Sicht ist die Mantelfläche eher endogen; es handelt sich um eine größere Abkehr vom Modell der RP2 (insb. fehlende Ausspeisepunkte und Fläche). Die Ergebniskontinuität ist eher nicht gegeben.

Gestützt auf diese Beurteilung eignet sich das Modell nicht als Effizienzvergleichsmodell und es werden anhand der Permutation konzeptionell stimmige Weiterentwicklungen gesucht, die in Tabelle 23 dokumentiert sind. Die Reduktion auf ein 3-Parameter-Modell durch Weglassen der Jahresarbeit senkt in Modell T4 die durchschnittliche Effizienz auf unter 90%. Der Ersatz der Einspeisepunkte durch die Ausspeisepunkte erhöht die Effizienz in Modell T5 auf nahezu 90%. Wird dem Modell wiederum die eingespeiste Arbeit hinzugefügt, liegt die Effizienz bei T6 bei 92.5%. Veränderungen in Richtung des Modells RP2+ mit Polygonfläche führen im besten Fall zu einer Durchschnittseffizienz von 93.5% (Modell T7) mit ungenügender Ergebniskontinuität. Verbesserungen hinsichtlich der Ergebniskontinuität wären möglich, wenn statt der Verdichterleistung die Jahresarbeit gewählt würde (am höchsten mit yArea_all statt yArea und nur mit Ausspeisepunkten, Modell T8). Aus konzeptioneller Sicht sollte jedoch die Rohrmantelfläche nur in Kombination mit der Verdichterleistung gewählt werden, welche durch die Jahresarbeit nur ungenügend genähert wird.

Zusammenfassend führen konzeptionell stimmige Varianten mit Rohrmantelfläche zu einer regulatorisch eher ungünstigen regulatorischen Beurteilung. Das Modell T8 fällt gegenüber dem

⁴⁸ Z.B. Kosten, die beim Betrieb zusätzlich zur Systemvorhaltung insb. durch Verdichtereinsatz entstehen.

Modell RP2+ klar ab, bessere Variationen konnten nicht gefunden werden. Aus diesen Gründen wird kein Modell mit Rohrmantelfläche in die engere Auswahl aufgenommen.

Tabelle 23: Ausgewählte Variationen des Modells TD2 (Rohrmantelfläche)

Nr.	Vergleichsparameter				Max #A	Ø Eff.
TD2	yPipesurface	yCompressor_power_sum	yPoints_entry_num	yEnergy_injected_Qyear	1	0.891
T4	yPipesurface	yCompressor_power_sum	yPoints_entry_num		1	0.874
T5	yPipesurface	yCompressor_power_sum	yPoints_exit_num		2	0.897
T6	yPipesurface	yCompressor_power_sum	yPoints_exit_num	yEnergy_injected_Qyear	1	0.925
T7	yPipesurface	yCompressor_power_sum	yPoints_num	yArea	1	0.935
T8	yPipesurface	yArea_all	yPoints_exit_num	yEnergy_delivered_Qyear	1	0.974

Quelle: Eigene Darstellung

Modell BU1 mit Transportwurzelmoment:

yTransportmomWurzel_Qmax_RD, yPoints_entry_num, yTransportH_abs_Qmax, yCompressor_power_sum

- Aus statistischer Sicht ist das Modell zwar als Durchschnittskostenmodell geeignet, für die DEA kommt es jedoch nicht in Frage, da der Parameter yTransportH_abs_Qmax in der OLS-Regression (erwartungsgemäss) ein negatives Vorzeichen aufweist und die DEA Parameterwerte nur positiv einfließen lassen kann, in der DEA also keine Korrektur erfolgt wie in einer Regression. Die durchschnittliche Effizienz liegt daher lediglich bei 76%. Beim Modell stehen somit v.a. stimmige Weiterentwicklungen, die auch für die DEA geeignet sind im Vordergrund (z.B. mit „vertikaler Maximallast“ yTransportV_abs_Qmax).
- Aus konzeptioneller Sicht ist das Modell eher ungeeignet. Einerseits wird die Dienstleistungsdimension der Versorgungsaufgabe mit Einspeisepunkten nur unzureichend abgebildet, andererseits ist es fraglich, ob die (eher endogene) Verdichterleistung ein stimmiges Komplement zum (stärker exogenen) Transportwurzelmoment darstellt.
- Aus regulatorischer Sicht drängt sich das Modell ebenfalls nicht auf: Zwar baut das Modell auf weitgehend exogene Parameter auf, jedoch handelt es sich um eine große Abweichung in der Modellspezifikation im Vergleich zur RP2. Zudem ist die Ergebniskontinuität nicht ausreichend gegeben.

Da das Modell nicht unverändert verwendet werden kann, werden anhand der Permutation gemäß Abschnitt 5.5.1.6 stimmige Anpassungen gesucht. Modell B1 von Tabelle 24 ersetzt mit Blick auf die DEA die horizontale durch die vertikale Transportmenge und verwendet zur besseren Abbildung der Dienstleistungsdimension (vgl. hierzu u.a. Abschnitt 4.2.2) Ausspeisestatt Einspeisepunkte und Fläche statt Verdichterleistung. Die damit einhergehende Durchschnittseffizienz ist nach wie vor tief. Wird ausgehend von BU1 an der Verdichterleistung festgehalten, jedoch die horizontale bzw. vertikale Transportmenge mit der versorgten Fläche ersetzt, steigt in Modell B2 die durchschnittliche Effizienz auf 95.5% bei zwei Ausreißern (1 sTotex, 2 Totex, 2 Netzbetreiber insgesamt). Leicht modifizierte Modelle hiervon (Ein- und Ausspeisepunkte statt Ausspeisepunkte, yArea_all statt yArea) führen zu drei und damit zu vielen Ausreißern.

Da das Modell B2 gegenüber dem Modell TD1+ die gleiche Durchschnittseffizienz aufweist, jedoch konzeptionell eine Verschlechterung darstellt (Jahresarbeit als besseres Komplement zu TWM als Verdichterleistung), wird kein BU1-Modell in die nähere Auswahl übernommen.

Tabelle 24: Ausgewählte Variationen des BU1-Modells (Transportwurzelmoment)

Nr.	Vergleichsparameter				Max. #A	Ø Eff.
BU1	yTWM	yTransportH_abs_Qmax	yPoints_entry_num	yCompressor_power_sum	1	0.760
B1	yTWM	yTransportV_abs_Qyear	yPoints_exit_num	yArea	1	0.901
B2	yTWM	yArea	yPoints_exit_num	yCompressor_power_sum	2	0.955

Quelle: Eigene Darstellung

Modell BU2 mit Fläche / Jahresarbeit:

yArea, yEnergy_injected, zSoil_BK4567M02

- Aus statistischer Sicht weist die Effizienzgrenze bei drei Parametern keine Ausreißer auf. Die durchschnittliche Effizienz liegt bei 92.7%, die minimale Effizienz beträgt 70.7%.
- Aus konzeptioneller Sicht wird zwar die Transportdimension und teilweise die Dienstleistungsdimension (Granularität fehlt) abgedeckt, jedoch fehlt ein Parameter der Kapazitätsdimension gänzlich.
- Aus regulatorischer Sicht wird der Flächenparameter mit exogenen Parametern ergänzt, jedoch stellt das Modell eine starke Abkehr vom Modell der RP2 dar.

Aufgrund dieser Beurteilung wird das Modell BU2 als ungeeignet erachtet und daher verworfen. Bei einer möglichen Weiterentwicklung des Modells stehen Varianten im Vordergrund, welche die Granularität der Versorgungsaufgabe und die Kapazitätsdimension ergänzen. Als vierter Parameter werden zunächst Punkte hinzugefügt, wobei die Variation mit Ein- und Ausspeisepunkten und aus- statt ausgespeister Jahresarbeit mit 96% die höchste Durchschnittseffizienz aufweist (Modell B3). Um die Kapazitätsdimension mit aufzunehmen, kann zum einen der Bodenparameter von B3 ersetzt werden, der grob die Leitungslänge der Bodenklassen 4 bis 7 abdeckt. Kandidaten hierfür sind das Rohrvolumen und -Mantelfläche sowie das TWM. Mit Mantelfläche resultiert bestenfalls das Modell T8 oben, mit dem TWM das Modell TD1+. Der Ersatz mit Rohrvolumen würde die Effizienz auf 94.4% senken, jedoch gelten hier die gleichen konzeptionellen Bedenken wie bei Modell T8 (Fehlen von komplementärer Verdichterleistung). Zum anderen kann die Kapazitätsdimension durch Substitution der Jahresarbeit durch die Höchstlast abgebildet werden (Modell B4). Hierdurch sinkt die Effizienz in der besten Variation (mit Ausspeisepunkten) leicht auf 95.6%. Beim Modell ist zwar die Last abgedeckt, jedoch die Rohrgeometrie durch den Bodenparameter nur teilweise.

Es wird daher kein Modell ausgehend von BU2 in die engere Auswahl aufgenommen.

Tabelle 25: Ausgewählte Variationen des BU2-Modells (Fläche/Arbeit)

Nr.	Vergleichsparameter				Max #A	Ø Eff.
BU2	yArea	yEnergy_injected_Qyear	zSoil_BK4567M02		0	0.927
B3	yArea	yEnergy_delivered_Qyear	zSoil_BK4567M02	yPoints_num	2	0.960
B4	yArea	yPeakload_deliv_simult	zSoil_BK4567M02	yPoints_exit_num	2	0.956

Quelle: Eigene Darstellung

Die Auswertung der Permutation gemäß Abschnitt 5.5.1.5 ergab keine weiteren Modelle.

5.5.3 Modellwahl

Die in die engere Auswahl aufgenommenen Modelle RP2+ und TD1+ werden nun dem Modell RP2 der zweiten Regulierungsperiode gegenübergestellt. **Tabelle 26** beinhaltet eine vergleichende Übersicht. Die Beurteilung der Modelle gemäß den Kriterien in Abschnitt 5.2 ist im unteren Teil der Tabelle zusammengefasst. Sie lässt sich wie folgt ausführen:

- Aus **konzeptioneller Sicht** sticht das Modell TD1+ hervor. Im Vergleich zum Modell der RP2 ersetzt es das Rohrvolumen durch den gemäß KTA Ing. sehr stimmigen, stärker exogenen Parameter Transportwurzelmoment und ergänzt es um die Jahresarbeit. Es deckt alle Versorgungsdimensionen kohärent ab (Transport via Jahresarbeit und implizit durch Leitungslänge im TWM, Kapazität via TWM mittels der sich aus den Höchstlasten an Ein- und Ausspeisepunkten ergebenden auf den Trassen notwendigen Rohrdurchmessern, Dienstleistung inkl. Granularität/Komplexität der Versorgungsaufgabe mit Anschlusspunkten und Fläche). Demgegenüber handelt es sich beim Modell RP2+ um eine gute Ergänzung des Modells der RP2 um einen vierten Parameter, bei der dem Rohrvolumen die Verdichterleistung zur Seite gestellt wird und somit der Zielkonflikt Rohrdurchmesser vs. Verdichterleistung gut abgebildet ist.
- Aus **regulatorischer Sicht** überzeugt das Modell RP2+ zunächst durch seine Modell- und Ergebniskontinuität im Vergleich zur zweiten Regulierungsperiode. Alle Vergleichsparameter der RP2 sind abgedeckt und werden um einen vierten Parameter stimmig ergänzt (vgl. oben), was gleichzeitig die Ergebniskontinuität erhöht. Demgegenüber handelt es sich beim Modell TD1+ um eine kohärente Weiterentwicklung, indem das Rohrvolumen durch das Transportwurzelmoment ersetzt wird, bei den Anschlüssen lediglich die Ausspeisepunkte gezählt werden und zudem die Jahresarbeit aufgenommen wird. Damit greift es zwar auf stärker exogene Parameter zurück als die Modelle RP2 und RP2+, jedoch ist die Modell- und Ergebniskontinuität weniger gegeben. Mit Blick auf die Robustheit werden bei den Modellen RP2 und RP2+ zum einen Parameter verwendet, welche in ihrer Bildung unumstritten sind. Zum anderen sind Variationen um das gewählte Modell weitgehend robust bezüglich der resultierenden Effizienzwerte. Das Modell TD1+ fußt mit dem Transportwurzelmoment auf einem gegenüber dem Rohrvolumen komplexeren Parameter, bei dem Detailfragen wie die Vollständigkeit von Teilnetzen (vgl. Abschnitt I.1.2) oder die Aufteilung von Mengen bei gemeinsam genutzten Messpunkten entscheidend sind. Ebenso verändern kleine Modellvariationen die bestabgerechneten Effizienzwerte i.d.R. stärker.
- Aus **statistischer Sicht** eignen sich zunächst alle Modelle als Kostenfunktion: Alle Parameter sind signifikant, es liegt keine Heteroskedastizität vor, die Multikollinearität ist begrenzt und es liegt jeweils nicht mehr als ein ökonometrischer Ausreißer vor. Bezüglich BIC schneiden die Modelle mit Rohrvolumen bei sTotex besser ab und bei Totex das Modell mit Transportwurzelmoment. Die resultierende Effizienzgrenze führt beim Modell RP2 zum tiefsten minimalen Effizienzwert, wobei in der DEA kein Ausreißer vorliegt. Die Modelle TD1+ und insbesondere RP2+ weisen höhere minimale Effizienzwerte auf. Bei beiden liegen in der DEA maximal zwei Ausreißer vor (bei RP2+ 2 bei sTotex und 1 bei Totex, insgesamt 2 Netzbetreiber betroffen; bei TD1+ 2 Ausreißer bei Totex). Gemäß den Ausführungen in Abschnitt 5.5.1.3 ist dies aus technischer Sicht tolerierbar. In der Second-Stage-Analyse zeigen die beiden Modelle RP2 und RP2+ im Unterschied zum Modell TD1+ keine Auffälligkeiten, wobei diese bei Letzterem als eher unbedenklich eingestuft werden.

Tabelle 26: Übersicht engere Modellauswahl

	Modell RP2	Modell RP2+	Modell TD1+
Vergleichsparameter			
	yPipevolume	yPipevolume	yTransportwurzel
	yArea	yArea_all	yArea
	yPoints_num	yPoints_num	yPoints_exit_num
		yCompressor_power	yEnergy_injected_Qyear
Modellbeurteilung			
Konzeptionell	Im Wesentlichen i.O.	Gut (alle wesentlichen Versorgungsdimensionen abgebildet)	Sehr gut (alle Versorgungsdimensionen abgebildet)
Regulatorisch	Kontinuität bez. Parameterwahl gegeben, Ergebniskontinuität fraglich Robust bezüglich Parameterbildungen	Ergänzung um vierten Parameter; höchste Resultatkontinuität Robust bezüglich Parameterbildungen und Modellvariationen	Weiterentwicklung, Ergebniskontinuität fraglich Stärker exogene Variablen Weniger robust bezüglich Parameterbildungen und Modellvariationen
Statistisch (Kostenfunktion)	Sehr gut (besteht alle Tests, Ausreißer i.O. (1,1), BIC(sT)=580.8, BIC(T)=583.3	Gut (besteht alle relevanten Tests, Ausreißer i.O. (1,0), BIC(sT)=575.6, BIC(T)=584.2	Gut (besteht alle relevanten Tests, Ausreißer i.O. (0,1), BIC(sT)=587.1, BIC(T)=577.0
Statistisch (Effizienzgrenze)	Mittelwert 90.3% Minimaler Wert 60.2% Ausreißer gut (keine)	Mittelwert 98.1% Minimaler Wert 77.7% Ausreißer ok (2)	Mittelwert 95.5% Minimaler Wert 73.4% Ausreißer ok (2)
Second Stage	Sehr gut (keine Auffälligkeiten)	Sehr gut (keine Auffälligkeiten)	Gut (geringfügige Auffälligkeiten)
Fazit			
Wahl als Modell RP3			

Quelle: Eigene Darstellung

Zusammenfassend wird aus ingenieurwissenschaftlicher bzw. konzeptioneller Sicht das Modell TD1+ gegenüber dem Modell RP2+ und dieses wiederum gegenüber dem Modell RP2 bevorzugt. Aus regulatorischer Sicht schneidet das Modell RP2+ mit Blick auf Modell- und Ergebniskontinuität am besten ab. Während das Modell TD1+ auf grundsätzlich exogenere Parametern zurückgreift, wird das Modell RP2+ als robuster eingeschätzt, da es auf einfacheren und in seiner Bildung eindeutigeren Parametern aufbaut. Aus rein technischer bzw. statistischer Sicht besticht das Modell RP2 durch seine drei Parameter. Die Modelle RP2+ und TD1+ erfüllen beide alle relevanten statischen Kriterien, im direkten Vergleich ist das Modell RP2+ leicht besser (tieferer durchschnittlicher BIC-Wert, keine Second-Stage Auffälligkeiten).

Über alle Aspekte hinweg schneidet das Modell RP2+ am besten ab. Dieses Modell würde auch in Anwendung des Vorsichtsprinzips gewählt, da es die höchsten durchschnittlichen Effizienzwerte und die höchste minimale Effizienz aufweist. Mit Blick auf die ARegV sind zwei von vier Parametern im Modell RP2+ in § 13 Abs. 3 S. 4 Nr. 2 und 3 i.V.m. § 22 Abs. 3 S. 3 ARegV für den Effizienzvergleich der Fernleitungsnetzbetreiber explizit als per verordnungsrechtlicher Vorgaben mögliche Vergleichsparameter genannt (Rohrvolumen und Fläche des versorgten Gebietes). Ein weiterer Parameter, die Anzahl der Ein- und Ausspeisepunkte, entspricht in seiner Wirkung den Ausspeisepunkten in Gasversorgungsnetzen, § 13 Abs. 3 S. 3 Nr. 1 ARegV. Die

Verwendung dieser Parameter sichert somit regulatorische Konstanz, vermindert die Unsicherheit über künftige Vergleichsmaßstäbe und bewegt sich dennoch im durch die dargelegten qualitativen, analytischen und statistischen Methoden aufgespannten Raum der Parameterauswahl. Erwägungen hinsichtlich des Grades der Endo- oder Exogenität dieser Parameter sind insofern zu relativieren, als dass diese theoretischen Einflussmöglichkeiten (Verlegung nicht erforderlicher Leitungen zur Erhöhung der Parameter des Rohrvolumens und der Fläche) hinter der offensichtlichen Bedeutung als erhebliche Kostentreiber zurückstehen müssen.⁴⁹

Aus diesen Gründen wird das Modell RP2+ zur Detailspezifikation gewählt.

5.5.4 Detailspezifikation

Bei der Detailspezifikation werden nochmals ausgewählte statistische, konzeptionelle und regulatorische Fragen geprüft.

Da eine SFA nicht anwendbar, die DEA gemäß ARegV mit konstanten Skalenerträgen durchzuführen ist und auch die Second-Stage-Analyse des Modells RP2+ sehr gut ausfällt, ergibt sich aus statischer Sicht kein Anpassungsbedarf.

Aus konzeptioneller und regulatorischer Sicht stellt sich die Frage, ob der Parameter y_{Area_all} gegenüber y_{Area} tatsächlich vorzuziehen sei. Tabelle 21 ist zu entnehmen, dass das gleiche Modell mit y_{Area} zu einer um 1.3% tieferen durchschnittlichen Effizienz führen würde. Beim Parameter y_{Area} wird die Fläche basierend auf jeweils vollständigen, zusammenhängenden Teilnetzen gebildet. Demgegenüber werden beim Parameter y_{Area_all} grundsätzlich alle Knoten und Anschlüsse unabhängig von ihrer physikalischen Verbundenheit berücksichtigt und je Gasqualität die Fläche des Gesamtnetzes berechnet (vgl. Abschnitt I.2.7). y_{Area} ist grundsätzlich stärker exogen geprägt (vgl. Abschnitt 4.2.3). Demgegenüber wurde von Netzbetreibern im Rahmen der Konsultation gefordert, dass der Parameter y_{Area_all} vorzuziehen sei⁵⁰. Im Sinne des Vorsichtsprinzips und aufgrund der Argumentation der Netzbetreiber wird daher an y_{Area_all} festgehalten. Ebenso wird davon abgesehen, die Ein- und Ausspeisepunkte durch die Ausspeisepunkte alleine zu ersetzen. Zwar wäre hierdurch die Durchschnittseffizienz marginal um 0.3% erhöht, jedoch kommt das Modell aus statistischer Sicht aufgrund seiner zu hohen Anzahl an Ausreißern nicht in Frage.

Die Effizienzberechnung und Validierung wird daher für das in **Tabelle 27** beschriebene Modell RP2+ dokumentiert (linke Spalte).

⁴⁹ Vgl. OLG Düsseldorf, Beschluss vom 20.09.2017, VI-3 Kart 121/14 [V], S. 38.

⁵⁰ Aus gaswirtschaftlicher Sicht bestehe trotz physischer Trennung der Netze ein in sich geschlossenes Gesamtsystem. Vereinbarungen zur Marktgebietskooperation zwischen den Fernleitungsnetzbetreibern und kostenpflichtige Instrumente wie Lastflusszusagen würden die entsprechenden Lücken zwischen den Systemgrenzen überbrücken. Über vermeintliche Teilnetze hinweg könnten so frei zuordenbaren Kapazitäten abgebildet werden. Nur so könnten die Anforderungen des § 21 GasNZV zur Reduzierung der Marktgebiete und zur Darstellung des Zwei-Vertrags-Modells erfüllt werden.

Tabelle 27: Beschreibung finales Modell für den Effizienzvergleich

Parameter	Beschreibung	Abdeckung der Versorgungsdimensionen
yPipevolume	Rohrleitungsvolumen bereinigt um Fremdnutzungsanteile, Bio- und Investitionsmaßnahmen	Bildet die bestehende Rohrdimensionierung ab, dabei Abdeckung von zwei Dimensionen: Kapazitätsbereitstellung durch die verlegte Rohrkapazität (Durchmesser der Leitungsabschnitte) Dienstleistungsbereitstellung im Sinne einer Verbindung aller Ein- und Ausspeisepunkte (Länge Leitungsabschnitte) Implizit wird durch die zugrundeliegende Leitungslänge zudem die Transportdimension erfasst.
yArea_all	Versorgte Fläche des Netzbetreibers als Polygonfläche aller Leitungsabschnitte und Anschlüsse	Dienstleistungsbereitstellung durch Abbildung der (potenziell) versorgten Fläche, implizit ggf. zusätzlich Aspekt Komplexität der Netzstruktur und Flexibilitätsbereitstellung.
yPoints_num	Bereinigte Anzahl Anschluss- und Netzkoppelungspunkte	Dienstleistungsbereitstellung durch Versorgung und Betrieb der Anschlüsse, dazu Aspekt Granularität der Versorgungsaufgabe inkl. Komplexität/Flexibilität.
yCompressor_power	Verdichterleistung bereinigt um Fremdnutzungsanteile, Bio- und Investitionsmaßnahmen	Kapazitätsbereitstellung in Form installierter Verdichterleistung zur Leistung der benötigten Drücke/Mengen.

Quelle: Eigene Darstellung

5.5.5 Bestabgerechnete Effizienzwerte

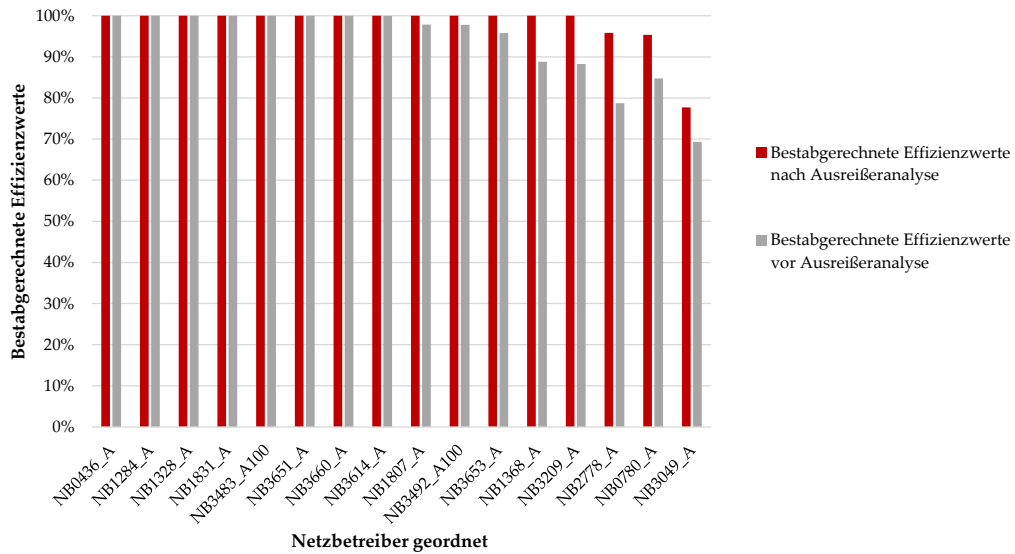
Tabelle 28 und **Abbildung 34** stellen die bestabgerechneten Effizienzwerte des gewählten Modells vor und nach der Ausreißeranalyse dar. Der Berechnung liegen die Parameterwerte gemäß Anhang V zugrunde. Durch die Ausreißerbereinigung steigen die Werte insbesondere von denjenigen Unternehmen an, welche vor Ausreißeranalyse verhältnismäßig tiefe Effizienzwerte aufweisen.

Tabelle 28: Effizienzwerte finales Modell

	Mittelwert	Minimale Effizienz	Anzahl Ausreißer	Anzahl 100%
Effizienzwerte vor Ausreißeranalyse				
sTotex	0.936	0.693	-	7
Totex	0.843	0.637	-	5
Bestabgerechnet	0.938	0.693		8
Effizienzwerte nach Ausreißeranalyse				
sTotex	0.981	0.777	2	13
Totex	0.883	0.637	1	7
Bestabgerechnet	0.981	0.777	2	13

Quelle: Eigene Darstellung

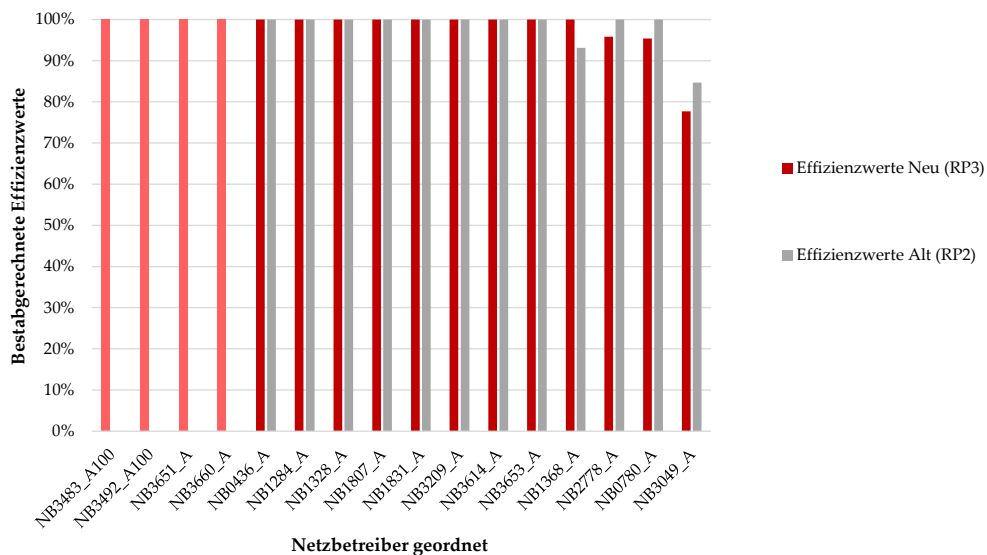
Abbildung 34: Verteilung bestabgerechnete Effizienzwerte



Quelle: Eigene Darstellung

Die Werte der RP3 bewegen sich damit stark im Rahmen der Werte der RP2. Dies zeigt Abbildung 35. Der Netzbetreiber mit dem tiefsten Effizienzwert weist wiederum den tiefsten Wert auf. Daneben haben sich zwei Netzbetreiber ausgehend von 100% etwas verschlechtert, während ein Netzbetreiber eine Verbesserung seiner Effizienz erzielt hat. Acht von zwölf Netzbetreibern, die in beiden Regulierungsperioden im Effizienzvergleich berücksichtigt wurden, haben unveränderte Effizienzwerte. Die vier neuen Netzbetreiber weisen allesamt Effizienzwerte von 100% auf (hellrote Säulen links).

Abbildung 35: Veränderung der bestabgerechneten Effizienzwerte



Quelle: Eigene Darstellung

5.5.6 Validierung

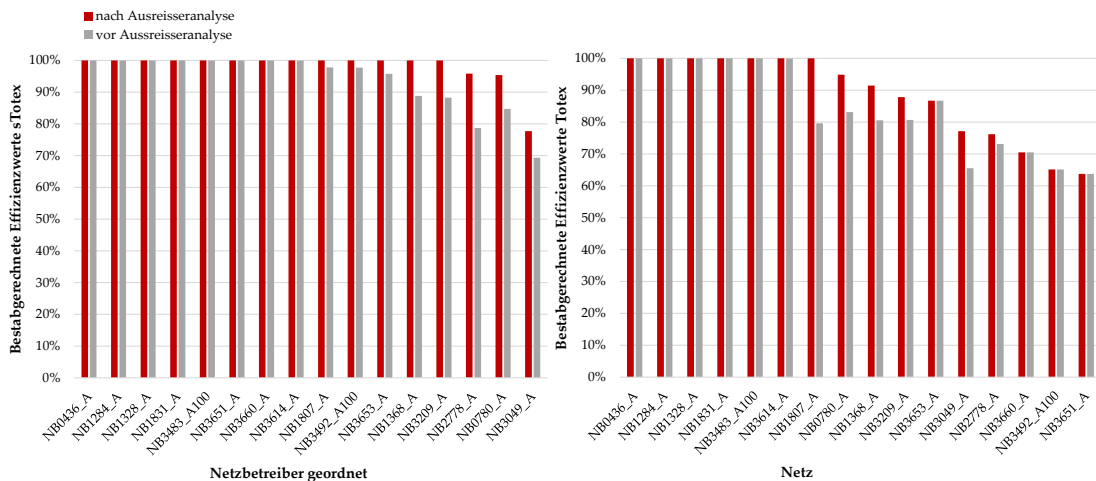
Vor seiner definitiven Auswahl wurde das gewählte Modell eingehend validiert. Nachfolgend werden neben der Ausreißeranalyse die Peer-Analyse, die Second-Stage-Analyse und die Validierung als Kostenfunktion dokumentiert.

5.5.6.1 Ausreißeranalyse

Effekt der Ausreißerbereinigung auf die Effizienzwerte

Der Effekt der Ausreißeranalyse (AA) auf die Effizienzwerte wurde schon oben in Tabelle 28 und Abbildung 34 summarisch dargestellt. Demnach steigt der durchschnittliche Effizienzwert nach der Bereinigung um Ausreißer um 4.5 Prozentpunkte bei sTotex bzw. 4.1 Prozentpunkte bei Totex. Für sTotex erhöht sich die Anzahl der effizienten Netzbetreiber von sieben auf 13 und bei Totex von fünf auf sieben. **Abbildung 36** zeigt den Effekt der Ausreißerbereinigung gesondert für sTotex und Totex. Ein Abgleich mit den bestabgerechneten Werten aus Abbildung 34 zeigt, dass die bestabgerechneten Werte deckungsgleich mit den sTotex-Werten nach AA sind. Im Modell prägt somit der standardisierte Aufwandparameter die Ergebnisse eindeutig, was mitunter auch mit der Anzahl der Ausreißer zusammenhängt (zwei bei sTotex vs. einer bei Totex). Abbildung 36 zeigt jedoch auch klar auf, dass beim gewählten Modell die Effizienzwerte bei sTotex auch schon vor AA klar höher sind als bei Totex (im Mittelwert 93.6% vs. 84.3%, vgl. Tabelle 28), insofern liegt die Dominanz der Werte der sTotex-Schätzung nicht alleine in der größeren Anzahl von Ausreißern begründet. Da davon ausgegangen wird, dass der standardisierte Aufwandparameter aufgrund beträchtlicher Unterschiede in der Altersstruktur der Netzbetreiber den besseren Vergleichsmaßstab darstellt, ist es grundsätzlich zu begrüßen, wenn die sTotex-Schätzung die Effizienzwerte stärker prägt.

Abbildung 36: Bestabgerechnete Effizienzwerte bei sTotex (links) und Totex (rechts)



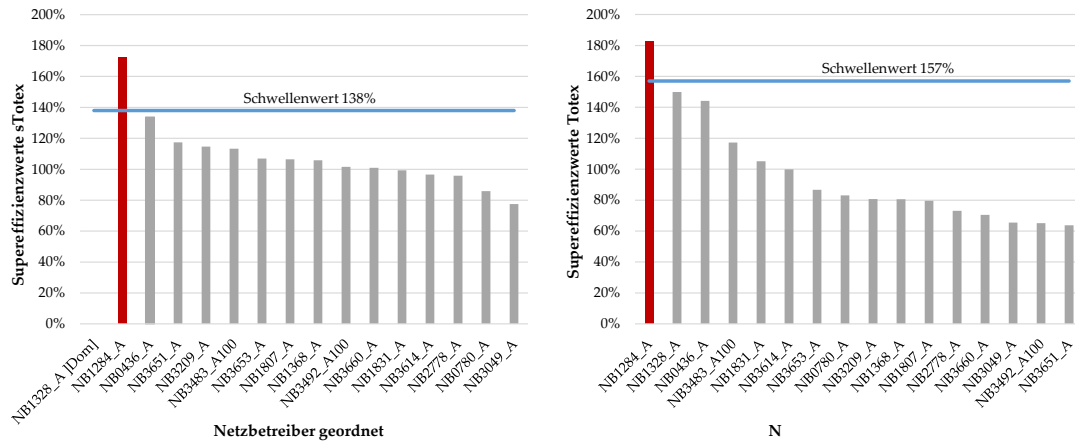
Quelle: Eigene Darstellung

Supereffizienz

Abbildung 37 stellt für sTotex und Totex die Schwellenwerte für die Supereffizienz-Analyse dar. Die gestützt hierauf identifizierten supereffizienten Unternehmen sind rot eingefärbt. Bei sTotex liegt ein Unternehmen über dem Schwellenwert, wobei hier ein Netzbetreiber bereits als dominant identifiziert worden ist und bei der Berechnung des Schwellenwerts nicht mehr be-

rücksichtigt wird. Hätte die Dominanzanalyse nicht stattgefunden, hätten der dominante Netzbetreiber und das jetzt supereffiziente Unternehmen über der Schwelle gelegen, es hätte sich also nichts geändert.

Abbildung 37: Verteilung Supereffizienzwerte



Quelle: Eigene Darstellung

5.5.6.2 Peer-Analyse

Bei der Peer-Analyse wird untersucht, welche Netzbetreiber für welche übrigen Netzbetreiber den Effizienzmaßstab darstellen, also als „best practice“ gelten.

Tabelle 29: Peer-Analyse sTotex

Peers sTotex	1	5	6	7	10	11	12	13	14	15	16
1	100%										
2			5%					85%		10%	
3 (outlier, sup)											
4 (outlier, dom)											
5		100%									
6			100%								
7				100%							
8		1%			8%					91%	
9			4%					9%		87%	
10					100%						
11						100%					
12							100%				
13								100%			
14									100%		
15										100%	
16											100%

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 29 zeigt das Ergebnis der Peer-Analyse für die Schätzung mit sTotex (DEAIII, also die DEA nach Herausnahme der dominanten bzw. supereffizienten Unternehmen). Die Netzbetreibernummern entsprechen der Reihenfolge, wie die Netzbetreiber in Anhang V genannt sind.

Netzbetreiber 2 wird beispielsweise zu 5% an Netzbetreiber 6, zu 85% an Netzbetreiber 13 und zu 10% an Netzbetreiber 15 gemessen. Zehn Unternehmen stellen ihr eigenes Peer dar, weisen also im Datensatz einzigartig gute Input-Output-Kombinationen auf.

Bei der Totex-Schätzung präsentiert sich das Ergebnis unterschiedlich, vgl. **Tabelle 30**. Hier ist Netzbetreiber 4 für neun FNB ein Peer-Unternehmen. Demzufolge hat dieser Netzbetreiber mit Bezug auf Totex einen beträchtlichen Einfluss auf die übrigen Netzbetreiber. Bei sTotex war das Unternehmen als dominant identifiziert worden und wurde bei der maßgeblichen DEA nicht mehr berücksichtigt. Dieser dominante Einfluss entspricht exakt dem, was beim ersten Ausreißerkriterium (Dominanz) getestet wird. Dass der Test bei Totex nicht angeschlagen ist bedeutet, dass das Unternehmen 4, obwohl wichtig, nicht das einzige Unternehmen ist, welches als Peer für etliche andere Unternehmen zur Anwendung kommt. Dies ist dann der Fall, wenn alternative Peers vorhanden sind, welche in den betreffenden Dimensionen eine ähnlich hohe Effizienz erzielen (vorliegend die Unternehmen 1, 6, 11 und 13).

Tabelle 30: Peer-Analyse Totex

Peers Totex	1	4	6	7	11	13
1	100%					
2		7%	3%			90%
3 (outlier, sup)						
4		100%				
5		59%				41%
6			100%			
7				100%		
8	8%	81%				11%
9	9%	46%				45%
10		92%	8%			
11					100%	
12		46%			22%	32%
13						100%
14		51%			49%	
15	41%	59%				
16		16%			84%	

Quelle: Eigene Darstellung

5.5.6.3 Second-Stage-Analyse

Wie in Abschnitt 5.5.1.5 erwähnt, macht es der kleine Stichprobenumfang schwierig, stichhaltige Second-Stage-Analysen durchzuführen. Dies wird erschwert dadurch, dass nur drei der 16 Beobachtungen Werte aufweisen, welche von 1 abweichen.

Dennoch wird in Anwendung des Vorsichtsprinzips überprüft, ob einer der nicht berücksichtigten Parameter gemäß Tabelle 36 die (limitierte) Variation der bestabgerechneten Effizienzwerte erklären kann. Hierfür werden einerseits einfache OLS Regressionen durchgeführt bei denen versucht wird, die bestabgerechneten Effizienzwerte durch die einzelnen nicht berücksichtigten

Vergleichsparameter zu erklären, andererseits werden auf der gleichen Basis Tobit-Regressionen geschätzt. Dabei weisen keine nicht berücksichtigten Parameter einen signifikanten Einfluss auf.

Daraus kann gefolgert werden, dass das gewählte Modell nicht an Second-stage Problemen leidet und kein Grund besteht, entweder den bereits umfangreichen Bestand an Kostentreibern zu erweitern oder eine der vier Variablen zu ersetzen.

5.5.6.4 Validierung als Kostenfunktion

Bei einer Betrachtung als Kostenfunktion weist das Modell gute statistische Eigenschaften auf (Regressionsoutput vgl. Anhang VI, u.a. hervorragende Anpassungsgüte mit einem adj. R2 von 0.99 bei sTotex). Das Vorzeichen der Parameter entspricht den Erwartungen und die Parameter sind bei sTotex robust in Bezug auf das Vorzeichen sowie deren Größenordnung. Dies gilt nicht in gleichem Masse für die Totex-Schätzung, in der die Verdichterleistung in der robusten Regression nicht mehr signifikant erscheint. Das Modell erweist sich als gut bezüglich der Anzahl Ausreißer in der Auffälligkeitsanalyse (einer bei sTotex, keiner bei Totex). Das Modell leidet weder an Heteroskedastizität noch liegen Anzeichen vor, dass die Residuen nicht normalverteilt wären. Bezüglich möglicher Multikollinearität erreicht der Belsley Test maximal den Wert 11 und liegt somit deutlich unter dem kritischen Grenzwert von 30. Hingegen liegt der VIF mit einem Wert von 14.6 über dem Schwellenwert von 10. Dies ist v.a. dem vierten Parameter geschuldet, wie auch Abbildung 40 in Anhang VI zeigt, wobei das Modell RP2+ im Vergleich zu den übrigen 4-Parameter-Modellen hinsichtlich Multikollinearität sehr gut abschneidet. Das moderate Anschlagen des VIF Tests wird angesichts des gut erfüllten Belsley Test nicht als kritisch gesehen.

Aus analytischer Sicht enthält das Modell komplementäre Kostentreiber, welche die wesentlichen Versorgungsdimensionen Kapazitätsbereitstellung (Rohrdurchmesser via Rohrvolumen, komplementär Verdichterleistung) und Dienstleistungsbereitstellung inkl. Komplexität und Granularität der Versorgungsaufgabe (Anschlusspunkte, versorgte Fläche) umfassend abbilden. Die Transportdimension wird implizit durch die Leitungslänge im Rohrvolumen abgedeckt. Der hohe Informationsgehalt des Modells zeigt, dass die gewählten Parameter im Zusammenspiel die Heterogenität der Netzbetreiber sehr gut abzubilden vermögen, dass also die Kosten reiner Leitungsgesellschaften in vergleichbarer Güte wie die Kosten von Betreibern mit komplexeren Netztopologien erfasst werden.

6 Zusammenfassung

Mit Blick auf die Bestimmung der individuellen Effizienzwerte der deutschen Fernnetzbetreiber (FNB) im Rahmen der dritten Regulierungsperiode wurde Swiss Economics zusammen mit SUMICSID und FourManagement von der Bundesnetzagentur damit beauftragt, eine Plausibilisierung der bei den Fernleitungsnetzbetreibern abgefragten Struktur- und Kostendaten vorzunehmen, die Kostentreiber der FNB ingenieurwissenschaftlich und statistisch zu analysieren und den Effizienzvergleich gemäß der Anreizregulierungsverordnung (ARegV) durchzuführen.

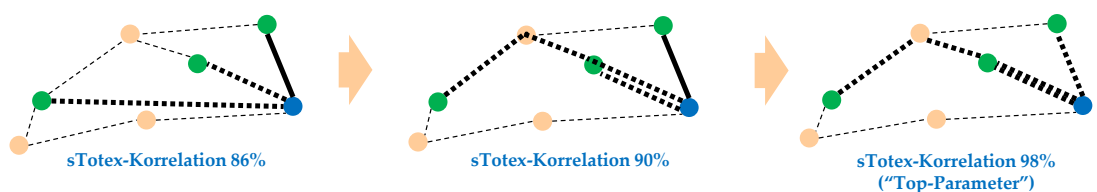
Datenvalidierung

Im Rahmen einer umfangreichen Datenvalidierung, bei der u.a. die einzelnen Netze graphisch dargestellt und auf Vollständigkeit geprüft wurden, konnte die Datenqualität im Verlauf des Projekts ausgehend von einer bereits guten Basis weiter erhöht werden. Die verwendeten Daten, die in den Effizienzvergleich eingehen, erscheinen formal korrekt, integer, plausibel und qualitativ hochwertig.

Parameterbildung und ingenieurwissenschaftliche Kostentreiberanalyse

Die Datenabfrage der dritten Regulierungsperiode (RP3) war zuvor durch die BNetzA in ausgewählten Punkten vertieft worden, was eine Weiterentwicklung der Parameter der zweiten Regulierungsperiode (RP2) im Rahmen der ingenieurwissenschaftlichen Kostentreiberanalyse ermöglichte. **Abbildung 38** zeigt beispielhaft die Weiterentwicklung des GIS-basierten Parameters Transportmoment der RP2 hin zum Transportwurzelmoment, bei welchem der jeweils optimale Leitungsdurchmesser zur Leistung der maximalen stündlichen Drücke zur Bedienung der Ausspeisepunkte (grün) von den Einspeisepunkten (blau) aus genähert wird. Die analytisch präzisere Kostenabbildung beim Transportwurzelmoment steigert dessen Korrelation mit den Aufwandsparemtern auf über 98%, was bezüglich standardisierter Kosten (sTotex) den höchsten Wert aller Vergleichsparameter darstellt.

Abbildung 38: Weiterentwicklung der Vergleichsparameter



Quelle: Eigene Abbildung

Insgesamt wurden 55 Vergleichsparameter gebildet, gruppiert, konzeptionell eingeordnet, qualitativ beurteilt und quantitativ im Rahmen einer Referenznetzanalyse untersucht. Ergebnis dieser Überlegungen ist eine Einordnung der Vergleichsparameter hinsichtlich ihrer Eignung als Kostentreiber aus ingenieurwissenschaftlicher Perspektive.

RP2: Transportmoment mit Luftliniendistanzen

RP3 angepasst: Transportmoment mit "realen Distanzen"

RP3 neu: Transportwurzelmoment

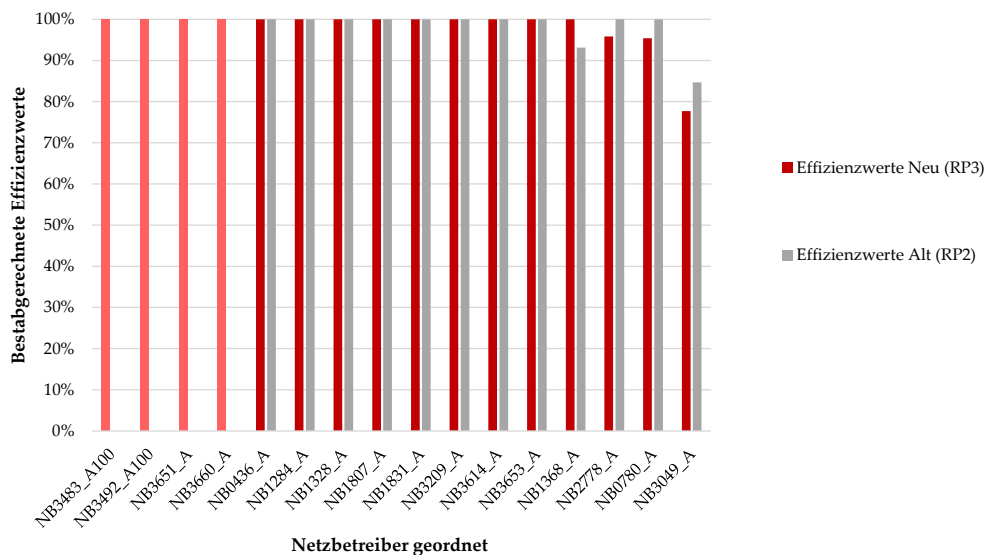
Effizienzvergleich

Beim Effizienzvergleich wird ermittelt, wie effizient ein einzelner FNB seine Versorgungsaufgabe im Vergleich zu den übrigen FNB erfüllt. Nach Konsultation der FNB und Festlegung der

hierfür eingesetzten Methoden und Gütekriterien wurde in einem ersten Schritt der Erklärungsgehalt der einzelnen Vergleichsparameter hinsichtlich der Aufwandparameter (sTotex, Totex) und untereinander (Korrelationstabellen) untersucht sowie die optimale Modellgröße diskutiert. In einem nächsten Schritt wurden Grundmodelle ausgehend vom Rohrvolumen (RP2-Verfahren) sowie aufgrund der Ergebnisse der ingenieurwissenschaftlichen Kostentreiberanalyse von der Rohrmantelfläche und dem Transportwurzelmoment (Top-down-Verfahren) entwickelt. Flankierend wurden mittels des Bottom-up-Verfahrens Modelle ausgehend von den am besten mit den Kosten korrelierten Parametern je Gruppe aus rein statistischer Sicht geprüft, was zu weiteren zwei Grundmodellen führte. Insgesamt wurden in einem dritten Schritt fünf Grundmodelle aus analytischer Sicht und anhand einer Permutation aller Modelle weiterentwickelt. Im Rahmen der finalen Modellauswahl konnten schließlich zwei Modelle dem alten Modell der RP2 mit Rohrvolumen, Fläche und Ein- und Auspeisepunkte gegenübergestellt werden. Zum einen eine Ergänzung des Modells der RP2 ergänzt um die Verdichterleistung als vierten Parameter („RP2+“), zum anderen eine Weiterentwicklung ausgehend vom neu gebildeten Parameter Transportwurzelmoment.

In Abwägung aller konzeptionellen, regulatorischen und statistischen Kriterien inklusive Second-Stage-Analyse wurde das Modell RP2+ gewählt, als Effizienzvergleichsmodell der RP3 spezifiziert und einer abschließenden Validierung unterzogen. Gestützt auf dieses Modell beträgt die Effizienz der Netzbetreiber im Basisjahr im Durchschnitt sehr gute 98.1%. Der minimale Effizienzwert liegt bei 77.7%. Von 16 Netzbetreibern werden 13 als effizient eingestuft und erhalten einen Effizienzwert von 100%. Die Werte liegen im Rahmen der zweiten Regulierungsperiode, wie **Abbildung 39** zeigt (hellrote Säulen stellen die vier in der RP3 erstmals teilnehmenden Netzbetreiber dar).

Abbildung 39: Bestabgerechnete Effizienzwerte im Vergleich zur RP2



7 Referenzen

- Agrell, P. J. and P. Niknazar, (2014) Structural and Behavioral Robustness in Applied Best-practice Regulation, Socio-Economic Planning Sciences.
- Aigner, D., C. A. K. Lovell, and P. Schmidt (1977). Formulation and estimation of stochastic frontier production function models. *Journal of Econometrics*, 6(1), 21-37.
- BAFA (2016). Entwicklung des deutschen Gasmarktes (monatliche Bilanz 1998 – 2016).
- Banker, R.D. (1996), Hypothesis Tests Using Data Envelopment Analysis, *Journal of Productivity Analysis*, 7, 139-159
- Banker, R.D., Chang, H., & Cooper, W. W. (1996). Simulation studies of efficiency, returns to scale and misspecification with nonlinear functions in DEA. *Annals of Operations Research*, 66(4), 231-253.
- Banker, R.D., Charnes, A., Cooper, W.W., Swarts, W., Thomas, D., (1989). An introduction to data envelopment analysis with some of its models and their uses. *Research in governmental and nonprofit accounting* 5 (1) 125-163.
- Benford F. (1938). The Law of Anomalous Numbers. In: *Proceedings of the American Philosophical Society (Proc. Amer. Phil. Soc.)*, 551–572, Philadelphia.
- Björnsen Beratende Ingenieure (2017). Gutachten zur Erstellung gebietsstruktureller Daten – FNB Gas. Methodendokumentation im Auftrag der Bundesnetzagentur.
- Bogetoft, P. (2012) *Performance Benchmarking – Measuring and Managing Performance*, Springer New York 2012.
- Bogetoft, P. and L. Otto (2011), *Benchmarking with DEA, SFA, and R*, Springer New York, 2011.
- Charnes, A., W. Cooper, and E. Rhodes (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, 2, 429-444.
- Consentec (2010). Durchführung einer Kostentreiberanalyse für Effizienzvergleiche gem. § 22 ARegV für die überregionalen Fernleitungsnetzbetreiber Gas, insbesondere unter Verwendung analytischer Kostenmodelle.
- Consentec (2012). KTA - Durchführung einer Kostentreiberanalyse für Effizienzvergleiche gemäß § 22 ARegV für Gasfernleitungsnetzbetreiber insbesondere unter Verwendung analytischer Kostenmodelle.
- Filippini, M., P.J. Agrell, M. Farsi, M. Koller (2011). Messung der produktiven Effizienz in EVU – Eine Anwendung zur Anreizregulierung in der Schweiz. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Energie (BFE). Centre for Energy Policy and Economics, ETH Zürich.
- Frontier Economics / Consentec (2012). Anlage A.BM –Effizienzvergleich für Verteilernetzbetreiber Gas. Bericht im Auftrag der Bundesnetzagentur.
- Frontier Economics / Consentec (2013) Anlage A.BM Effizienzvergleich für Gasfernleitungsnetzbetreiber. Bericht im Auftrag der Bundesnetzagentur.
- Hyndman Rob J. , Yanan Fan (1996). Sample Quantiles in Statistical Packages, *The American Statistician*, Bd. 50, Nr. 4, S. 361-365.

- IEA (2016). Medium-Term Gas Market Report 2016.
- Knieps, G. (2009). „Sektorsymmetrische Regulierung in Netzsektoren: Ein Vergleich zwischen Gas und Elektrizität.“ Diskussionsbeitrag Institut für Verkehrswissenschaft und Regionalpolitik Nr. 126 – Juni 2009.
- NEP (2015). Netzentwicklungsplan Gas 2015.
- NEP (2016). Netzentwicklungsplan Gas 2016.
- Newcomb, S. (1881). Note on the Frequency of the Use of different Digits in Natural Numbers. In: American journal of mathematics (Amer. J. Math.), 39–40, Baltimore.
- Steger U., Büdenbender U., Feess E., Nelles D. (2008). Die Regulierung elektrischer Netze: Offene Fragen und Lösungsansätze. Springer Verlag, S. 174 ff.
- SUMICSID (2007). Development of Benchmarking models for Electricity and Gas DSOs.
- Swiss Economics (2014). Effizienzvergleich für Verteilernetzbetreiber Strom 2013 – Ergebnisdokumentation und Schlussbericht. Bericht im Auftrag der Bundesnetzagentur.
- White, H. and MacDonald, G. M. (1980). Some large-sample tests for nonnormality in the linear regression model (with comment by S. Weisberg). Journal of the American Statistical Association, 75:16–31.

I Parameterdefinitionen und -berechnungen

Dieser Anhang erläutert die Berechnung ausgewählter Parameter aus den erhobenen Strukturdaten der Fernleitungsnetzbetreiber (FNB) im Rahmen des Effizienzvergleichs zur dritten Regulierungsperiode (RP3). **Anhang II** umfasst die vollständige Liste der im Rahmen der Datenquittung den Netzbetreibern bereitgestellten Parameter.

I.1 Vorbereitungen im Datensatz

I.1.1 Umrechnung von Gauß-Krüger Koordinaten zu UTM32 Koordinaten

Die Netzbetreiber konnten ihre Koordinaten in zwei unterschiedlichen Projektionen angeben (neun Netzbetreiber UTM Zone 32N, EPSG-Code 25832; sieben Netzbetreiber Gauß-Krüger-Zone 3, EPSG-Code 31467). Da jedes kartesische (rechtwinklige) Koordinatensystem zwangsläufig gewisse Verzerrungen aufweist, werden alle Koordinaten in ein einheitliches System umgerechnet, um sämtliche Netzbetreiber auf derselben Basis zu beurteilen. Da die Mehrheit der Netzbetreiber UTM Zone 32N (UTM32) verwendet, werden die Gauß-Krüger Koordinaten mittels der Umrechnungstabelle des Dienstleistungszentrums des Bundes für Geoinformation und Geodäsie (DLZ) mit Genauigkeit im Submeterbereich (NTv2-Transformation)⁵¹ in die UTM32-Projektion überführt. Die umgerechneten Koordinaten werden den Netzbetreibern im Rahmen der Datenquittung zur Verfügung gestellt.

I.1.2 Behandlung von Fremdnutzungsanteilen, Biogas und Investitionsmaßnahmen sowie virtuellen Punkten

Tabelle 31 stellt die Grundsätze bei der Berücksichtigung von angegebenen Netzkopplungs-/Netzanschlusspunkten (NKP/NAP) und Leitungen für Biogas oder aus Investitionsmaßnahmen sowie Fremdnutzungsanteile und virtuelle Ein- und Ausspeisepunkte dar und ordnet diese entlang der drei grundlegenden FNB-Versorgungsdimensionen Transport, Kapazitäts- und Dienstleistungsbereitstellung (Details vgl. 4.2.2).

⁵¹ <https://upd.geodatenzentrum.de>

Tabelle 31: Übersicht Bereinigung Parameter

	Transport („Arbeit“)	Kapazität („Leistung“, „Vorhaltung“)	Dienstleistung („Anschluss“)
Parametergruppen	Jahresarbeit	Jahreshöchstlast	Ein- und Ausspeisepunkte
	Mittlere Transportdistanz*	Rohrdurchmesser	Leitungslänge
		Transportmoment*	Fläche*
		Transportwurzelmoment*	
		Verdichter, Regler	
		Gasmischstationen	
		Ein- und Ausgangsdruck	
	Horiz. Transport Arbeit	Horiz. Transport Leistung	
Assets aus Biogas- / Investitionsmaßnahmen	Nicht herausgerechnet	Herausgerechnet bei nicht GIS-basierten Parametern	Herausgerechnet bei nicht GIS-basierten Parametern
Fremdnutzungsanteile	Korrigiert/ausgerechnet	Korrigiert/ausgerechnet	Nicht korrigiert/ nicht herausgerechnet
Virtuelle NKP/NAP	Berücksichtigt bei GIS-basierten Parametern bei denen die Vollständigkeit von Teilnetzen vorausgesetzt wird		

*GIS-basierte Parameter
Quelle: Eigene Darstellung

Im oberen Teil der Tabelle sind als Erläuterung die der jeweiligen Versorgungsdimension zugehörigen Parametergruppen aufgeführt (teilweise auch weiter differenziert, falls innerhalb einer Gruppe die Einzelparameter unterschiedlichen Versorgungsdimensionen zugeordnet wurden). Im unteren Teil der Tabelle ist angegeben, wie bei der Bereinigung im Grundsatz vorgegangen wird.⁵² Die Details hierzu sind nachfolgend ausgeführt.

Fremdnutzungsanteile

Die Netzbetreiber nutzen verschiedenste Anlagen gemeinsam (z.B. Leitungen, NKP/NAP, Verdichter) und waren angehalten, entsprechende Fremdnutzungsanteile anzugeben bzw. Angaben nur mit Bezug auf den eigenen Bedarf zu machen. Z.B. wurden die FNB darauf hingewiesen, bezüglich der Größen Jahresarbeit und Jahreshöchstlast etwaig enthaltene Anteile von anderen FNB aus den eigenen Angaben herauszurechnen.

Fremdnutzungsanteile werden bei den einzelnen Parametern – wie nachfolgend in Abschnitt I.2 beschrieben – bereinigt. Dabei gelten folgende Grundsätze:

- Bei Parametern, welche v.a. die Transport- und Kapazitätsdimension zum Ausdruck bringen (Spalten 2 und 3 in Tabelle 31, insb. Arbeit und Leistung), wird – sofern nicht schon vom FNB durchgeführt – der Fremdnutzungsanteil zum Abzug gebracht, da diese fremdgenutzten Anteile erstens der eigenen Kundschaft i.d.R. nicht zur Verfügung stehen und zweitens auch entsprechend abgegolten sind. Der Rohrdurchmesser wird dabei zur Kapazitätsbereitstellung gezählt, da ein höherer Innendurchmesser c.p. eine höhere Kapazität ermöglicht.

⁵² Kombinierte Parameter wie die Transportmomentfläche sind nicht aufgeführt, da deren Bereinigung sich aus den aufgeführten Grundparametern ergibt (z.B. Polygonfläche und Transportmoment für Transportmomentfläche).

- Für Parameter der Dienstleistungsdimension (Spalte 4 in Tabelle 31), z.B. Anzahl Anschlusspunkte oder Leitungskilometer, erfolgt keine Korrektur, da die Dienstleistung gegenüber der Kundschaft durch die Fremdnutzung i.d.R. nicht eingeschränkt ist.

Rohrvolumen als Multiplikation von Rohrrinnendurchmesser und Leitungsabschnittslänge wird damit implizit via Anpassung des Rohrrinnendurchmessers korrigiert.

Biogas und Investitionsmaßnahmen

Die Kosten im Zusammenhang mit Biogas und Investitionsmaßnahmen sind bereits anderweitig geprüft und genehmigt, so dass sie im Rahmen eines Effizienzvergleichs zu den nicht (mehr) beeinflussbaren Kosten zählen und zur Vermeidung einer Doppelprüfung nicht in die dem Effizienzvergleich zugrunde gelegten Totex/sTotex eingehen. Konsequenterweise muss dies auch auf der Seite der Vergleichsparameter berücksichtigt werden. Die Datengrundlage der untersuchten Parameter wird daher vor der weiteren Verwendung gemäß Abschnitt I.2 in der nachfolgend beschriebenen Weise bereinigt:

- Bei Parametern der Kategorien Kapazitäts- und Dienstleistungsbereitstellung (Spalten 3 und 4 in Tabelle 31) werden Punkte und Leitungen aus Biogas- und Investitionsmaßnahmen nicht berücksichtigt, da diese Kostenbestandteile vollständig anrechenbar sind und somit nicht in den Effizienzvergleich einfließen. Ausnahme sind die GIS-basierten Parameter (mit Stern markiert in Tabelle 31, z.B. Polygonfläche oder Transportmoment). Für diese Parameter wird die Versorgungsaufgabe möglichst vollständig abgebildet, da bei diesen GIS-basierten Parametern die Versorgungs- und Transportaufgabe erfasst werden soll, die sich aus der Kombination der verschiedenen Ein- und Ausspeisepunkte ergibt. Z.B. stehen beim Transportmoment die sich ergebenden Flüsse zwischen Ein- und Ausspeisungen im Vordergrund, und als solches die Herausforderungen im Röhrensystem, um die Kombination von Ein- und Ausspeisungen zu jedem Zeitpunkt bewältigen zu können. Um diese Aspekte der Versorgungsaufgabe abzubilden, werden für diese Parameter Einspeisungen aus Biogas und Investitionsmaßnahmen berücksichtigt.
- Bei Parametern der Transportdimension (Spalte 2 in Tabelle 31) ist der operative Transportaufwand – z.B. von den Biogas-Einspeisepunkten zu den jeweiligen Ausspeisepunkten – nicht abgegolten. Zur näherungsweisen Berücksichtigung erfolgt daher für diese Berechnung ebenfalls keine Bereinigung der anderweitig genehmigten/geprüften Infrastruktur.

Teilnetzbildung und virtuelle NKP/NAP

Für die Bildung ausgewählter Parameter werden durch eigene Leitungsabschnitte zusammenhängende Netzelemente (Knoten, NKP/NAP, Druckregler/Verdichter, Leitungsabschnitte) gleicher Gasqualität identifiziert.⁵³ Für diese Parameter wird ein Teilnetz nur dann gezählt, wenn es vollständig ist in dem Sinne, dass es über mindestens einen Einspeise- sowie Ausspeisepunkt verfügt, da ansonsten keine Gasversorgung erfolgen kann („**vollständiges Teilnetz**“).

Wegen spezieller Leitungskonstellationen können allerdings unvollständige Teilnetze entstehen, welche eigentlich angebunden sind.⁵⁴ Den Netzbetreibern wurde daher die Möglichkeit

⁵³ Ein Netzbetreiber, der zwei Gasqualitäten transportiert, hat somit mindestens zwei Teilnetze.

⁵⁴ Z.B. wenn ein Netzbetreiber zur Versorgung eines Netzabschnittes ohne Einspeisepunkt unentgeltlich von einem

gegeben, virtuelle Einspeise- und Ausspeisepunkte anzugeben. Insgesamt fünf FNB haben hier von Gebrauch gemacht. Virtuelle Punkte werden bei der Bildung der GIS-basierten Parameter berücksichtigt, für die die Vollständigkeit von Teilnetzen vorausgesetzt wurde (z.B. nachfolgend yArea, aber nicht yArea_all). Bei der Beurteilung der Validität der Teilnetze werden Punkte aus Biogas- und Investitionsmaßnahmen ebenfalls berücksichtigt (vgl. oben).

I.1.3 Datengrundlage für Arbeit- und Lastangaben

Verwendung von Normkubikmeter-Angaben

Arbeit- und stündliche Lastangaben liegen i.d.R. sowohl als Normkubikmeter (m_n^3) als auch in Form von Energiegehalt (kWh) vor.

Erdgas wird im Wesentlichen zum Heizen und Kochen, in der chemischen Industrie, zur Stromerzeugung und z.T. auch als Treibstoff verwendet. In all diesen Anwendungen besteht der Wert der gelieferten Gasmenge aus seinem Energieinhalt. Auf Lieferantenseite werden jedoch unterschiedliche Gasqualitäten angeboten und vermarktet, die sich in ihrem Energieinhalt unterscheiden und in separaten Gasnetzen transportiert werden müssen (L-Gas / H-Gas). Grundsätzlich ist zu beachten, dass aus Sicht eines Netzbetreibers der Aufwand nicht durch die transportierte Energie, sondern durch die zu transportierende Gasmenge bestimmt wird. Insofern sollte idealerweise die Netzbelastung in Normkubikmetern angegeben werden. Aufgrund der für jedes Marktgebiet weitgehend festen Verhältnisse von Energiemenge je Normkubikmeter und der Unempfindlichkeit der Effizienzanalyse ggü. Normierungen können die Abweichungen vernachlässigt werden, die sich durch die Verwendung der Energiemengen ergeben.

Bei der Parameterbildung wird daher jeweils der Normkubikmeter-Wert verwendet.

Datengrundlage bei Bruchteilseigentum

Bei Netzpunkten an Bruchteilsgemeinschaften und Leitungsgesellschaften liegen in der Regel keine scharfen Messwerte nach Netzbetreiber für die geflossenen Gasmengen vor. Die FNB haben in diesem Fall überwiegend die auf sie bezogenen Allokationsdaten gemeldet. Als weitere Variante wurde das vertraglich geregelte jeweils eigene Kapazitätsnutzungsverhältnis für die Bruchteilsleitung von den FNB verwendet. Als Folge wurden von den Netzbetreibern die jeweiligen Daten sowohl gestützt auf Allokationsdaten als auch anhand vertraglicher Kapazitätsnutzungsverhältnisse abgefragt. Da bei internen Netzkoppelpunkten keine Allokationsdaten vorliegen, wurden hier die Daten von den FNB, sofern nicht bekannt, geschätzt.

Während das Kapazitätsnutzungsverhältnis die vertraglich vereinbarten Kosten der Netzbetreiber besser abbilden dürfte, stellen Allokationsdaten die effektive Nutzung bzw. Vermarktung der Infrastruktur durch die jeweiligen Netzbetreiber dar. Die Netzbetreiber haben im Rahmen der Konsultation überwiegend auf die nicht sachgerechte Verwendbarkeit des Kapazitätsnutzungsverhältnisses verwiesen. Hierbei müsste immer von einer Vollausslastung der Leitung ausgegangen werden, was in der Realität nicht der Fall sei. Ansonsten würde der Netzbetreiber, welcher den eigenen Leitungsanteil vermehrt nutzt, benachteiligt und der nicht voll ausschöp-

anderen Netzbetreiber einen einzelnen Leitungsabschnitt nutzen darf und ein Übergangspunkt zwischen den beiden Netzbetreibern nicht existiert bzw. nicht gemessen wird. In diesem Fall wäre der betroffene Netzabschnitt – obwohl versorgt – kein vollständiges Teilnetz, da der Abschnitt in den Angaben des Netzbetreibers über keine Leitungsverbindung zum Hauptnetz verfügt.

fende Netzbetreiber bevorteilt. Die Bundesnetzagentur ist hier der Argumentation der FNB gefolgt, welche sich für eine Verwendung der Allokationsdaten ausgesprochen haben. Auch wenn bei der Variante der Allokationsdaten gegebenenfalls Kapazitäten des Bruchteilspartners genutzt wurden, so geschah dies auf gegenseitiger Basis und unter Förderung der Versorgungssicherheit.

Behandlung nicht regulierter Anteile

Eine weitere Frage betrifft nicht regulierte Anteile der OPAL. Diese Leitung nimmt eine Sonderstellung im deutschen Fernleitungssystem ein, da neben einem regulierten auch ein nichtregulierter Teil besteht. Es wurden zwei Varianten der Behandlung geprüft: Erstens die Nicht-Berücksichtigung regulierter Kostenanteile und eine entsprechende Anpassung von Vergleichsparametern soweit möglich, wobei allerdings wesentliche Parameter wie Leitungslängen unverändert bleiben. In einer zweiten Variante gehen in den Effizienzvergleich auch nicht regulierte Anteile ein, mit entsprechenden durchwegs kohärenten Aufwand- und Vergleichsparametern, der Effizienzwert wird später jedoch nur auf regulierte Kostenanteile angewendet. Aufgrund konzeptioneller Überlegungen und umfangreicher Auffälligkeits- und Ausreißeranalysen mit einer resultierenden starken Auffälligkeit und Dominanz der betroffenen Netzbetreiber in Variante 1 wurden die Daten gemäß Variante 2 verwendet.

I.2 Parameterdefinitionen

I.2.1 Rohrgeometrie: Leitungslängen, Rohrleitungsvolumen und Rohrleitungsmantelfläche

Zur Bestimmung der **Leitungslänge** und dem **Rohrleitungsvolumen** werden die Angaben der Netzbetreiber der einzelnen Leitungsabschnitte verwendet. Bestehende Fremdnutzungsanteile werden beim Rohrvolumen herausgerechnet (direkt anhand der Angaben der Netzbetreiber hierzu), nicht aber bei Leitungslängen (vgl. auch Abschnitt I.1.2).

Die **Rohrleitungsmantelfläche** der Leitungen wird wie in der zweiten Regulierungsperiode (RP2) nicht als Projektionsfläche, sondern als Mantelfläche als geometrisch definierte Zylinderoberfläche berechnet, wobei die Fremdnutzungsanteile jeweils herausgerechnet werden.

Zur Berechnung werden analog zur RP2 die Angaben der Netzbetreiber „Netzlänge der Leitung in km“ l sowie das um Fremdnutzungsanteile bereinigte „Rohrvolumen (Raumvolumen) der Leitung in m^3 “ v je Leitungsabschnitt i verwendet, wobei folgende Formel zur Anwendung kommt:

$$\text{Rohrleitungsmantelfläche [m}^2\text{]} = \sum_i \pi \cdot l_i \cdot 1000 \cdot \sqrt{\frac{v_i \cdot 4}{\pi \cdot l_i \cdot 1000}}$$

Innendurchmesser
bereinigt

Strikt genommen handelt es sich um die Rohrleitungsmantelfläche. Die Länge [km] wird dabei mit 1000 multipliziert, damit Meter resultieren. Der so zur Anwendung kommende implizite Innendurchmesser entspricht aufgrund des um Fremdnutzungsanteile bereinigten Rohrvolumens v nicht mehr demjenigen, der vom Netzbetreiber angegeben wurde.

I.2.2 Jahresarbeit

Für die Jahresarbeit (Q_{Jahr}) werden die summarischen Angaben der Netzbetreiber für Ein- bzw. Ausspeisungen je Gasqualität addiert (Ref. 2.1.1 + 9.1.1 für eingespeiste Jahresarbeit bzw. Ref. 2.2.1 + 9.2.1 für ausgespeiste Jahresarbeit).⁵⁵

Exkurs

Für die Jahresarbeit können zwei Datenquellen der Netzbetreiber herangezogen werden:

- die summarischen Angaben zu H- und L-Gas ($Q_{JahrH,L}$) für Ein- bzw. Ausspeisung;
- die Angaben zu den einzelnen NKP/NAP ($Q_{JahrNKP}$), welche für Ein- bzw. Ausspeisepunkte addiert werden können.

Nicht bei allen Netzbetreibern sind die beiden Werte identisch, was z.B. auf Abgrenzungsprobleme bei den einzelnen Punkten bei gemeinsamer Nutzung zurückzuführen ist. Daher werden die Angaben zu $Q_{JahrNKP}$ je Gasqualität separat für Ein- bzw. Ausspeisepunkte n gemäß der nachfolgenden Formel auf den jeweiligen Wert von Q_{JahrH} bzw. Q_{JahrL} normiert.⁵⁶ Bei einzelnen FNB, bei denen die Summe der Einzelwerte je Gasqualität dem Gesamtwert der Jahresarbeit entspricht, ändert sich bei dieser Normierung nichts. Im Folgenden werden die weiteren Untersuchungen zunächst mit den korrigierten Einzelwerten $Q_{JahrN,n}$ durchgeführt, welche nachfolgend als Q_{Jahr} referenziert werden.

$$Q_{Jahr} \equiv Q_{JahrH,L} = \sum_n Q_{JahrN,n} = \sum_n \underbrace{Q_{JahrNKP,n} \cdot \frac{Q_{Jahr}}{\sum_n Q_{JahrNKP,n}}}_{\equiv Q_{JahrN,n}}$$

I.2.3 Last: Netzlast und Jahreshöchstlast

Jahreshöchstlast

Für die Jahreshöchstlast werden wie in der RP2 jeweils ein zeitgleicher und ein zeitungleicher Wert berechnet.

Die **zeitgleiche Jahreshöchstlast** (auch „Netzlast“ genannt) leitet sich direkt aus den summarischen Angaben der Netzbetreiber gemäß Ref. 3.1.1. + Ref. 10.1.1. der Abfrage ab, wobei um Investitionsmaßnahmen und Biogas bereinigt wird (Ref. 3.1.3/4 bzw. 10.1.3/4).

Die **zeitungleiche Jahreshöchstlast** errechnet sich als Summe der maximalen stündlichen Ein- bzw. Ausspeisemengen ($Q_{maxEinsp}$ bzw. $Q_{maxAussp}$) je NKP/NAP n , wobei Punkte für Investitionsmaßnahmen und Biogas nicht gezählt werden.

$$y_{Peakload.injec.Qmax} [m^3/h] = \sum_n Q_{maxEinsp,n}$$

$$y_{Peakload.deliv.Qmax} [m^3/h] = \sum_n Q_{maxAussp,n}$$

⁵⁵ Angaben zu Reitern und „Ref.“ im vorliegenden Dokument beziehen sich auf Reiter und die nummerierten Datenkategorien im von der BNetzA festgelegten Erhebungsbogen.

⁵⁶ Die Berechnung des Normierungsfaktors $\frac{Q_{Jahr}}{\sum_n Q_{JahrNKP,n}}$ erfolgt also separat für Einspeisungen H-Gas, Einspeisungen L-Gas, Ausspeisungen H-Gas und Ausspeisungen L-Gas, jeweils für alle gemeldeten NKP/NAP, die nicht virtuell sind. Die Normierung erfolgt anschliessend für alle Punkte einschliesslich virtueller Punkte.

Die zeitungleiche Jahreshöchstlast entspricht so der im Basisjahr anhand der Q_{max} -Daten maximalen denkbaren Last im Netz und sollte entsprechend höher liegen als die zeitgleichen Angaben der Netzbetreiber.

und sollte entsprechend höher liegen als die zeitgleichen Angaben der Netzbetreiber.

I.2.4 Anschlüsse: Ein- und Ausspeisepunkte

Die Angaben zu den Ein- und Ausspeisepunkten werden dem Reiter NKP/NAP entnommen. Zur Berechnung der Anzahl NKP/NAP werden die Angaben in einem ersten Schritt wie folgt um Redundanzen bereinigt, wobei die Gasqualitäten nicht differenziert und Fremdnutzungsanteile nicht korrigiert werden (es gibt also keine halben Punkte):

- Einspeisepunkte ohne Einspeisung bzw. Ausspeisepunkte ohne Ausspeisung werden nicht korrigiert und somit berücksichtigt (im Sinne von Kapazitätsbereitstellung), jedoch werden Punkte aus Biogas- oder Investitionsmaßnahmen sowie virtuelle Punkte nicht berücksichtigt;
- Mehrere Einspeisepunkte mit derselben Punktfunktion (z.B. 2x Entry NKP am selben Koordinatenstandort, also nicht gemessen an der angegebenen Standort-ID, sondern an der Koordinate, unabhängig von der Gasqualität, analog RP2) gelten als ein Einspeisepunkt. Analoges gilt für Ausspeisepunkte.
- Für die Anzahl der Ein- und Ausspeisepunkte insgesamt (RP2: Anzahl NKP/NAP) werden Ein- und Ausspeisungen am selben Koordinatenstandort als ein Punkt gezählt (d.h. die Summe der um Redundanzen korrigierten Ein- und Ausspeisepunkte ergibt nicht die Anzahl NKP/NAP, wenn an mindestens einem Koordinatenstandort ein Ein- und Ausspeisepunkt (als zwei einzelne Punkte) angegeben wurde).

Zu den so berechneten Parametern werden in einem zweiten Schritt wiederum Punkte angerechnet, die speziellen, von den Netzbetreibern gemeldeten Konstellationen geschuldet sind. Entsprechende Angaben wurden von der BNetzA bereitgestellt. Hierunter fallen Punkte mit doppelter Infrastruktur, im Einzelnen bidirektionale Punkte, gleichzeitige H- und L-Gas-Punkte, Punkte mit unterschiedlichen Punktfunktionen sowie Punkte aus individuellen Hinweisen durch die Netzbetreiber.

Hinsichtlich Fremdnutzungsanteilen sind bei den NKP/NAP-Angaben generell keine Korrekturen notwendig. Das heißt, dass die Angaben sich mit Ausnahme von $Q_{max\,gesamt}$ auf den einzelnen Netzbetreiber beziehen und Jahresarbeit und Jahreshöchstlast somit punktscharf angegeben sind.

I.2.5 Druck: Eingangsdruck, Ausgangsdruck, Druckdifferenz und (mittleres) Druckniveau

Die Angaben zum Druck werden dem Reiter NKP/NAP entnommen, welcher für alle Ein- und Ausspeisepunkte die relevanten Angaben enthält.

- **Eingangsdruck, Ausgangsdruck, Druckdifferenz:** Zur Berechnung des mittleren Ein- und Ausgangsdruckes wird der Druck p je NKP/NAP n mit der angegebenen Ein- bzw. Ausspeisemenge Q gewichtet. Die mittlere Druckdifferenz ist die Differenz der beiden Werte:

$$\text{Eingangsdruck [bar]} = \frac{\sum_n (p_n \cdot Q_{Einsp,n})}{\sum_n Q_{Einsp,n}}$$

$$\text{Ausgangsdruck [bar]} = \frac{\sum_n (p_n \cdot Q_{\text{Aussp},n})}{\sum_n Q_{\text{Aussp},n}}$$

$$\text{Druckdifferenz [bar]} = \text{Eingangsdruck} - \text{Ausgangsdruck}$$

- **Druckniveau:** Das mittlere Druckniveau wird ebenfalls analog zur RP2 berechnet und ergibt sich durch Gewichtung des Druckniveaus je Punkt mit dessen Ein- bzw. Auspeisung.

$$\text{Druckniveau [bar]} = \frac{\sum_i p_n \cdot (Q_{\text{Einsp},n} + Q_{\text{Aussp},n})}{\sum_i (Q_{\text{Einsp},n} + Q_{\text{Aussp},n})}$$

Dabei liegen verschiedene Druck- und Mengenangaben vor. In der RP2 wurde der minimale Druck (als Maximum von vertraglichem und technischem Druck) mit Q_{max} gewichtet. Für die so festgelegten Parameter konnte in RP2 keine wesentliche Kostenwirkung nachgewiesen werden. In der RP3 sollen nun die in **Tabelle 32** aufgeführten Varianten geprüft werden. Die Prüfung der im Vergleich zur RP2 neuen Varianten war in der RP2 noch nicht möglich, da punktscharfe Angaben zum mengengewichteten Betriebsdruck, zur Unterscheidung von minimalem technischen und vertraglichen Druck sowie zur Jahresarbeit noch nicht vorlagen. Da die Angaben der Netzbetreiber insb. bezüglich vertraglichem Druck nicht vollständig sind, scheidet diese Variante aus, nicht aber das Maximum von vertraglichem und technischem Druck. Der mengengewichtete Betriebsdruck enthält bereits die Jahresarbeit des Punktes. Daher ist es konsistent, wenn die Betriebsdrücke der Punkte untereinander ebenfalls anhand ihrer Jahresarbeit gewichtet werden. Zu Wahrung der Konsistenz für alle mit dem Parameter Jahresarbeit berechneten Werte, werden je NKP/NAP korrigierte Werte für die Jahresarbeit zugrunde gelegt (vgl. Abschnitt I.2.2).

Tabelle 32: Untersuchte Varianten für die Druckparameter

	Gewichtet mit Leistung – Q_{max}	Gewichtet mit Arbeit – Q_{Jahr}
Minimaler Druck (als Maximum von technischem und vertraglichem Druck)	yPressure_In_Pmin_Qmax	yPressure_In_Pmin_Qyear
	yPressure_Out_Pmin_Qmax	yPressure_Out_Pmin_Qyear
	yPressure_Diff_Pmin_Qmax	yPressure_Diff_Pmin_Qyear
	yPressure_Level_Pmin_Qmax	yPressure_Level_Pmin_Qyear
Mengengewichteter Betriebsdruck⁵⁷		yPressure_In_Poperating_Qyear
		yPressure_Out_Poperating_Qyear
		yPressure_Diff_Poperating_Qyear
		yPressure_Level_Poperating_Qyear

Quelle: Eigene Darstellung

I.2.6 Verdichter

Bei der Bildung der drei Verdichterparameter (Anzahl, Leistung, Treibenergie) wurden die Angaben der Netzbetreiber gemäß den Strukturdaten I je Gasqualität zugrunde gelegt, wobei um Fremdnutzungsanteile sowie Biogas- und Investitionsmaßnahmen bereinigt wurde.⁵⁸

⁵⁷ Bei fehlenden Werten wird P_{min} verwendet.

⁵⁸ Aufgrund dieser Korrektur wurden die Parameter ursprünglich mit der Endung „_corr“ geführt, was in der Schlussversion des Gutachtens aus Kohärenzgründen mit anderen analog „korrigierten“ Parametern ohne gleichlautende Endung weggelassen wurde.

I.2.7 Polygonfläche

Die Polygonfläche entspricht der Fläche der konvexen Hülle aller einem Netz zugehörigen Standorte. Dabei wird wie in der PR2 nach Gasqualität unterschieden. Die Polygonfläche für das gesamte Netz ergibt sich durch Addition der Flächen von H- und L-Gas.

Es werden zwei Varianten berechnet. In einer ersten Variante (yArea) werden je Gasqualität die Flächen der vollständigen Teilnetze im Sinn von Abschnitt I.1.2 addiert, wobei überlappende Flächenabschnitte nur einmal gezählt werden (geometrische Vereinigung aller Teilnetze je Gasqualität). Es handelt sich um die Fläche, die gemäß den Angaben der Netzbetreiber physikalisch beliefert werden kann.

In einer zweiten Variante (yArea_all) wird die konvexe Hülle je Gasqualität um alle vom Netzbetreiber gemeldeten Anschlusspunkte und Anfangs- und Endpunkte von Leitungsabschnitten gelegt, unabhängig davon, ob die verschiedenen Punkte auch gemäß den Daten der Netzbetreiber miteinander verbunden sind.

I.2.8 Transportmoment und mittlere Transportentfernung

Das Transportmoment wurde aus der RP2 übernommen und „ist eine Rechengröße, die in logistischen Systemen als Kenngröße und als Zielgröße für Optimierungen verwendet wird. Für den Gasfernleitungstransport ist das Transportmoment als ein exogener Kostentreiber für die Beschreibung der Netzaufgabe geeignet“ (CONSENTEC, 2012). Beim Transportmoment werden die zu transportierenden Mengen je Zeiteinheit so von allen Ein- auf alle Ausspeisepunkte verteilt, dass das Gas auf möglichst kurzem Weg zirkuliert. Das Transportmoment selbst ergibt sich durch Multiplikation bzw. Gewichtung aller berechneten Mengenflüsse je Zeiteinheit mit der jeweiligen zurückzulegenden Distanz und sagt somit aus, wie viele Kubikmeter Gas durch wie viele Leitungsmeter fließen, um die Versorgungsaufgabe zu erfüllen.

Grundsätzliche Bildung des Transportmoments

Das Transportmoment wird analog zur Polygonfläche je Gasqualität separat gebildet. Ebenfalls werden Varianten gerechnet, bei denen vollständige Teilnetze ausgewertet werden, womit je Gasqualität weitere Teilnetze entstehen können. Das Transportmoment berechnet sich grundsätzlich durch Multiplikation von **Durchfluss** und **Transportentfernung (Distanz)** in einem Netz.

Für die Berechnung des Transportmoments müssen je Teilnetz die Summen der Ein- und Ausspeisemengen der Einspeise- bzw. Ausspeisepunkte identisch sein. Da dies in den Daten nicht notwendigerweise gegeben sein muss, wird jeweils auf das Maximum der Summe aller Ein- oder Ausspeisemengen skaliert („Durchfluss“).

Konkret werden je Teilnetz t die Ein- bzw. Ausspeisemengen der dem Teilnetz zugehörigen NKP/NAP n wie folgt skaliert⁵⁹:

Falls $\sum_n \text{Einspeisung}_{t,n} \geq \sum_n \text{Ausspeisung}_{t,n}$:

$$\text{Ausspeisung}_{t,skaliert} = \frac{\sum_n \text{Einspeisung}_{t,n}}{\sum_n \text{Ausspeisung}_{t,n}} * \text{Ausspeisung}_{t,n} \equiv \text{Durchfluss}_{t,n}$$

⁵⁹ Es wird also an den je NKP/NAP von den Netzbetreibern angegebenen Mengen Q_{\max} bzw. Q_{Jahr} angesetzt und nicht an deren Kennzeichnung als Einspeise- oder Ausspeisepunkt.

Falls $\sum_n \text{Einspeisung}_{t,n} < \sum_n \text{Auspeisung}_{t,n}$:

$$\text{Einspeisung}_{t,skaliert} = \frac{\sum_n \text{Auspeisung}_{t,n}}{\sum_n \text{Einspeisung}_{t,n}} * \text{Einspeisung}_{t,n} \equiv \text{Durchfluss}_{t,n}$$

Das Transportmoment in einem Teilnetz wird berechnet, indem das Produkt von Durchfluss und Transportentfernung (Distanz) unter Berücksichtigung der nachfolgenden Nebenbedingungen minimiert wird:

- Die (ggf. skalierten) eingespeisten Gasmengen müssen den (ggf. skalierten) ausgespeisten Gasmengen entsprechen;
- Zuordnung von Einspeisemengen zu Auspeisungen am gleichen Standort sind nicht zulässig, da angenommen wird, dass die zugrunde gelegten Ein- bzw. Auspeisungen zeitgleich auftreten (im Sinne des schwersten möglichen Belastungsfalls, analog RP2).
- Eine Einspeisung ins Netz von einem Speicherstandort aus darf nicht an einen anderen Speicherstandort geleitet werden (sog. Speichertausch). Dies entspricht dem Vorgehen aus RP2 und schließt einen in der Praxis i. d. R. nicht vorkommenden Fall bei zeitgleicher Betrachtung aus. Diese Restriktion gilt auch nur bei Teilnetzen mit mehr als einem Entry-Punkt, da mit nur einem Entry-Punkt diese Restriktion nicht erfüllt werden kann.

Formal wird je Teilnetz folgendes Problem gelöst, um das Transportmoment zu berechnen. Sei die Distanzmatrix gegeben durch $D = (D_{ab})_{a,b \geq 1}$, wobei ein Eintrag $D_{a,b}$ die Distanz zwischen Standort a und Standort b ist. Die Flussmatrix ist gegeben durch $F = (F_{ab})_{a,b \geq 1}$, wobei ein Eintrag $F_{a,b}$ den Gasfluss zwischen Punkt a und Punkt b darstellt. Das Transportmoment löst dann

$$\min_{(F_{ab})} \sum_{a,b \geq 1} F_{ab} D_{ab} \tag{1}$$

unter den Nebenbedingungen

$$\text{Durchfluss}_a = \sum_b F_{ab} \tag{2}$$

$$\text{Durchfluss}_b = \sum_a F_{ab} \tag{3}$$

$$\text{Nichtnegative Flüsse: } F_{ab} \geq 0, \forall a, b \tag{4}$$

$$\text{Ein- und Auspeisung am selben Standort nicht zulässig: } F_{aa} = 0, \forall a \tag{5}$$

Zeitgleiche Einspeisung aus Speichern in andere Speicher nicht zulässig:

$$F_{sp} = 0, \forall s, p \in \{\text{Speicherstandort}\} \tag{6}$$

Bei Teilnetzen mit nur einem Entry-Punkt wird das Transportmoment berechnet, indem das Optimierungsproblem (1) nur unter Berücksichtigung der Nebenbedingungen (2)-(4) gelöst wird. Die Standort- und Speicheraustauschrestriktionen werden nicht berücksichtigt.

Bei mehreren Teilnetzen je Netzbetreiber wird das Transportmoment als Summe aller Transportmomente der Teilnetze gebildet.

Da durch die multiplikative Verknüpfung von Distanz und Durchsatz hohe Werte resultieren, werden alle Werte zum Transportmoment zur besseren Lesbarkeit durch eine Million geteilt (gilt nicht für Transportmomentfläche).

Vorgehen bei zu restriktiven Nebenbedingungen

Die Nebenbedingungen (5) und (6) können dazu führen, dass die Menge der zulässigen Flussmatrizen leer ist und somit das Optimierungsproblem, beschrieben durch die Gleichungen (1)-(6), keine Lösung besitzt. In diesem Fall wird zuerst die Speichertauschrestriktion (6) weggelassen und das Optimierungsproblem (1)-(5) gelöst. Falls dann immer noch keine Lösung existiert wird auch noch die Nebenbedingung (5) weggelassen (analog RP2). Das Optimierungsproblem (1)-(4) besitzt vorliegend immer eine Lösung.

Zu untersuchende Varianten

Für die Transportmomentbildung gibt es verschiedene denkbare Varianten. Die berechneten Varianten werden entlang der folgenden Dimensionen gebildet:

- An den Anschlusspunkten ein- und ausgespeiste **Mengen** (Durchsatz):
 - „Leistung“ - analog RP2: Q_{max} der Einspeisungen bzw. Ausspeisungen, also die am entsprechenden Punkt maximale stündliche Ein- bzw. Ausspeisung in m^3/h ;
 - „Arbeit“: Q_{Jahr} der Einspeisungen bzw. Ausspeisungen, also die am entsprechenden Punkt innerhalb eines Jahres ein- bzw. ausgespeiste Arbeit in m^3 .⁶⁰
- Transportentfernung (**Distanzen**) zwischen den Anschlusspunkten:
 - „Luftliniendistanzen“ (LD): Euklidische Distanz zwischen Einspeise- und Ausspeisepunkten des betrachteten Netzes. Durchsatz und Transportentfernung werden je Gasqualität für alle angegebenen Anschlusspunkte berechnet unabhängig davon, ob sie gemäß den Angaben der Netzbetreiber zusammenhängen;
 - „Reale Distanzen“ (RD): Kürzest möglicher Weg von Einspeise- zu Ausspeisepunkten durch das im betrachteten Netz vorhandene Röhrensystem (Leitungsweg) ohne Berücksichtigung von Kapazitätsrestriktionen oder Richtungsbeschränkungen. Entsprechende Angaben haben in der RP2 noch nicht vorgelegen und werden nun erstmals ausgewertet. Die realen Distanzen können nur berechnet werden für zusammenhängenden Teilnetze (unter Berücksichtigung von virtuellen Punkten, vgl. Abschnitt I.1.2).

Die Kombination dieser Dimensionen ergibt die in **Tabelle 33** dargestellten Varianten für das Transportmoment. Parameter, denen als Mengen Q_{max} -Angaben zugrunde liegen, betonen die Anforderungen für die Auslegung der Netze, während Parameter auf der Basis von Q_{Jahr} mehr die Auslastung anzeigen. Parameter, die mit Luftliniendistanzen gebildet werden, drücken mehr den Aspekt der Versorgungsaufgabe aus, während Parameter mit realen Distanzen mehr die zu erfüllende Transportaufgabe betonen.

Tabelle 33: Parameternamen der Untervarianten bei der Transportmomentbildung

	Luftliniendistanzen für alle Punkte je Gasqualität	Reale Distanzen in zusammenhängenden Teilnetzen je Gasqualität
„Leistung“ (Q_{max})	yTransportmom_Qmax_LD	yTransportmom_Qmax_RD
„Arbeit“ (Q_{JahrN})	yTransportmom_Qyear_LD	yTransportmom_Qyear_RD

⁶⁰ Sofern der Netzbetreiber für die einzelnen Punkte insgesamt eine höhere oder niedrigere ein- bzw. ausgespeiste Jahresarbeit angegeben hat als die angegebene ein- bzw. ausgespeiste Jahresarbeit insgesamt für H- und L-Gas, erfolgt eine Normierung von Q_{Jahr} auf die angegebene ein- bzw. ausgespeiste Jahresarbeit insgesamt (Ref. 2.1.1+ 9.1.1 bzw. Ref. 2.2.1+ 9.2.1) (vgl. auch Exkurs oben).

Mittlere Transportentfernung

Aus den Eingangsparametern für die Transportmomentbildung kann zudem eine mittlere Transportentfernung errechnet werden.

Je Teilnetz entspricht die mittlere Transportentfernung den mit dem Durchfluss gewichteten Distanzen in km zwischen allen Ein- und Ausspeisepunkten. Je Teilnetz kann das errechnete Transportmoment direkt durch den Durchfluss je Teilnetz dividiert werden (rechte Seite der nachfolgenden Formel).

$$\text{Mittlere Transportentfernung [km]} = \frac{\sum_{a,b \geq 1} F_{ab} D_{ab}}{\sum_a F_{ab}} = \frac{\sum_{a,b \geq 1} F_{ab} D_{ab}}{\sum_a F_{ab}}$$

Die mittlere Transportentfernung für das Gesamtnetz wird anschließend – wie in der RP2 – durch Gewichtung der mittleren Transportentfernung mit dem Transportmoment der Teilnetze bestimmt.

Für die mittlere Transportentfernung wird die Variante yTransportmom_Qyear_RD zugrunde gelegt, da hier reale Längen mit der gemessenen Jahresarbeit gewichtet werden und somit am ehesten die mittlere Transportentfernung wiedergeben wird.

Beispiel Berechnung Transportmoment und mittlere Transportentfernung

Tabelle 34 zeigt beispielhaft die Berechnung des Transportmoments und der mittleren Transportentfernung für ein Teilnetz mit zwei Einspeisepunkten (EP) und zwei Ausspeisepunkten (AP). Da im Beispiel die Einspeisung pro Zeiteinheit t 300 m³ beträgt, die Ausspeisung aber nur 250 m³/t, wird letztere mit dem Faktor 300/250 skaliert. Da die Transportentfernung zwischen EP1 und AP1 sehr hoch ist, fließen die 100 m³/t von EP1 vollständig zu AP2, von EP2 aus verteilen sich die Mengen.

Tabelle 34: Beispiel Transportmomentberechnung

	Distanzmatrix		Lösung (Flussmatrix)	
	EP1	EP2	EP1 Einsp. 100m ³ /t	EP2 Einsp. 200m ³ /t
AP1 Aussp. 150 m ³ /t (skaliert auf 180 m ³ /t)	40 km	20 km	0 m ³ /t	180 m ³ /t
AP2 Aussp. 100 m ³ /t (skaliert auf 120 m ³ /t)	10 km	10km	100 m ³ /t	20 m ³ /t

Im Beispiel ist somit:

- Einspeisemenge 300 m³/t
- Ausspeisemenge 250 m³/t
- Durchsatz 300 m³/t
- Transportmoment 40*0+20*180+10*100+10*20 = 4800 km* m³/t
- Mittlere Transportentfernung Transportmoment / Durchsatz = 16 km

I.2.9 Transportwurzelmoment

Beim Transportwurzelmoment soll die Transportentfernung multiplikativ mit dem für den Transport notwendigen Rohrleitungsdurchmesser, der für die Lieferung der entsprechenden Mengen notwendig ist, verknüpft werden.

Basis für die Bildung des Transportwurzelmoments sind die Durchfluss- und Distanzmatrizen des Transportmoments Leistung (Q_{\max}) mit realen Distanzen ($y_{\text{Transportmom_}Q_{\max_RD}}$). Danach wird jede Gasmenge der Durchflussmatrix den Leitungsabschnitten zugeordnet, durch die das Gas auf dem kürzesten Weg⁶¹ durch das Leitungssystem fließen kann (vgl. auch Abschnitt 4.1.3). Anschließend werden je Leitungsabschnitt die zugeordneten Mengen summiert. Aufgrund des obigen Zusammenhangs wird von dieser Gesamtmenge, die durch den Leitungsabschnitt zirkulieren können muss, die Wurzel gezogen, um den notwendigen Leitungsdurchmesser anzunähern, der sich proportional zu den Errichtungskosten verhält. Dieser Wert wird mit der Länge des Leitungsabschnitts multipliziert und entspricht einem relativen Näherungswert für die Errichtungskosten des Leitungsabschnitts. Die Summe über alle Leitungsabschnitte ergibt das Transportwurzelmoment des untersuchten Netzes. Wie beim Transportmoment mit realen Distanzen erfolgt die Bildung jeweils separat für die einzelnen (vollständigen) Teilnetze.

I.2.10 (Wurzel) Transportmomentfläche

In der RP2 wurden zudem die Transportmomentfläche sowie deren Wurzel als Parameter geprüft (Letzteres um den kostentreibenden Zusammenhang zu linearisieren). Da der Erklärungsgehalt bezüglich der Referenznetzkosten hoch war, werden diese Parameter ebenfalls gebildet.

Die Transportmomentfläche ergibt sich je Gasqualität durch Multiplikation der Polygonfläche mit dem Transportmoment. Anschließend werden die beiden Gesamtwerte des H- und L-Gas-Netzes aufsummiert. Die Wurzel der Transportmomentfläche wird ebenfalls je Gasqualität gezogen und dann die beiden Gesamtwerte des H- und L-Gas-Netzes aufsummiert. Als Grundlage dient dabei analog zur RP2 das Transportmoment Leistung mit Luftliniendistanzen ($y_{\text{Transportmom_}Q_{\max_LD}}$).

I.2.11 Netzcharakteristiken: Verzweigungen und Maschen

Aufgrund der Konsultation (vgl. Ausführungen in Abschnitt 4.1.5), werden anhand der GIS-Daten der Netzbetreiber zudem folgende Parameter für das Gesamtnetz gebildet.

Anzahl Verzweigungen

Der Parameter „Anzahl Verzweigungen“ misst die Anzahl von verzweigten Leitungen im Netz. Hierfür wird pro Knotenpunkt die Anzahl mit Leitungsabschnitten direkt verbundenen Knoten an anderen Standorten aufsummiert. Von dieser Summe werden zwei subtrahiert, da nur zwei bzw. ein verbundener Knoten keine Verzweigung darstellt. Für das gesamte Netz werden dann die Anzahl Verzweigungen pro Knoten aufsummiert. Doppelte Leitungen werden somit nicht gezählt (zwei Leitungen von einem Standort zu einem anderen Standort zählen nur einmal)

⁶¹ Die trassentreue Mindestdistanz berücksichtigt keine Einschränkungen auf den Trassen (Kapazitätsgrenzen, ggf. fehlende Reverse-Flow-Fähigkeit); hierdurch wird die endogene Beeinflussbarkeit des Parameters durch den FNB (z.B. durch die Herabsetzung von Leitungskapazitäten) stark begrenzt – außerdem ist zu erwarten, dass die Nutzung freier Kapazitäten auf einem bestehenden Umweg für den FNB nicht weniger wirtschaftlich ist, als der Ausbau einer bestehenden Trasse.

und es zählen nur Leitungsabschnitte die zu anderen Standorten führen. Formal berechnet sich die Anzahl Verzweigungen wie folgt

$$yBranches_num = \sum_i \max \left(\sum_j L_{ij} - 2, 0 \right)$$

wobei $L_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{falls Leitungsabschnitt von } i \text{ nach } j \text{ existiert} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$.

Die Variante „yBranches_exklNKPcustomer_num“ berücksichtigt Leitungsabschnitte, welche direkt zu einem Endkunden oder einem ExitNKP führen nicht (d.h. Punkte die als ExitLetztverbraucher oder ExitNKP gekennzeichnet sind, werden nicht berücksichtigt).

Anzahl Maschen

Der Parameter „Anzahl Maschen“ misst die Anzahl unabhängiger (verbundener)⁶² Maschen im Netz. Unabhängige Maschen sind Maschen, welche nicht durch eine Kombination von anderen Maschen im Netz gebildet werden können. Für die Berechnung werden alle doppelten Leitungen und Leitungen zum selben Standort nicht gezählt. Die Anzahl Maschen berechnet sich dann als

$$yMeshes_num = m - n + c,$$

wobei m die Anzahl Leitungsabschnitte, n die Anzahl Knoten und c die Anzahl Teilnetze (Anzahl zusammenhängender Netze) darstellt.

1.2.12 Horizontaler Transport (GÜP, MÜP, nicht buchbare/bestellbare NKP)

Wie in Abschnitt 4.1.4 ausgeführt, sollen Parameter gebildet werden, welche die Gasmenge charakterisieren, welche von Netzbetreibern rein zu (nationalen oder internationalen) Transitzwecken horizontal durch ihre Fernleitungsnetze befördert werden.

Der horizontale Transportanteil in Prozent kann in den Varianten „Arbeit“ und „Leistung“ berechnet werden. Er berechnet sich aus der Summe der Ausspeisungen für horizontalen Transport im Verhältnis zur gesamten Ausspeisung des Netzbetreibers. Als Ausspeisepunkte für den horizontalen Transport gelten dabei alle Marktgebiets- und Grenzübergangspunkte sowie alle NKP, die von den FNB als „weder buch- noch bestellbar“ gekennzeichnet wurden und keine virtuellen Punkte sind. Die Hinzunahme der NKP, die als „weder buch- noch bestellbar“ gekennzeichnet sind, wird erforderlich, um den horizontalen Transport zwischen Fernleitungsnetzbetreibern in die Berechnungsgrundlage aufzunehmen.

Für eine geeignete Operationalisierung in der DEA werden zudem vier Parameter gebildet, welche die absoluten Mengen an horizontalem bzw. vertikalem Transport von Q_{max} bzw. Q_{jahr} abbilden in m_n^3/h bzw. m_n^3 . Dabei gelten folgende Beziehungen:

$$yTransportV_abs_Qyear + yTransportH_abs_Qyear = yEnergy_delivered_Qyear$$

$$yTransportV_abs_Qmax + yTransportH_abs_Qmax = yPeakload_deliv_Qmax$$

⁶² Maschen, die aus unverbundenen Kreuzungen entstehen, wo also z.B. zwei Leitungen auf unterschiedlicher Bodenhöhe kreuzen, ohne dass diese miteinander verbunden wären, zählen somit nicht.

I.2.13 Gebietseigenschaften

Auf der Grundlage der gebietsstrukturellen Daten der BNetzA⁶³ werden folgende Parameter gebildet.

- Die Parameter zur mittleren Hangneigung und maximalen Höhendifferenz werden unverändert übernommen.
- Die Parameter des VNB-Benchmarking der RP2 werden auf der Grundlage der Eingangsdaten sinngemäß gebildet. Hierzu werden folgende Anpassungen gemacht:
 - Die bei Fernleitungen relevanten Bodentiefen von einem bis zwei Meter werden ebenfalls berücksichtigt;
 - Es werden Leitungskorridore ausgewertet und nicht wie bei den VNB das gesamte Versorgungsgebiet. Dies da FNB einerseits ein weniger in die Fläche verzweigtes Netz aufweisen als VNB und andererseits die Lage der Leitungstrassen bei FNB – anders als bei den VNB – vorliegen. Da Korridore ausgewertet werden, wird ebenfalls die besonders aufwändig zu bearbeitende Bodenklasse 7 berücksichtigt, die beim Flächenansatz bei den VNB noch in der Annahme ausgeschlossen worden war, dass diese Bodenklasse durch bauliche Maßnahmen umgangen würde.
- Gestützt auf die Praxiserfahrung von 4M wird zudem eine Variante gebildet, bei der die vorherrschenden Bodenklassen 0, 2, 6 und 7 berücksichtigt werden. Aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht kann angenommen werden, dass deren Erschließung mit Gasleitungen für FNB besonders teuer ist. In der Variante wird möglicher Mehraufwand berücksichtigt z.B. für Gewässerkreuzungen (Bodenklasse 0), zusätzliche Sicherungen (Baugruben/Auftrieb, Bodenklasse 2)⁶⁴, Bodenaustausch und erhöhter Grabungsaufwand und Sicherung gegen mechanische Einwirkungen (Bodenklassen 6 und 7). Ein analoger Parameter wurde ebenfalls für die erstmalig vorliegenden Grabbarkeitsklassen gebildet (0, 3, 7, 8).

Tabelle 35 listet die in den Effizienzvergleich aufgenommenen Parameter auf. Daneben wurden weitere Parameter gebildet und geprüft, welche u.a. aufgrund ihrer Belastbarkeit verworfen wurden.

Tabelle 35: Geprüfte Z-Parameter zur Abbildung der Gebietseigenschaften

Parameter	Beschreibung
zGeo_DGM_RANGE	Direkt von BNetzA; Maximale Höhe minus minimale Höhe
zGeo_NEIG_MEAN	Direkt von BNetzA; Mittlere Hangneigung
zSoil_BK4567V02	VNB RP2 sinngemäß
zSoil_BK4567M02	VNB RP2 sinngemäß
zSoil_BK567V02	VNB RP2 sinngemäß
zSoil_BK567M02	VNB RP2 sinngemäß
zSoil_BK0267V02	Bodenklassen mit höheren Kosten aus Ing. Perspektive
zSoil_GB0378V02	Grabbarkeitsklassen mit höheren Kosten aus Ing. Perspektive

Quelle: Eigene Darstellung

⁶³ Zur Bildung der gebietsstrukturellen Ausgangsdaten siehe Björnsen Beratende Ingenieure (2017).

⁶⁴ Im Gegensatz zu Verteilnetzleitungen können Ferngasleitungen aus Stahl nur sehr aufwendig grabenlos in der Bodenklasse 2 verlegt werden. Somit entsteht hier ein erhöhter Verlegungsaufwand.

I.3 Dokumentation der Parameter zuhanden der Netzbetreiber

Aufgrund der gestaffelten und mehrfachen Lieferung der Strukturdaten der Netzbetreiber werden die Parameter automatisiert erstellt und den Netzbetreibern zur Prüfung vorgelegt. Jedem Netzbetreiber werden hierfür folgende Daten übergeben:

- Zwei Dateien [xlsx] mit den importierten Originaldaten jeweils auf Basis Allokationsdaten und Kapazitätsnutzungsverhältnissen mit folgendem Inhalt
 - Zusammenzug der wesentlichen gelieferten Originaldaten
 - Zusätzlich ggf. transformierte UTM32 Koordinaten
 - Ausgewählte Auswertungen
 - Übersicht der aus dem Datensatz gemäß Abschnitt I.1 berechneten Parameter (importiert aus Matlab-Resultatdatei)
- Dateien mit Details zur Transportmomentberechnung (je Variante eine [xls])
- Datei(en) mit Details zur Polygonflächenberechnung (je vorhandener Gasqualität eine [xls])
- Datei(en) mit einer GIS-Darstellung der Polygonflächen (je vorhandener Gasqualität eine [pdf]).

II Liste der Parameter mit Gruppenzugehörigkeit

Tabelle 36: Liste der Parameter mit deskriptiven Statistiken

Nr.	Parametergruppe	Parametername [Einheit]	Variablenname	Mittelwert	Std.Abw.
A1	Aufwandsparameter	standardisierte Totex	sTotex	117'880'497	147'084'270
A2		nicht standardisierte Totex	Totex	111'353'417	139'293'336
1	Rohrgeometrie	Leitungslänge [km]	yPipeLength	2'409	2'957
2		Rohrleitungsvolumen [m ³]	yPipeVolume	733'418	948'482
3		Rohrleitungsmantelfläche [m ²]	yPipeSurface	4'179'593	5'397'917
4	Jahresarbeit	Jahresarbeit Einsp. [nm ³]	yEnergy_injected_Qyear	15'675'230'493	16'390'246'538
5		Jahresarbeit Aussp. [nm ³]	yEnergy_delivered_Qyear	15'517'014'111	15'131'346'329
6	Last	Netzlast Einsp. [nm ³ /h]	yPeakload_injec_simult	2'815'466	2'687'473
7		Netzlast Aussp. [nm ³ /h]	yPeakload_deliv_simult	2'998'471	3'249'707
8		Jahreshöchstlast Einsp. [nm ³ /h]	yPeakload_injec_Qmax	5'434'073	5'755'776
9		Jahreshöchstlast Aussp. [nm ³ /h]	yPeakload_deliv_Qmax	5'850'443	6'608'668
10	Anschlüsse	Anzahl Einspeisepunkte [#]	yPoints_entry_num	16.9	16.6
11		Anzahl Ausspeisepunkte [#]	yPoints_exit_num	219.6	345.4
12		Anzahl Ein- und Ausspeisepunkte [#]	yPoints_num	236.5	359.0
13	Druck	Eingangsdruck [bar]	yPressure_In_Pmin_Qmax	62.4	22.0
14			yPressure_In_Pmin_Qyear	64.3	21.9
15			yPressure_In_Poperating_Qyear	72.1	16.5
16		Ausgangsdruck [bar]	yPressure_Out_Pmin_Qmax	49.0	19.0
17			yPressure_Out_Pmin_Qyear	48.8	19.4
18			yPressure_Out_Poperating_Qyear	57.0	16.1
19		Druckdifferenz [bar]	yPressure_Diff_Pmin_Qmax	13.4	10.7
20			yPressure_Diff_Pmin_Qyear	15.4	11.2
21			yPressure_Diff_Poperating_Qyear	15.1	9.8
22		Druckniveau [bar]	yPressure_Level_Pmin_Qmax	55.6	19.6
23			yPressure_Level_Pmin_Qyear	56.6	19.5
24			yPressure_Level_Poperating_Qyear	64.9	15.2
25	Verdichter	Anzahl Verdichter [#]	yCompressor_num	10.6	15.0
26		Verdichterleistung [MW]	yCompressor_power_sum	124.6	186.3
27		Treibenergie [MWh]	yCompressor_ener_used	404'318	808'750
28		Gasmischstationen [nm ³]	yGasmixture_sum	1'787'099	5'837'514
29	Polygonfläche	Polygonfläche [m ²]	yArea	64'508'923'428	97'649'571'723
30			yArea_all	65'903'091'702	98'828'530'160
31	Transportmoment	Transportmoment Leistung	yTransportmom_Qmax_LD	769'132	888'114
32			yTransportmom_Qmax_RD	1'052'814	1'262'538
33		Transportmoment Arbeit	yTransportmom_Qyear_LD	2'902'196'474	3'180'552'084
34			yTransportmom_Qyear_RD	3'928'632'765	4'527'506'439
35	Transportwurzelmoment	Transportwurzelmoment	yTransportmomWurzel_Qmax_RD	1'035'503	1'136'342
36	Transportmomentfläche	Transportmomentfläche Leistung	yTransportmomArea_Qmax_LD	1.02685E+23	2.66661E+23
37		Wurzel Transportmomentfläche Leistung	yTransportmomAreaRoot_Qmax_LD	204'640'876'026	289'765'260'607
38	Mittl. Transportdistanz	mittlere Transportentfernung [km]	yAveragedistance_Qyear_RD	250.9	136.4
39	Netzcharakteristiken	Anzahl Verzweigungen [#]	yBranches_num	475.9	964.0
40			yBranches_exklNKPCustomer_num	415.2	882.1
41		Anzahl Maschen [#]	yMeshes_num	81.1	196.2
42	Horizontaler Transport	Horizontaler Transportanteil Leistung [%]	yTransportH_Qmax	0.61	0.39
43		Horizontaler Transportanteil Arbeit [%]	yTransportH_Qyear	0.60	0.39
44		Vertikaler Transport absolut Qmax [m ³ /h]	yTransportV_abs_Qmax	2'523'543	3'532'169
45		Vertikaler Transport absolut QJahr [m ³]	yTransportV_abs_Qyear	5'748'772'968	7'537'631'233
46		Horizontaler Transport absolut Qmax [m ³ /h]	yTransportH_abs_Qmax	3'326'900	3'829'667
47		Horizontaler Transport absolut QJahr [m ³]	yTransportH_abs_Qyear	9'768'241'143	9'944'993'756
48	Gebietseigenschaften	Höhendifferenz und Neigung	zGeo_DGM_RANGE	489.49	284.97
49			zGeo_NEIG_MEAN	3.71	2.28
50		Bodenklassen	zSoil_BK4567V02	173.89	226.21
51			zSoil_BK4567M02	207.59	259.60
52			zSoil_BK567V02	40.92	58.13
53			zSoil_BK567M02	114.39	148.21
54			zSoil_BK0267V02	21.25	33.73
55		Grabbarkeit	zSoil_GB0378V02	41.57	61.14

III Graphische Abbildung des Leitungsnetzes



- Leitungen
- - - Leitungen mit Fremdnutzung gestrichelt
- Entry-Punkte
- Exit-Punkte
- Druckregler/Verdichter
- Knoten

Quelle: Swiss Economics (2018)

IV Grundlagen Kostenberechnung Referenznetzanalyse

IV.1 Input Netztypologie und Versorgungsaufgabe

Die Netztypologie legt das physische Netz fest. Konkret werden die Knoten und Verbindungen des Netzes vorgegeben. Die Variation des Netzes erfolgt durch die Rohrdurchmesser, die übrigen Teile des physischen Netzes werden als fix betrachtet.

Die Versorgungsaufgabe umfasst:

- Lasten an Ein- und Ausspeisepunkten, d.h. Q_{max} an allen Ein- und Ausspeisepunkten wird vorgegeben;
- Drücke p an Ein- und Ausspeisepunkten.

Da über die Rohrdurchmesser optimiert wird und keine Verdichter simuliert werden, müssen die Drücke in Flussrichtung fallend sein ansonsten hat das Gleichungssystem keine Lösung.

IV.2 Berechnung Rohrdurchmesser

Ist die Netztypologie und die Versorgungsaufgabe definiert, werden unter Berücksichtigung der physikalischen Gesetze die zur Erfüllung der Versorgungsaufgabe benötigten Rohrlängendurchmesser berechnet.

Der Druck- und Fließzustand eines vermaschten Rohrnetzes wird durch die Kirchhoffschen Gesetze und das Widerstandsgesetz beschrieben.

Erstes Kirchhoffsches Gesetz:

In jedem Knoten i ist die Summe der abfließenden gleich der Summe der zufließenden Volumenströme. Formal bedeutet dies, dass

$$\sum_j Q_{ij} - \sum_j Q_{ji} = 0$$

gelten muss, wobei Q_{ij} den Volumenstrom von Knoten i nach Knoten j bezeichnet.

Zweites Kirchhoffsches Gesetz:

In jeder Masche ist die Summe der Druckabfälle aller Strecken gleich Null. Formal gilt die folgende Gleichung in jeder Masche M

$$\sum_{s \in M} \Delta P_s = 0$$

wobei ΔP_s die Druckdifferenz auf der Strecke s bezeichnet. Die Druckdifferenzen werden als positiv eingesetzt im Uhrzeigersinn und negativ gegen den Uhrzeigersinn.

Widerstandsgesetz:

Die Druckdifferenzen pro Strecke folgen aus den Volumenströmen, der Leitungslänge und den Rohrvolumen. Konkret ist die Druckdifferenz auf einer Strecke von Knoten i nach Knoten j mit Volumenstrom $Q_{ij} > 0$ gegeben durch

$$P_j = P_i \sqrt{1 - \lambda \frac{l_{ij}}{d_{ij}} \frac{\rho_i}{P_i} w_i^2 K_m}$$

wobei l_{ij} die Streckenlänge ist, d_{ij} der Rohrdurchmesser, λ die Rohrreibungszahl ist die berechnet wird durch

$$\lambda = \begin{cases} \frac{64}{Re} & \text{falls } Re < 2320 \\ \left(-2 \log \left[2.7 \frac{\log Re^{1.2}}{Re} + \frac{k}{3.71} d_{ij} \right] \right)^{-2} & \text{if } Re \geq 2320 \end{cases}$$

k wird je nach Netztyp gemäß Tabelle 9 kalibriert.

Re stellt die Reynoldszahl dar, welche gegeben ist durch

$$Re = \frac{4Q_{ij}\rho_i}{d_{ij}\pi\eta}$$

Weiter gilt

$$\rho_i = \rho_n \frac{P_i T_n}{P_n T_i}$$

wobei von $\rho_n = 0.829 \frac{kg}{m^3}$, $T_n = 273.15K$, $P_n = 1.013 \text{ Bar}$, $T_i = 285K$ ausgegangen wird. Die dynamische Viskosität η wird für H und L-Gas separat festgelegt auf

$$\eta = \begin{cases} 10.8 * 10^{-6} & \text{für H - Gas} \\ 11.9 * 10^{-6} & \text{für L - Gas} \end{cases}$$

Weiter gilt

$$w_i = \frac{Q_{ij}}{A} = \frac{Q_{ij}}{\frac{d_{ij}^2 \pi}{4}}$$

und

$$K_m = 1 - \frac{1}{450} \frac{2 P_i^3 - P_j^3}{3 P_i^2 - P_j^2}$$

Neben den Kirchhoffschen Gesetzen und dem Widerstandsgesetz fügen wir für jeden Einspeise- und Ausspeisepunkt die Restriktionen ein, dass die in der Versorgungsaufgabe definierten Drücke und Volumenströme erreicht werden müssen. Dies ergibt ein Gleichungssystem, welches aus den einzelnen Gleichungen pro Knoten besteht. Dieses wurde bei Swiss Economics in Matlab umgesetzt und mittels Newton Verfahren nach den Rohrdurchmessern aufgelöst, so dass alle physikalischen Gesetze eingehalten werden und die Versorgungsaufgabe erfüllt wird.

IV.3 Berechnung der synthetischen Kosten

Der zuvor beschriebene Ansatz liefert für eine Versorgungsaufgabe und Netztypologie die notwendigen Rohrdurchmesser. Aus den Leitungslängen und Rohrdurchmessern werden dann mit Hilfe der Standardkostensätze die Kosten berechnet.

Hierbei wird wie folgt vorgegangen. Für den Annuitätsfaktor wird ein Zins $z = 0.03$ angenommen und die Investition über 65 Jahre abgeschrieben. Der Annuitätsfaktor berechnet sich dann als

$$A_f = \frac{(1+z)^{65} * z}{(1+z)^{65} - 1}$$

Die Betriebskosten werden pro Jahr auf 1% der Errichtungskosten gesetzt. Für die Berechnung der Netzinvestitionen wird folgender Zusammenhang zwischen Rohrdurchmesser und Standardkosten SK benutzt

$$SK_s = 0.0427 + 0.0008 * DN_s$$

wobei DN_s den Rohrdurchmesser in mm darstellt auf Strecke s . Schliesslich werden die Kosten berechnet als Summe aller Kosten der einzelnen Strecken multipliziert mit dem Annuitätsfaktor und Betriebskosten von 1%.

V Parameter und Effizienzwerte finales Modell

Gestützt auf die ARegV sind in **Tabelle 37** die Parameter des finalen Modells angegeben, **Tabelle 38** enthält die individuellen Effizienzwerte vor und nach Ausreißeranalyse (AA).

Tabelle 37: Werte der Parameter des finalen Modells (gerundet)

	sTotex	Totex	yPipevolume	yPoints_num	yArea_all	yComp_power
NB0436	147534774	133997089	481008	1110	4.1866E+10	60
NB0780	19678738	16945172	130192	11	8.1173E+09	37
NB1284	89105617	68422281	568709	37	3.8385E+10	318
NB1328	39182685	34869830	282537	131	3.7306E+10	1
NB1368	607731977	574200788	3889716	1150	4.0081E+11	657
NB1807	271743941	276771286	1367683	121	1.8382E+11	478
NB1831	221478422	195497611	1943159	489	9.0475E+10	39
NB2778	54644409	52109418	231213	180	3.1913E+10	17
NB3049	81692116	74055309	268495	198	3.4999E+10	70
NB3209	164245164	155934709	865103	223	1.2421E+11	97
NB3483	54026396	48451741	565383	6	9.0179E+09	79
NB3492	16344489	22428377	141346	2	9.0180E+09	20
NB3614	58094077	47245186	470238	27	2.0752E+10	120
NB3651	14777711	24179668	156457	3	8.6588E+09	0
NB3653	14404030	14379282	39201	88	6.4430E+09	0
NB3660	31403407	42166928	334257	8	8.6588E+09	0

Tabelle 38: Effizienzwerte des finalen Modells im Einzelnen (gerundet)

	sTotex vor AA	Aus-reiBer?	sTotex nach AA	Totex vor AA	Aus-reiBer?	Totex nach AA	Best-of vor AA	Aus-reiBer?	Best-of nach AA
NB0436	1.0000		1.0000	1.0000		1.0000	1.0000	0	1.0000
NB0780	0.8473		0.9537	0.8309		0.9482	0.8473	0	0.9537
NB1284	1.0000	1	1.0000	1.0000	1	1.0000	1.0000	1	1.0000
NB1328	1.0000	1	1.0000	1.0000		1.0000	1.0000	1	1.0000
NB1368	0.8881		1.0000	0.8053		0.9141	0.8881	0	1.0000
NB1807	0.9782		1.0000	0.7961		1.0000	0.9782	0	1.0000
NB1831	1.0000		1.0000	1.0000		1.0000	1.0000	0	1.0000
NB2778	0.7873		0.9582	0.7309		0.7616	0.7873	0	0.9582
NB3049	0.6933		0.7770	0.6550		0.7711	0.6933	0	0.7770
NB3209	0.8823		1.0000	0.8064		0.8783	0.8823	0	1.0000
NB3483	1.0000		1.0000	1.0000		1.0000	1.0000	0	1.0000
NB3492	0.9776		1.0000	0.6512		0.6513	0.9776	0	1.0000
NB3614	0.9577		1.0000	0.9994		1.0000	0.9994	0	1.0000
NB3651	1.0000		1.0000	0.6373		0.6373	1.0000	0	1.0000
NB3653	0.9579		1.0000	0.8667		0.8667	0.9579	0	1.0000
NB3660	1.0000		1.0000	0.7050		0.7050	1.0000	0	1.0000

VI Modellvalidierung

OLS/STOTEX

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	6.734e+06	3.737e+06	1.802	0.09898 .
yPipevolume	5.637e+01	9.078e+00	6.209	6.63e-05 ***
yArea_all	6.113e-04	1.083e-04	5.647	0.00015 ***
yConnections_num	7.058e+04	1.126e+04	6.269	6.10e-05 ***
yCompressor_power_sum	1.029e+05	3.274e+04	3.143	0.00935 **

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 11240000 on 11 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.996, Adjusted R-squared: 0.9945

F-statistic: 682 on 4 and 11 DF, p-value: 4.288e-13

OLS/TOTEX

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	8.678e+06	4.895e+06	1.773	0.103944
yPipevolume	4.003e+01	1.189e+01	3.366	0.006302 **
yArea_all	7.650e-04	1.418e-04	5.394	0.000219 ***
yConnections_num	5.553e+04	1.475e+04	3.765	0.003129 **
yCompressor_power_sum	7.843e+04	4.289e+04	1.828	0.094696 .

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 14730000 on 11 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.9923, Adjusted R-squared: 0.9895

F-statistic: 355.1 on 4 and 11 DF, p-value: 1.518e-11

ROLS/STOTEX

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	7.232e+05	2.448e+06	0.295	0.773200
yPipevolume	6.102e+01	4.954e+00	12.318	8.89e-08 ***
yArea_all	7.018e-04	6.249e-05	11.231	2.29e-07 ***
yConnections_num	7.364e+04	5.994e+03	12.287	9.12e-08 ***
yCompressor_power_sum	9.723e+04	1.820e+04	5.344	0.000236 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Robust residual standard error: 5132000

Multiple R-squared: 0.9967, Adjusted R-squared: 0.9955

Convergence in 15 IRWLS iterations

Robustness weights:

observation 5 is an outlier with |weight| = 0 (< 0.0063);

ROLS/TOTEX

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	7.745e+06	3.463e+06	2.237	0.046976 *
yPipevolume	4.641e+01	8.539e+00	5.435	0.000206 ***
yArea_all	7.258e-04	1.001e-04	7.252	1.64e-05 ***
yConnections_num	6.207e+04	1.044e+04	5.946	9.64e-05 ***
yCompressor_power_sum	3.978e+04	3.182e+04	1.250	0.237149

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Robust residual standard error: 11240000

Multiple R-squared: 0.9951, Adjusted R-squared: 0.9934

Convergence in 14 IRWLS iterations

Robustness weights: no outlier

Properties

BIC(sT) = 575.5706

BIC(T) = 584.213

BREUSCH-PAGAN TEST (heteroskedasticity): (P>0.05)
P = 0.43 : OK

NON-CONSTANT VARIANCE SCORE TEST (P>0.05)
Variance formula: ~ fitted.values
Chisquare = 1.439543 Df = 1 p = 0.2302133
OK

BELSLEY MULTICOLLINEARITY (Condition index < 30)

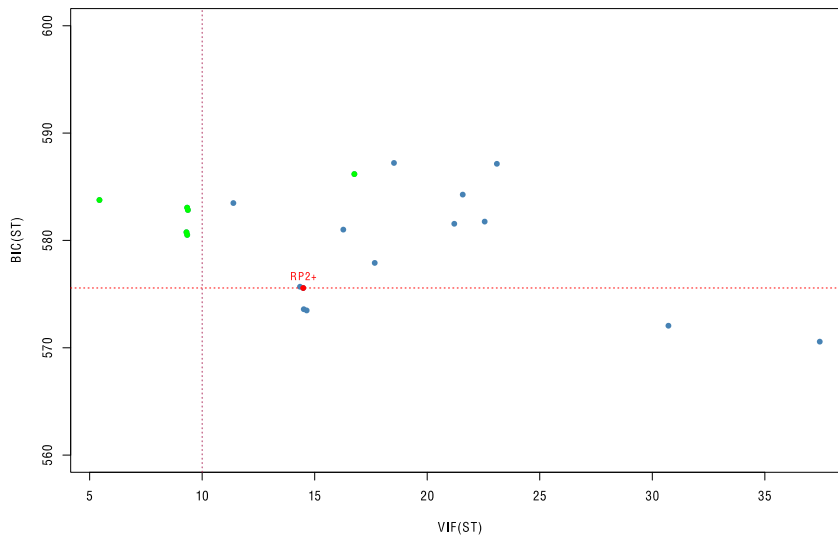
yPipevolume	condition index = 2.62572	Good, multicollinearity not a problem
yArea_all	condition index = 3.14412	Good, multicollinearity not a problem
yConnections_num	condition index = 6.17249	Good, multicollinearity not a problem
yCompressor_power_sum	condition index = 11.3845	Good, multicollinearity not a problem

ALL OK

VARIANCE INFLUENCE FACTORS (VIF < 10)
VIF(ST) = 14.49
VIF(T) = 14.49
NOT PASSED

Das Modell RP2+ erfüllt den Belsley Test gut, weist jedoch einen VIF-Wert über dem Grenzwert von 10 auf. **Abbildung 40** zeigt, dass keines von den übrigen untersuchten Modellen sowohl einen tieferen BIC als auch tieferen VIF-Wert aufweist als das Modell RP2+, es wird also von keinem Modell dominiert. Ebenfalls zeigt die Abbildung, dass es nur 3-Parameter-Modelle gibt, die das VIF-Kriterium (und den Belsley Test) erfüllen, diese weisen jedoch einen geringeren Informationsgehalt auf (höhere BIC-Werte). Es muss also eine Abwägung zwischen Informationsgehalt und (begrenzter) Multikollinearität vorgenommen werden. Das Modell RP2+ stellt diesbezüglich eine sehr gute Wahl dar und erfüllt darüber hinaus den anderen Multikollinearitäts-Test (Besley Test) gut.

Abbildung 40: BIC und VIF für das Model RP2+ im Vergleich zu weiteren Modellen



Erläuterung: Modelle mit drei (vier) Parametern in grün (blau).

Quelle: Eigene Abbildung

NORMALITY
Shapiro-Wilk normality test

data: residuals(sTotex)
W = 0.95792, p-value = 0.6242
OK


```
data: residuals(Totex)
W = 0.97477, p-value = 0.9087
OK
```

```
SKEWNESS
D'Agostino skewness test
```

```
data: residuals(sTotex)
skew = 0.44817, z = 0.91652, p-value = 0.3594
alternative hypothesis: data have a skewness
OK
```

```
data: residuals(Totex)
= 0.31222, z = 0.64364, p-value = 0.5198
alternative hypothesis: data have a skewness
OK
```

swiss economics

Swiss Economics SE AG
Weinbergstrasse 102
CH-8006 Zürich

T: +41 (0)44 500 56 20
F: +41 (0)44 500 56 21

office@swiss-economics.ch