



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

**Bundesamt für Energie BFE**  
Abteilung Energiewirtschaft

Oktober 2008

---

# **Temperatur- und Strahlungsabhängigkeit des Energieverbrauchs im Wärmemarkt**

Empirische Analyse von Einspeisemengen  
leitungsggebundener Energieträger

---



**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE, 3003 Bern

**Auftragnehmer:**

Prognos AG, Basel

**Autoren:**

Peter Hofer, Prognos AG

Andreas Kemmler, Prognos AG

Jürg Schwarz, Schwarz & Partners

Diese Studie wurde im Auftrag des Bundesamts für Energie BFE erstellt.

Für den Inhalt ist allein der/die Studiennehmer/in verantwortlich.

## Kurzfassung

Bei der Bearbeitung und Analyse von aggregierten Energieverbräuchen (z.B. auf nationaler oder regionaler Ebene) im Zeitablauf spielt die Generierung witterungsbereinigter Energieverbräuche, respektive die Bereinigung der Energieverbräuche um den Witterungseffekt, eine wesentliche Rolle. Diese ist notwendig, um z.B. längerfristige Trends in den Energiebilanzen identifizieren zu können oder auch die Wirkung energiepolitischer Instrumente überprüfen sowie ggf. adjustieren zu können. Der Zusammenhang zwischen der Witterung und Energieverbräuchen von Gebäuden sowie aggregierten Energieverbräuchen ist seit Jahren Gegenstand von Untersuchungen, und es wurden unterschiedliche Vorschläge für modellhafte Zusammenhänge und Berechnungsmethoden erarbeitet.

In der vorliegenden Arbeit wurde der Zusammenhang zwischen Witterung und Energieverbrauch mittels einer Analyse von täglichen Einspeisemengen ins Fernwärme- und Gasnetz der *Energie Wasser Bern (ewb)* mit statistischen Methoden empirisch untersucht. Der Untersuchungsansatz umfasst im Wesentlichen zwei Teilschritte. Im ersten Schritt wurden aus den vorhandenen Rohdaten die raumwärmeabhängigen Verbrauchsbereiche möglichst genau extrahiert und grafisch analysiert. Im zweiten Arbeitsschritt wurden die Verbrauchsreihen mit den Werten der Wetterfaktoren Temperatur und Strahlung verknüpft und mit Hilfe statistischer Verfahren die Art der Beeinflussung der Raumwärmeverbräuche durch die Wetterfaktoren geschätzt. Auf Basis dieser geschätzten Zusammenhänge wurden anschliessend neue Witterungsbereinigungsfaktoren abgeleitet. Diese Faktoren bilden das Verhältnis des effektiven Energieverbrauchs zum witterungsbereinigten Energieverbrauch ab.

Die grafische Auftragung der täglichen Einspeisemengen gegenüber der mittleren Tagestemperatur zeigt, dass der Energieverbrauch für Raumwärme bereits bei mittleren Tagestemperaturen zwischen 15°C bis 20°C ansteigt und die Heizgrenze demnach deutlich über der im traditionellen HGT-Verfahren üblicherweise angewandten Heizgrenze von 12°C liegt. In den Regressionsanalysen zeigt sich ein sehr starker Einfluss der mittleren Tagestemperatur, welche mit zwischen 70 % bis 75 % der täglichen witterungsbedingten Veränderung des Raumwärmeverbrauchs korreliert. Die Temperaturen an den beiden Vortagen sind ebenfalls von Bedeutung, weitere 20 % bis 25 % der Verbrauchsänderung sind proportional dazu. Der Einfluss der Strahlung ist zwar deutlich geringer als der Einfluss der Temperatur, dennoch werden 4 % (Fernwärme) bis 8 % (Gas) der witterungsbedingten Verbrauchsänderung durch die Strahlung bestimmt, in einzelnen Monaten auch mehr.

Bei der Einordnung der Ergebnisse sollte die Charakteristik des Gebäudeparks berücksichtigt werden. Mit der Fernwärme werden in Bern städtische Gebäude versorgt, darunter grössere Verwaltungs- und Altbaugebäude. Die Gasversorgung erstreckt sich über die Stadtgrenze hinaus auf die umliegenden, expansiven Gemeinden und umfasst dadurch vermehrt auch Neubauten und Einfamilienhäuser. Diese Unterschiede im Gebäudepark könnten erklären, weshalb bei der Analyse der Gaseinspeisemengen der Strahlungseinfluss grösser, der Einfluss der Temperatur an den Vortagen jedoch geringer ist als bei den fernwärmeversorgten Gebäuden. Da bei der Erstellung neuer Gebäude die Strahlung aufgrund der geringeren Transmissionsverluste höheres Gewicht hat als bei bestehenden (Alt-)Bauten, dürfte in der Zukunft der Einfluss der Strahlung auf den Wärmebedarf grösser werden und folglich auch die Bedeutung der Strahlung für den Zusammenhang zwischen Witterung und Raumwärmeverbrauch zunehmen.

Auf Grundlage der berechneten Zusammenhänge zwischen den Wetterfaktoren und den gemessenen Einspeisemengen lassen sich witterungsbereinigte Energieverbräuche ableiten, respektive es lassen sich Witterungsbereinigungsfaktoren konstruieren. Ein Vergleich zwischen den gemessenen Einspeisemengen und den berechneten Jahresverbräuchen zeigt, dass die auf Basis der Regressionsanalyse erstellten Bereinigungsfaktoren in den einzelnen Jahren im Mittel um lediglich rund 1 % von den tatsächlich gemessenen Fernwärmeverbräuchen abweichen. Eine Vereinfachung des Ansatzes durch die Berechnung der Bereinigungsfaktoren auf Basis von Monatsmittelwerten hat keine wesentliche Verschlechterung der Anpassungsgüte zur Folge. Daher scheint die Verwendung von aggregierten Monatswerten zur Konstruktion der Bereinigungsfaktoren einen guten Kompromiss zwischen Aufwand und Anpassungsgüte zu bieten. Aufgrund der geringeren Qualität der Gasdaten – der Raumwärmeanteil lässt sich bei den Gasdaten weniger gut von der Gesamteinspeisung isolieren als bei den Fernwärmedaten – ist die Güte der Bereinigungsfaktoren beim Gas etwas geringer.

Im Vergleich mit den herkömmlichen Witterungsbereinigungsverfahren auf Basis von Heizgradtagen (HGT) oder Gradtagen und Strahlung (GT+S), weisen die aus den täglichen Einspeisemengen abgeleiteten Bereinigungsfaktoren in Bezug auf die Einspeisemengen der *ewb* eine höhere Anpassungsgenauigkeit auf. Insbesondere bei den Verbrauchsänderungen gegenüber dem Vorjahr sind die Abweichungen teilweise deutlich geringer. In Bezug auf das unter Klimaaspekten ausserordentliche Jahr 2007 zeigt sich beim Verfahren nach GT+S gegenüber den gemessenen Einspeisemengen eine Überschätzung des Verbrauchsrückgangs, beim HGT-Verfahren hingegen eine deutliche Unterschätzung des Rückgangs. Der HGT-Ansatz ist konservativ, die berechneten jährlichen witterungsbedingten Verbrauchs-

schwankungen sind deutlich kleiner als die effektiven Verbrauchsschwankungen.

Ob sich die aus den Berner Daten gewonnen Erkenntnisse zur Ableitung neuer Witterungsbereinigungsfaktoren für die Gesamtschweiz eignen, ist nicht eindeutig. Relativ unproblematisch erscheint die Übertragung der verwendeten Heizlastkurve, und auch das Stadt Berner Klima weicht nur wenig vom Schweizer Durchschnittsklima ab. Unklar ist hingegen, inwieweit der Berner Gebäudepark repräsentativ für den Schweizer Gebäudepark steht. Eventuell müssten für verschiedene Typen von Gebäudeparks oder Energieträger eigenständige Bereinigungsfaktoren entwickelt werden. Andererseits haben die Unterschiede zwischen den Fernwärme- und den Gasparametern nur eine beschränkte Wirkung auf die Güte der daraus abgeleiteten Bereinigungsfaktoren. Um die Übertragbarkeit der „Berner“ Korrekturfaktoren auf die Gesamtschweiz verlässlich beurteilen zu können, sollte die Analyse in anderen Regionen mit vergleichbaren Einspeisedaten wiederholt werden. Durch einen Vergleich der Ergebnisse liesse sich die Möglichkeit zur Übertragung empirisch überprüfen.

Aufgrund der Datenlage lassen sich in dieser Anwendung keine Anpassungen zu branchen- oder sektorspezifischen Reaktionen des Verbrauchs auf die Witterungsschwankungen machen. Das Verfahren nach GT+S hat gezeigt, dass nur beim Vorliegen von deutlich höherer oder deutlich geringerer Innentemperatur als in Wohngebäuden grössere Abweichungen zu erwarten sind.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>I</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>IV</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>VI</b>
<b>Verzeichnis der Abkürzungen, Akronyme und Symbole</b>	<b>IX</b>
<b>1 Witterung und Energieverbrauch</b>	<b>1</b>
1.1 Einleitung	1
<b>2 Die herkömmlichen Bereinigungsverfahren</b>	<b>4</b>
<b>3 Daten</b>	<b>8</b>
3.1 Fernwärmedaten	8
3.2 Erdgasdaten	11
3.3 Meteodaten	14
<b>4 Qualitative Vergleiche der Einspeisemengen und der Wetterparameter</b>	<b>16</b>
<b>5 Statistische Analyse – methodischer Ansatz</b>	<b>21</b>
5.1 Theoretisches Modell	21
5.2 Statistisches Modell	22
<b>6 Resultate</b>	<b>24</b>
6.1 Übersicht	24
6.2 Die Parameter der Wetterfaktoren im Einzelnen	28
<b>7 Neue Witterungsbereinigungsverfahren</b>	<b>33</b>
7.1 Entwicklung von Witterungsbereinigungsverfahren	33
7.2 Vergleich der Bereinigungsverfahren	38
7.3 Vergleich mit den herkömmlichen Bereinigungsverfahren	41
7.4 Übertragbarkeit auf die Gesamtschweiz	44
<b>8 Anhang</b>	<b>46</b>
8.1 Grafiken und Tabellen	46
8.2 Glossar	51
<b>9 Literatur</b>	<b>53</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vergleich der berechneten Witterungsreinigungsfaktoren. Als Referenzzeitraum wurde für alle Ansätze die Periode 1984 – 2002 gewählt. Die berücksichtigten Wetterdaten wurden aus 40 Wetterstationen nach Bevölkerung gewichtet und gemittelt, die Bereinigungsfaktoren gelten für die Gesamtschweiz.	6
Abbildung 2: Monatliche Einspeisemengen ins Fernwärmenetz in den Jahren 2000 bis 2007, ohne Industriekunde. Dabei zeigen sich teilweise deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Jahren, mit Abweichungen über 15 % vom Mittelwert der Jahre.	9
Abbildung 3: monatliche Einspeisemengen ins Gasnetz in den Jahren 2002 bis 2008; ohne Industriekunde und ohne drei der vier A-Gemeinden.	12
Abbildung 4: Verteilung der Jahresheizlast für Raumwärme auf die einzelnen Monate: Vergleich der Fernwärmedaten und der Gasdaten.	13
Abbildung 5: Zusammenhang zwischen täglicher Einspeisung ins Fernwärmenetz für Raumwärme und der mittleren Tagestemperatur, an Heiztagen.	16
Abbildung 6: Zusammenhang zwischen täglicher Einspeisung ins Fernwärmenetz und der mittleren Tagestemperatur.	17
Abbildung 7: Regressionsgeraden der Grössen Temperatur und Einspeisung ins Fernwärmenetz, nach einzelnen Monaten, an Heiztagen (Einspeisung nur Anteil Raumwärme).	18
Abbildung 8: Zusammenhang zwischen täglicher Einspeisung ins Fernwärmenetz und täglicher Solarstrahlung, nach Monaten (ohne Berücksichtigung des Einflusses der Temperatur).	18
Abbildung 9: Jahreskurven von monatlicher Einspeisemenge ins Fernwärmenetz für Raumwärme sowie Anzahl HGT und GT.	20
Abbildung 10: Jahreskurven von monatlicher Einspeisemenge ins Fernwärmenetz für Raumwärme und Strahlungsmenge.	20
Abbildung 11. Die geschätzten Temperaturparameter dargestellt im Jahresverlauf, Fernwärme und Gas im Vergleich. Zur Vereinfachung der Darstellung, wurden die Parameterwerte von Temperatur am Einspeisetag, Temperatur Vortag und Temperatur Vorvortag kumuliert.	27
Abbildung 12: Die geschätzten Parameter für die Strahlung, dargestellt im Jahresverlauf, Fernwärme und Gas im Vergleich.	27
Abbildung 13: Tägliche Einspeisung ins Fernwärmenetz an Januartagen (2000 bis 2008): effektive Einspeisung (blau) und geschätzte Einspeisung (rot). Indexierte Werte (1= durchschnittliche Tages-Einspeisung im Januar).	33

Abbildung 14: Monatliche Einspeisung ins Fernwärmenetz: effektive Einspeisung (blau) und geschätzte Einspeisung (rot), indexierte Werte (1=durchschnittlicher Jahresverbrauch).	35
Abbildung 15: Monatliche Einspeisung ins Gasnetz: effektive Einspeisung (blau) und geschätzte Einspeisung (rot), indexierte Werte (1=durchschnittlicher Jahresverbrauch).	36
Abbildung 16: Ein möglicher Verlauf von Hand „geglätteter“ Parameter, ausgehend von den mit den Fernwärmedaten geschätzten Parametern.	37
Abbildung 17: Vergleich zwischen der effektiven trendbereinigten Jahreseinspeisung ins Fernwärmenetz (FW) und den geschätzten Einspeisemengen, als Index (1 = durchschnittlicher trendbereinigter Jahresverbrauch der Referenzperiode).	42
Abbildung 18: Vergleich normierter trend- und witterungsbereinigter jährlicher Einspeisemengen ins Fernwärmenetz in Abhängigkeit vom gewählten Bereinigungsverfahren. (1 = durchschnittlicher trend- und witterungsbereinigter Jahresverbrauch der Referenzperiode).	43
Abbildung 19: Vergleich zwischen der effektiven und den geschätzten witterungsbedingten Verbrauchsänderungen gegenüber dem Vorjahr (Fernwärme (FW), trendbereinigt).	44
Abbildung 20: Vergleich Gradtage: Bern (2000-2007), Schweizer Mittel (2000-2007) und langfristige Referenzperiode Bern (1984-2002).	46
Abbildung 21: Vergleich Strahlungsmenge: Bern (2000 -2007), Schweizer Mittel (2000-2007) und langfristige Referenzperiode Bern (1984-2002).	46
Abbildung 22 Zusammenhang zwischen täglicher Einspeisung ins Gasnetz und der mittleren Tagestemperatur.	47
Abbildung 23: Zusammenhang zwischen täglicher Einspeisung ins Gasnetz und Strahlungsmenge.	47

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Die Witterungsbereinigungs-faktoren seit 1990 in Abhängigkeit des gewählten Bereinigungsverfahrens (Bereinigungs-faktoren für die Gesamtschweiz, Referenzperiode:1984 bis 2002).	7
Tabelle 2: Charakterisierung der bereinigten täglichen Einspeisemengen an Fernwärme für Raumwärme nach Monat, indexiert. Der Indexwert von 100 entspricht der durchschnittlichen täglichen Einspeisemenge während der Beobachtungszeit.	10

Tabelle 3: Charakterisierung der täglichen Einspeisemengen an Erdgas für Raumwärme nach Monat, indexiert. Der Indexwert von 100 entspricht der durchschnittlichen täglichen Einspeisemenge während der Beobachtungszeit.	12
Tabelle 4: Mittlere Tagestemperatur - deskriptive Werte für die einzelnen Monate und den Jahresmittelwert, in °C.	14
Tabelle 5: Tägliche Strahlungsmenge - deskriptive Werte für die einzelnen Monate und den Jahresmittelwert, in MJ/m <sup>2</sup> .	15
Tabelle 6: Korrelationskoeffizienten für den Zusammenhang zwischen "Heizgradtagen" mit variierender Heizgrenze und den gemessenen Einspeisemengen.	17
Tabelle 7: Ergebnisse der Prais-Winston Schätzung für die Einspeisungen ins Fernwärmenetz: Parameterwert in Bezug auf die Variablen Temperatur, Strahlung, Trend, Standardabweichung (in Klammern) und Signifikanzniveau $\alpha$ . *** entspricht dem 1 % $\alpha$ -Niveau, respektive ** dem 5 % und * dem 10 % $\alpha$ -Niveau. Die Samplegrösse wird durch die Anzahl Observationen beschrieben.	25
Tabelle 8: Ergebnisse der Prais-Winston Schätzung für die Einspeisungen ins Gasnetz: Parameterwert in Bezug auf die Variablen Temperatur, Strahlung, Trend, Standardabweichung (in Klammern) und Signifikanzniveau $\alpha$ . *** entspricht dem 1 % $\alpha$ -Niveau, respektive ** dem 5 % und * dem 10 % $\alpha$ -Niveau. Die Samplegrösse wird durch die Anzahl Observationen beschrieben.	26
Tabelle 9: Standardisierte Parameter der Fernwärmedaten- Analyse.	29
Tabelle 10: Standardisierte Parameter der Gasdaten- Analyse.	29
Tabelle 11: Die effektiven, die trendbereinigten und die mit verschiedenen Varianten geschätzten Jahreseinspeisungen als Indices. Der Indexwert 1 entspricht der durchschnittlichen trendbereinigten Jahreseinspeisung in der Referenzzeit. Aufgrund der unterschiedlichen Referenzzeiten zwischen Fernwärme und Gas entspricht der Indexwert 1 bei der Fernwärme nicht dem Indexwert 1 beim Gas.	39
Tabelle 12: Abweichungen zwischen den tatsächlichen trendbereinigten Einspeisemengen und den geschätzten trendbereinigten Einspeisemengen, in %-Punkten.	40
Tabelle 13: Die Bereinigungsfaktoren der herkömmlichen Witterungsbereinigungsverfahren und deren Abweichungen zur effektiven trendbereinigten Einspeisung ins Fernwärmenetz (in %-Punkten). Basis: Klimawerte Bern, Referenzzeit 2000 bis 2007. (ES: Einspeisung).	42
Tabelle 14: Anzahl Heiztage je Monat. Bei einer angenommenen Heizgrenze von 20°C entspricht dies der Anzahl Gradtags-Tage je Monat.	47
Tabelle 15: Von Hand „geglättete“ Parameter für das Modell Fernwärme, auf Basis der Prais-Winston Schätzung.	48

Tabelle 16: Von Hand „geglättete“ Parameter für das Modell Gas, auf Basis der Prais-Winston Schätzung. 48

Tabelle 17: Ergebnisse der Newey-West Schätzung für die Einspeisungen ins Fernwärmenetz: Parameterwert in Bezug auf die jeweilige Variable, Standardabweichung und Signifikanzniveau  $\alpha$ . \*\*\* entspricht dem 1 %  $\alpha$ -Niveau, respektive \*\* dem 5 % und \* dem 10 %  $\alpha$ -Niveau. Die Samplegrösse wird durch die Anzahl Observationen beschrieben. 49

Tabelle 18: Ergebnisse der Newey-West Schätzung für die Einspeisungen ins Gasnetz: Parameterwert in Bezug auf die jeweilige Variable, Standardabweichung und Signifikanzniveau  $\alpha$ . \*\*\* entspricht dem 1 %  $\alpha$ -Niveau, respektive \*\* dem 5 % und \* dem 10 %  $\alpha$ -Niveau. Die Samplegrösse wird durch die Anzahl Observationen beschrieben. 50

## Verzeichnis der Abkürzungen, Akronyme und Symbole

°C	Grad Celsius
%	Prozent
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BFE	Bundesamt für Energie
EFH	Einfamilienhaus
Erh <sub>ist</sub>	Energieverbrauch für Raumwärme - effektiv
Erh <sub>norm</sub>	Energieverbrauch für Raumwärme - witterungsbereinigt
ES	Einspeisung / Einspeiseindex
ewb	Energie Wasser Bern
FW	Fernwärme
GP	geglättete Parameter
GT	Gradtage
GT+S	Gradtag und Strahlung
HGT	Heizgradtage
KVA	Kehrichtverbrennungsanlage
kWh	Kilowattstunde
m <sup>2</sup>	Quadratmeter
MES	Monatliche Einspeisung (Index)
MFH	Mehrfamilienhaus
MJ	Megajoule
R <sup>2</sup>	Bestimmtheitsmass / Determinationskoeffizient
RP	Regressionsparameter
SIA	Schweizerische Ingenieur- und Architektenvereinigung
TBES	Trendbereinigte Einspeisung (Index)

# 1 Witterung und Energieverbrauch

## 1.1 Einleitung

Die Erzeugung von Raumwärme ist eine der frühesten Nutzungen materieller Energiequellen. Sie macht auch heute einen grossen Anteil in der Energiebilanz der Schweiz aus. Der Raumwärmebedarf ist direkt von Klima und Witterung abhängig und kann bei ein und demselben Gebäude oder Gebäudepark von Jahr zu Jahr je nach Witterungsverhältnissen („kalte“ oder „warme“ Winter) erheblich schwanken.

Bei der Bearbeitung und Analyse von aggregierten Energieverbräuchen (z.B. auf nationaler oder regionaler Ebene) im Zeitablauf spielt die Generierung witterungsbereinigter Energieverbräuche, respektive die Bereinigung der Energieverbräuche um den Witterungseffekt, eine wesentliche Rolle. Diese ist notwendig, um z.B. längerfristige Trends in den Energiebilanzen identifizieren zu können oder auch die Wirkung energiepolitischer Instrumente überprüfen sowie ggf. adjustieren zu können. Insbesondere für das Verständnis von Energieverbrauchsschwankungen zwischen aufeinander folgenden Jahren ist der Witterungseffekt von herausragender Bedeutung. Hingegen verlieren die witterungsbedingten Veränderungen bei der Betrachtung der längerfristigen Energieverbrauchsentwicklung an Bedeutung. Die jährlichen Effekte weisen wechselnde Vorzeichen auf und kompensieren sich dadurch im Verlauf der Jahre mehr oder weniger gegenseitig. Der langfristige Effekt der Klimaveränderung ist gegenüber den jährlichen Witterungsschwankungen viel geringer.<sup>1</sup>

Die Witterungs- oder Klimaabhängigkeit betrifft in erster Linie den Raumwärmeverbrauch in den Sektoren Haushalte, Dienstleistungen und Industrie<sup>2</sup>. Von deutlich geringerer Bedeutung ist der Einfluss der Witterung auf den Verbrauch zur Erzeugung von Warmwasser und Prozesswärme. Deshalb wird im Rahmen dieser Arbeit nur die Abhängigkeit zwischen Witterung und Raumwärmeverbrauch untersucht.

In den meisten westeuropäischen Ländern wird die Temperaturabhängigkeit des Energieverbrauchs als einem einfachen Heizgradtagszusammenhang folgend angenommen: Ein Teil des entsprechenden Energieverbrauchs verändert sich linear mit der Veränderung der jährlichen Anzahl Heizgradtage (HGT). Eine

---

<sup>1</sup> Dieser langfristige Klimaveränderungseffekt ist von grundsätzlich anderer Natur als die jährlichen Witterungsschwankungen. Darauf wird hier aber nicht eingegangen. Er ist jedoch schon dann von Bedeutung, wenn die Klimaeinflüsse über etwa 1.5 Jahrzehnte betrachtet werden.

<sup>2</sup> Grundsätzlich können sich die Witterungsbedingungen bei Fahrzeugen auf die Fahrzeugheizung und die Klimatisierung auswirken, diese Effekte sind jedoch klein.

empirische Überprüfung dieses Verfahrens ist grundsätzlich schwierig und in den seltensten Fällen erfolgt. Eine Alternative zum HGT-Verfahren bietet der Ansatz von Prognos. Dieses komplexere Verfahren zur Witterungsbereinigung korreliert die jährlichen Verbrauchsschwankungen mit den monatlichen Veränderungen von Temperatur und Strahlung (Prognos, 2003). Basis dieser Untersuchung waren die Standardberechnungsverfahren für den Heizwärmebedarf, den Nutzungsgrad der Heizanlagen und den Energieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser nach den SIA-Rechenmodellen für die Energiebilanzierung von Einzelgebäuden auf Monatsbasis.

Ein Vergleich der beiden herkömmlichen Ansätze zeigt, dass sich die jeweiligen Bereinigungs-faktoren in den meisten Jahren nur unwesentlich unterscheiden, bei Abweichungen von weniger als 1 %-Punkt, bezogen auf den gesamten Raumwärmeverbrauch. In einzelnen Jahren beträgt der Unterschied zwischen den Faktoren jedoch bis zu 2 %-Punkten, am grössten ist der Unterschied im Jahr 2007, welches unter Witterungsaspekten aussergewöhnlich war. In 2007 unterscheiden sich die Ansätze um mehr als 4 %-Punkte. Mit anderen Worten, in Abhängigkeit des gewählten Bereinigungsverfahrens liegt der witterungsbereinigte Endenergieverbrauch für Raumwärme um mehr als 4 % höher oder tiefer.

Zwar scheint aufgrund von Modellberechnungen (Prognos, 2003) das komplexere Verfahren auf Basis von Monatswerten von Temperatur und Strahlung mit den witterungsbedingten Energieverbrauchsschwankungen besser zu korrelieren als die kumulierten Jahressummen von HGT, der empirische Beleg dafür steht jedoch noch aus. Das grundsätzliche Problem bei Fragen der Angemessenheit und Korrelationsgenauigkeit solcher Verfahren besteht darin, dass für die Aggregation der Energieverbräuche von den Einzelgebäuden zum Gesamtverbrauch eines „Gebäudeparks“ oder gar zu einem sektoralen Brennstoffverbrauch Einzelheiten über Eigenschaften der Verteilung des Gebäudeparks und der Nutzungsstrukturen in einer Differenzierung benötigt würden, die als Daten nicht vorliegen und vermutlich auch nicht erhoben werden können. Für diesen Übergang zwischen einer „Bottom-Up“- und einer „Top-Down“-Berechnung ist eine empirische Untersuchung aggregierter Energieverbrauchsströme in einem möglichst gut bekannten und sich wenig verändernden räumlich abgegrenzten Gebiet notwendig.

Das Ziel dieser Studie ist es, diese Lücke zu schliessen: die in der Prognos Studie dokumentierten Zusammenhänge zwischen Temperatur, Strahlung und Energieverbrauch sollen anhand von leitungsgebundenen Verbrauchsdaten empirisch überprüft werden. Im Besonderen soll anhand konkreter täglicher Einspeisemengen untersucht werden, ob

- ein Zusammenhang zwischen der Aussentemperatur und dem leitungsgebundenen Energieverbrauch besteht,
- welcher Art dieser Zusammenhang ist,
- und inwieweit die zusätzliche Berücksichtigung der Solarstrahlung die gefundenen Zusammenhänge verbessert.
- Dies ermöglicht einerseits eine Einschätzung der Güte der bestehenden Witterungsbereinigungsverfahren und
- andererseits die Entwicklung neuer Methoden zur Berechnung von Witterungsbereinigungsfaktoren.

Die Vorteile dieser neuen Modelle liegen in der Verankerung auf empirischen Daten, deren belastbarer statistischer Aussagekraft und der Loslösung vom Konstrukt der Heizgradtage. Leitungsgebundene Energieträger eignen sich besonders gut für eine Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Witterung und Energieverbrauch, weil deren Verbrauch im Gegensatz zu Heizöl oder Holz nicht durch schwer quantifizierbare Lagereinflüsse überlagert wird. Die ins Netz eingespeisten Mengen können demnach mit dem Verbrauch gleichgesetzt werden. Die konkreten Einspeisedaten wurden freundlicherweise von der *Energie Wasser Bern (ewb)* bereitgestellt, sie umfassen sowohl die tägliche Einspeisung ins Fernwärmenetz der Stadt Bern als auch die Einspeisung ins lokale Gasnetz.

Falls die Analyse die Resultate des Verfahrens auf Basis von Gradtag und Strahlung nicht (genügend) stützt, könnte dies auch ein Hinweis auf gewisse Verbesserungspotenziale in den SIA-Berechnungsmodellen sein.

#### **Aufbau des Berichts:**

In Kapitel 2 erfolgt ein kurzer Überblick über die zwei zurzeit gängigen Witterungsbereinigungsverfahren. Der eigentliche Untersuchungsansatz umfasst im Wesentlichen zwei Teilschritte. Im ersten Schritt werden aus den vorhandenen Rohdaten die temperaturabhängigen Verbrauchsbereiche möglichst genau extrahiert (Datenbereinigung) und die Charakteristiken dieser Daten beschrieben (Kapitel 3). In Kapitel 4 folgt ein deskriptiver Vergleich der Wetterdaten mit den bereinigten Einspeisemengen.

In einem zweiten Arbeitsschritt werden mit Hilfe statistischer Verfahren die Verbrauchsreihen mit den Wertereihen der Wetterdaten verknüpft, um Art, Umfang und Richtung der Beeinflussung der Verbräuche durch die Wetterfaktoren zu quantifizieren (Kapitel 5). Die Resultate der Analyse und deren Diskussion folgen in Kapitel 6. In Kapitel 7 werden mittels der geschätzten Parameter verschiedene Witterungsbereinigungsfaktoren berechnet und einerseits deren Güte anhand der effektiven Einspeisemengen überprüft. Andererseits werden die Ergebnisse mit den herkömmlichen Bereinigungsfaktoren der Verfahren HGT und GT+S verglichen.

## 2 Die herkömmlichen Bereinigungsverfahren

In der Schweiz sind Analysen zur Witterungsabhängigkeit des (aggregierten) Raumwärmeverbrauchs, insbesondere der Temperatur- und Strahlungsabhängigkeit, seit langem Gegenstand von Untersuchungen (z.B. Carlevaro und Spierer, 1986). Die frühen Untersuchungen aus den 80er Jahren waren meist statistische Analysen des Zusammenhangs zwischen Heizgradtagen und grossen bzw. groben Verbrauchsaggregaten, weil die an sich notwendigen, feiner strukturierten Daten fehlten. Dabei werden Heiztage gezählt, wenn die mittlere Tagestemperatur eine äussere Grenztemperatur (Heizgrenze) nicht überschreitet. Bei den Heizgradtagen werden diese Heiztage gewichtet mit der Differenz der Innentemperatur zur mittleren Tagestemperatur. Heizgradtage sind in verschiedenen Definitionen gebräuchlich: mit Innentemperaturen von 20°C oder 18°C und verschiedenen äusseren Grenztemperaturen für die Inbetriebnahme der Heizanlage (meist 12° oder 15° Celsius). Am üblichsten sind zurzeit die HGT 12/20 mit einer Grenztemperatur von 12°C und eine Innentemperatur von 20°C. Eine „Sonderform“ der Heizgradtage sind die Gradtage, bei welchen die Heizgrenztemperaturen der Innentemperatur gleichgesetzt wird (in der Regel 20°C).

In den Untersuchungen der 90er Jahre von E.A. Müller wurde der Einfluss der Wetterfaktoren Temperatur, Globalstrahlung, Windverhältnisse und Luftfeuchtigkeit analysiert (beispielsweise E.A. Müller et al., 1995). Nach Müller hat die Temperatur unter den Wetterfaktoren die grösste Bedeutung auf die Energieverbrauchsschwankungen (rund 90 %), gefolgt von der Globalstrahlung (ca. 10 %). Demgegenüber sind die Wirkungen der Windverhältnisse und der Luftfeuchtigkeit vergleichsweise unbedeutend. Gemäss den Untersuchungen von Müller ist nicht der gesamte Energieverbrauch, welcher zur Erzeugung von Raumwärme eingesetzt wird witterungsabhängig.

Die derzeit am häufigsten angewandten Witterungsbereinigungsverfahren basieren für die Jahresbetrachtung auf einem von Müller vorgeschlagenen Berechnungsverfahren. Obwohl gemäss den Müller-Studien die Verbrauchsschwankungen bis zu 10 % durch die Globalstrahlung beeinflusst werden, wird die Strahlung in diesen Berechnungsverfahren nicht berücksichtigt. Entsprechend wird die Klimaabhängigkeit auf die Temperaturverläufe reduziert und diese zur zeitlich und räumlich integrierten Kennzahl Heizgradtage zusammengefasst. Der Müller Ansatz kann ausgedrückt werden durch:

$$Erh_{norm} = Erh_{ist} \cdot \alpha \cdot \frac{HGT_{norm}}{HGT_{ist}} + Erh_{ist} \cdot (1 - \alpha)$$

Dabei bildet  $Erh_{norm}$  den witterungsbereinigten und  $Erh_{ist}$  den effektiven Energieverbrauch für Raumwärme ab,  $HGT_{norm}$  ist die durchschnittliche Anzahl der Heizgradtage im Referenzzeitraum,  $HGT_{ist}$  die Anzahl Heizgradtage im Betrachtungsjahr und  $\alpha$  der Anteil des Verbrauchs, welcher witterungsabhängig ist. Beispielsweise wird  $\alpha$  durch den Anteil der benutzerbedingten Lüftungsverluste beeinflusst. Für ein mittleres Wohngebäude beziffert Müller  $\alpha$  zwischen 0.6-0.9, entsprechend wird für  $\alpha$  üblicherweise der Wert 0.75 verwendet.

Eine vereinfachte Variante des Müller-Ansatzes wird beim BAFU für die Bereinigung der Gesamtmenge des Brennstoffverbrauchs eingesetzt:

$$Erh_{norm} = \frac{Erh_{ist} \cdot HGT_{norm}}{(HGT_{norm} + (HGT_{ist} - HGT_{norm}) \cdot \alpha)}$$

wobei  $\alpha$  mit 0.65 benannt wird (BAFU, 2008). Da in der Gesamtmenge der Brennstoffverbräuche auch nicht raumwärmebedingte Verbräuche mit berücksichtigt sind (z.B. Warmwasseraufbereitung, Prozesswärme), ist bei diesem Ansatz der Wert von  $\alpha$  kleiner als der  $\alpha$ -Wert beim klassischen Müllerverfahren für Raumwärme (0.75). Die Unterschiede zwischen dem vereinfachten BAFU-Ansatz und dem vollen Müller-Ansatz ist dabei relativ gering (siehe Abbildung 1).

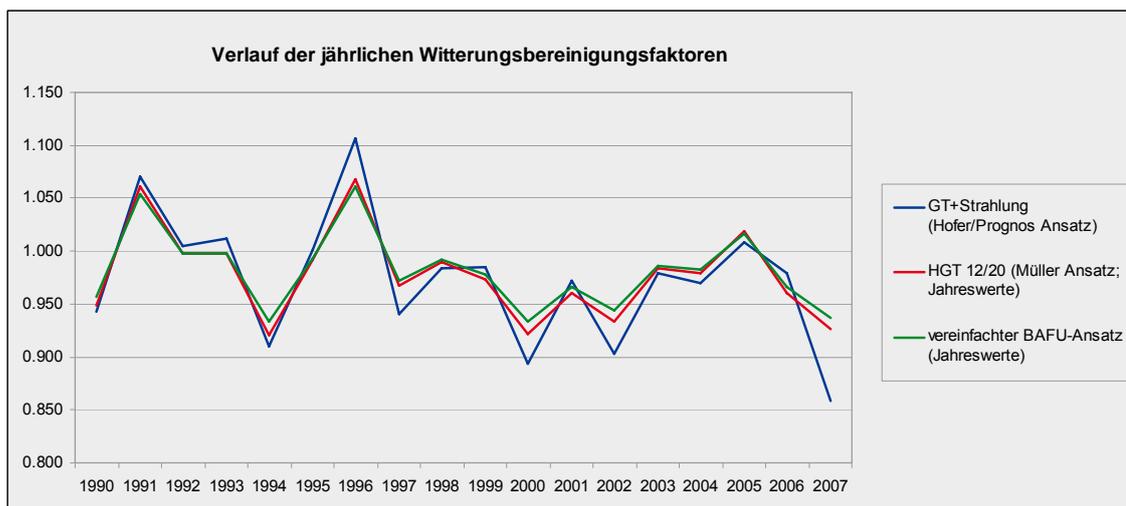
In der aktuellsten Untersuchung zur Witterungsbereinigung in der Schweiz hat Hofer gezeigt, dass die jährlichen Energieverbrauchsschwankungen besser mit den monatlichen Abweichungen von Temperatur (als Gradtage) und Strahlung als mit den kumulierten Jahreswerten von HGT erklärt werden sollten (Prognos, 2003). Basis dieser Untersuchung und des daraus abgeleiteten Bereinigungsverfahrens bilden die Standardberechnungsverfahren für den Heiz- bzw. Nutzwärmebedarf, den Nutzungsgrad der Heizanlagen und den Energieverbrauch für Raumwärme einer gewissen Anzahl von Gebäudetypen nach den SIA-Rechenmodellen auf Monatsbasis. Hierfür wurde eine grosse Anzahl verschiedener Gebäude und Nutzungen (EFH, MFH, Büro, Lagerhallen, etc.) zugrunde gelegt und je nach Verbrauchssektor und Gebäudetyp unterschiedliche Witterungseinflüsse abgeschätzt. Diese Witterungseinflüsse werden in monatliche oder jährliche Bereinigungsfaktoren umgesetzt. Dieses Bereinigungsverfahren ist auch formal deutlich komplexer aufgebaut als der Müller-Ansatz und basiert auf einem umfangreichen Rechenschema.

Eine zentrale Grösse bei allen Ansätzen bilden die so genannten Witterungsbereinigungsfaktoren. **Die Witterungsbereinigungsfaktoren sind im Folgenden definiert als das Verhältnis des jährlichen IST-Verbrauchs zum entsprechenden witterungsbereinigten Verbrauch.** Demgemäss ergibt sich der witterungs-

bereinigter Verbrauch aus der Division des IST-Verbrauchs durch den Bereinigungsfaktor. Ein Bereinigungsfaktor von 1 entspricht dem durchschnittlichen Witterungseinfluss in der Referenzperiode. Witterungsbedingte Mehrverbräuche sind mit Bereinigungsfaktoren mit Werten grösser als 1 assoziiert, Minderverbräuche mit Werten kleiner als 1. Zur Generierung von Bereinigungsfaktoren für die Gesamtschweiz werden die Tagesmittelwerte der Wetterdaten mehrerer Messstationen verwendet, und diese, mangels geeigneter Indikatoren zumeist mit der Bevölkerung im Umkreis der Messstationen gewichtet.

Abbildung 1 bildet die jährlichen Bereinigungsfaktoren ab, die sich bei der Anwendung der drei verschiedenen Ansätze ergeben. Mit Ausnahme des Jahres 2007 und in geringerem Ausmass in den Jahren 1996, 1997, 2000 und 2002, sind die Differenzen gering. Das Verfahren von Hofer/Prognos auf Basis von Gradtagen und Strahlung zeigt ausgeprägtere Jahresschwankungen; die stärkere Modulation des Witterungseinflusses ist unter anderem auf die zusätzliche Berücksichtigung der Strahlung zurückzuführen. Demgegenüber reagieren die Korrekturverfahren auf Basis von aggregierten Jahres-HGT-Werten weniger stark gegenüber Witterungseinflüssen.

*Abbildung 1: Vergleich der berechneten Witterungsbereinigungsfaktoren. Als Referenzzeitraum wurde für alle Ansätze die Periode 1984 – 2002 gewählt. Die berücksichtigten Wetterdaten wurden aus 40 Wetterstationen nach Bevölkerung gewichtet und gemittelt, die Bereinigungsfaktoren gelten für die Gesamtschweiz.*



*Tabelle 1: Die Witterungsbereinigungsfaktoren seit 1990 in Abhängigkeit des gewählten Bereinigungsverfahrens (Bereinigungsfaktoren für die Gesamtschweiz, Referenzperiode: 1984 bis 2002).*

	GT+Strahlung	HGT 12/20	"vereinfachter BAFU-Ansatz"
1990	0.942	0.949	0.957
1991	1.071	1.061	1.054
1992	1.005	0.997	0.998
1993	1.012	0.998	0.998
1994	0.910	0.921	0.933
1995	1.001	0.992	0.993
1996	1.107	1.069	1.061
1997	0.940	0.967	0.972
1998	0.983	0.990	0.991
1999	0.985	0.974	0.977
2000	0.894	0.921	0.933
2001	0.972	0.961	0.967
2002	0.903	0.934	0.944
2003	0.980	0.984	0.986
2004	0.969	0.980	0.982
2005	1.008	1.019	1.016
2006	0.979	0.960	0.966
2007	0.859	0.926	0.937

## 3 Daten

Die in der Analyse verwendeten leitungsgebundenen Energieverbrauchsdaten wurden vom Energieversorger *Energie Wasser Bern (ewb)* zur Verfügung gestellt. Es handelt sich dabei um tägliche Einspeisemengen ins Fernwärme- und Gasnetz. Aufgrund der Vertraulichkeit gewisser Daten, werden im Bericht keine absoluten Einspeisemengen offen gelegt und bei der Beschriftung von Grafiken die Einheiten weggelassen oder Indexwerte angegeben. Die täglichen Werte der Wetterfaktoren Temperatur und Strahlung stammen von *MeteoSchweiz*.

### 3.1 Fernwärmedaten

Das Fernwärmenetz der *ewb* beliefert ausschliesslich Kunden in der Gemeinde Bern. Beliefert werden 481 Kunden, wovon es sich bei einem Kunden um einen Industriekunden handelt. Gespiesen wird das Fernwärmenetz hauptsächlich durch eine Kehrichtverbrennungsanstalt, in den Wintermonaten wird durch einen Gasbrenner zusätzliche Wärme erzeugt. Beim Fernwärmeabsatz geht die *ewb* von einer HGT-bereinigten stabilen Absatzmenge aus.<sup>3</sup> Die Kapazität des Fernwärmenetzes und die Anzahl der Kunden hat sich innerhalb der Beobachtungsperiode nicht verändert, die Absatzschwankungen sind demnach grundsätzlich auf Witterungsschwankungen zurückzuführen.

In der Analyse wurden die Angaben über die täglichen Einspeisemengen in kWh über den Zeitraum von 1.1.2000 bis zum 31.3.2008 verwendet. Die Einspeisemengen werden physikalisch, durch hydraulische Messung, am Ort der Einspeisung ins Netz erhoben. Nur drei der 3013 zur Verfügung stehenden Tageswerte wurden als Ausreisser identifiziert. Laut Aussage der *ewb* sind jedoch die in den Sommermonaten ausgewiesenen Einspeisemengen mit grösseren Ungenauigkeiten versehen als jene in den übrigen Monaten.

Um den Zusammenhang zwischen Witterung und dem Raumwärmebedarf untersuchen zu können, mussten die Rohdaten der Einspeisemengen um den Verbrauch des einzelnen Industriekunden und den Verbrauch zur Erzeugung für Warmwasser bereinigt werden. In den von der *ewb* zur Verfügung gestellten Daten sind die Monatsverbräuche des einzelnen Industriekunden enthalten, diese basieren auf den monatlichen

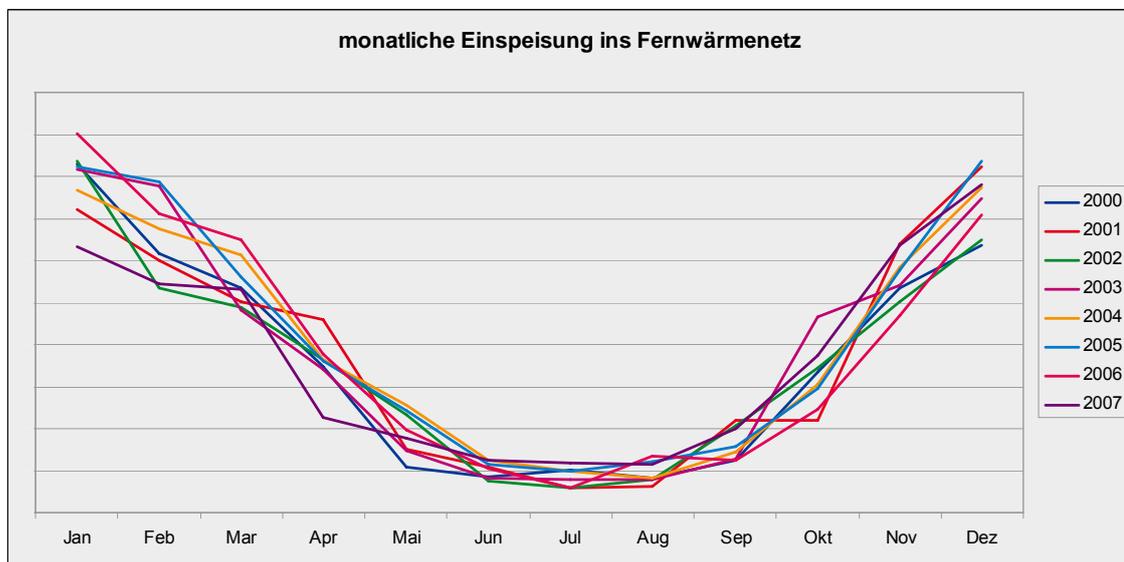
---

<sup>3</sup> Im Gegensatz zu den Annahmen der *ewb* liefert unsere Analyse Hinweise auf eine Abnahme der witterungsbereinigten Absatzmenge, um rund 4 % im Zeitraum 2000 bis 2008.

Abrechnungen.<sup>4</sup> Der Verbrauch des Industriekunden beläuft sich in den Wintermonaten auf rund 3 %, in den Sommermonaten auf bis zu 20 % der Einspeisemenge. Zur Bereinigung wurden die Monatsverbräuche des Industriekunden in durchschnittliche Tagesverbräuche je Monat umgerechnet und diese von den täglichen Roheinspeisemengen subtrahiert. Der daraus resultierende Restverbrauch sollte sich aus dem Verbrauch für Raumwärme, aber auch aus einem Teil für Warmwasser zusammensetzen.

Es wird davon ausgegangen, dass der Einfluss der Witterung auf den Energieverbrauch zur Erzeugung von Warmwasser vernachlässigbar ist.<sup>5</sup> Ebenfalls vernachlässigt werden Verbrauchsunterschiede zwischen Wochen- und Wochenendtagen sowie ein allfälliger Minderverbrauch während Ferienzeiten. Daraus ergibt sich ein Energieverbrauch für Warmwasser, der keine nennenswerte saisonale Verbrauchschwankung zeigt, sondern über den Jahresverlauf annähernd konstant ist. Da der Verbrauch für Raumwärme in den Sommermonaten im Allgemeinen gegen Null tendiert, dürfte der Warmwasserverbrauch demnach in etwa dem Sockelverbrauch in Abbildung 2 entsprechen.

*Abbildung 2: Monatliche Einspeisemengen ins Fernwärmenetz in den Jahren 2000 bis 2007, ohne Industriekunde. Dabei zeigen sich teilweise deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Jahren, mit Abweichungen über 15 % vom Mittelwert der Jahre.*



<sup>4</sup> Die Einspeisemengen, welche in den monatlichen Abrechnungen ausgewiesen werden, unterscheiden sich leicht von den physikalisch erfassten Tages-Einspeisemengen. Der Grund für die Differenzen sind nach Aussage der ewb geringfügige Verschiebungen im Erfassungszeitraum. Die Unterschiede wurden vernachlässigt.

<sup>5</sup> Sowohl bei Müller als auch bei Hofer (Prognos) ist der Temperatureinfluss, bzw. der Witterungseinfluss auf den Warmwasserverbrauch gering. Mutmasslich reagiert der Warmwasserbedarf in den Sommer- bzw. Wintermonaten mengenmässig stärker als es der reine Temperatur- bzw. Witterungseffekt anzeigt. Darüber liegen aber keine belastbaren Daten vor.

Zur Quantifizierung des Warmwasserverbrauchs wurden die Einspeisemengen an den Nicht-Heiztagen, also an Tagen mit einer mittleren Temperatur über 20°C betrachtet. Der mittlere Tagesverbrauch an diesen Tagen wurde zur Bereinigung des Warmwasserverbrauchs von den täglichen Einspeisemengen subtrahiert. Einzelne Tageswerte erhielten dadurch eine negative Einspeisemenge, diese Werte wurden auf Null gesetzt.<sup>6</sup> Wird die so bestimmte tägliche Verbrauchsmenge auf den Monatsverbrauch hochgerechnet, stimmt sie ziemlich genau mit dem Sockel in Abbildung 2 überein.

Die um den Verbrauch des Industriekunden sowie den Warmwasserverbrauch bereinigten Einspeisemengen sollten nun dem Energieverbrauch für Raumwärme entsprechen. Um sicher zu gehen, dass in der Analyse tatsächlich nur der Raumwärmebedarf berücksichtigt wird, wurden zusätzlich alle Observationen aus dem Sample entfernt, an denen die mittlere Tagestemperatur 20°C oder höher ist.<sup>7</sup> Dadurch werden 248 der 3013 Tageswerte aus dem Sample entfernt (8 %).

Die Charakteristika der bereinigten Einspeisedaten, die in der Analyse verwendet werden, sind in Tabelle 2 dargestellt. Die Heizlastverteilung gibt an, wie sich der Jahresverbrauch für Raumwärme durchschnittlich auf die einzelnen Monate verteilt.

*Tabelle 2: Charakterisierung der bereinigten täglichen Einspeisemengen an Fernwärme für Raumwärme nach Monat, indexiert. Der Indexwert von 100 entspricht der durchschnittlichen täglichen Einspeisemenge während der Beobachtungszeit.*

	Sample	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Mittel	100	199	179	134	83	35	15	7	9	28	71	142	188
Minimum	0	82	96	33	4	0	0	0	0	0	0	52	89
Maximum	316	302	298	290	178	121	88	39	55	126	183	238	316
Median	94	195	175	129	81	31	11	3	6	21	65	139	187
Quartil 0.05	0	120	116	64	18	0	0	0	0	0	24	84	119
Quartil 0.95	233	278	245	218	154	88	43	32	30	77	140	212	259
Standard Abweichung	79	46	41	47	41	27	16	10	10	23	35	37	43
Heizlastverteilung	100%	19.1%	15.7%	12.6%	7.6%	3.2%	0.9%	0.4%	0.6%	2.5%	6.7%	13.0%	17.8%
Anzahl Observationen	2'765	279	255	279	240	240	158	165	179	234	248	240	248

<sup>6</sup> Der Verbrauch sollte um den Warmwasserverbrauch bereinigt werden, da sonst die Regressionen über die indexierten Tageseinspeisungen verzerrt würden, dies gilt insbesondere für die Sommermonate, in welchen die Erzeugung von Warmwasser bis zu 80 % des Gesamtverbrauchs verursacht. Indexierte Einspeisewerte, z.B. als Index „Tageseinspeisung / durchschnittliche Monatseinspeisung“, sind interessant bei der Entwicklung der monatlichen und jährlichen Bereinigungs-faktoren. Die Bereinigung um den Warmwasserverbrauch ist auch notwendig zur Bestimmung der Verteilung der Jahresheizlast für Raumwärme.

<sup>7</sup> Es wird davon ausgegangen, dass an Tagen mit einer mittleren Tagestemperatur von 20°C im Allgemeinen nicht geheizt wird (Heizgrenze 20°C). Falls an solchen Tagen der Verbrauch für Warmwasser über dem geschätzten Durchschnittsverbrauch liegt, beträgt die ausgewiesene Einspeisung für Raumwärme auch nach dem Abzug des geschätzten Sockelverbrauchs nicht Null. Aus diesem Grund werden die Tageswerte mit einer mittleren Tagestemperatur von 20°C oder höher in der statistischen Analyse nicht berücksichtigt. Es bleibt anzumerken, dass in bestimmten Gebäuden, beispielsweise Spitälern oder Hallenbädern, auch an Tagen mit einer mittleren Temperatur über 20°C geheizt wird. Diese Raumwärmeverbräuche werden in dieser Analyse aufgrund des beschriebenen Vorgehens vernachlässigt.

## 3.2 Erdgasdaten

Das Erdgas Versorgungsgebiet der *ewb* umfasst nebst der Gemeinde Bern noch 11 umliegende Gemeinden. Vier dieser Gemeinden beziehen von der *ewb* das Erdgas, verfügen aber über eigenständige Vertriebsorganisationen (so genannte A-Gemeinden), in den übrigen 8 Gemeinden beliefert die *ewb* die Kunden direkt (so genannte B-Gemeinden)<sup>8</sup>. Beim Erdgas stehen ebenfalls die Angaben zu den täglichen Einspeisemengen in kWh zur Verfügung, der Zeitraum der Datenreihe ist etwas kürzer und umfasst die Periode vom 22.9.2002 bis zum 30.4.2008. Im Datensatz werden die tägliche Gesamteinspeisemenge, die Einspeisung für einen einzelnen Industriegrosskunden sowie die Liefermengen für drei der vier A-Gemeinden unterschieden. Das Erdgasnetz verfügt über einen kleinen Ausgleichsspeicher, der die Schwankungen in der nachgefragten Gasmenge zu glätten hilft. Da die Einspeisewerte nach dem Ausgleichsspeicher erhoben werden, sollte durch den Ausgleichsspeicher jedoch keine unerwünschte Verzerrung der täglichen Einspeisemengen entstehen. Offensichtliche Ausreisser wurden nicht identifiziert, insgesamt stehen 2048 Tagesobservationen zur Verfügung.

Um von den Rohdaten die täglichen Einspeisemengen für Raumwärme zu erhalten, wurde eine zu den Fernwärmedaten analoge Bereinigungsverfahren angewandt: Von der täglichen Gesamteinspeisemenge wurden die Tageswerte des einzelnen ausgewiesenen Industriekunden sowie jene der drei ausgewiesenen A-Gemeinden subtrahiert. Anschliessend wurde der Sockelverbrauch geschätzt und ebenfalls abgezogen, wobei die sich teilweise ergebenden negativen Werte auf Null gesetzt wurden. Im Gegensatz zu den Fernwärmedaten besteht der Sockelverbrauch bei den Gaseinspeisedaten nicht ausschliesslich aus dem Verbrauch für Warmwasser, sondern zusätzlich aus dem Verbrauch für nicht einzeln ausgewiesene industrielle und gewerbliche Prozesse sowie zu einem geringen Teil aus dem Verbrauch für Gaskochherde. Trotzdem wird auch bei der Gaseinspeisung von einem annähernd konstanten Sockelverbrauch ausgegangen, eine grafische Analyse stützt diese Annahme (Abbildung 3). Der tägliche Sockelverbrauch wurde bestimmt als die durchschnittliche Einspeisemenge an Tagen mit einer mittleren Tagestemperatur über 20°C. Auch bei den Gasdaten stimmt dieser berechnete Sockelverbrauch gut mit dem Sockel in Abbildung 3 überein, wenn die täglichen Sockelverbräuche auf Monatsverbräuche hochgerechnet werden. Analog zu den Fernwärmedaten wurden auch bei den Gasdaten nur die Tageswerte von potenziellen „Heiztagen“ verwendet, an denen die mittlere Tagestemperatur

<sup>8</sup>

A-Gemeinden: Wohlen bei Bern, Muri bei Bern, Moosseedorf, Urtenen-Schönbühl. B-Gemeinden: Bern, Köniz, Ostermundigen, Bremgarten bei Bern, Ittigen, Zollikofen, Kirchlindach, Münchenbuchsee.

weniger als 20°C beträgt. Insgesamt werden 1870 der 2048 Observationen in der Analyse berücksichtigt (Tabelle 3).

Abbildung 3: monatliche Einspeisemengen ins Gasnetz in den Jahren 2002 bis 2008; ohne Industriekunde und ohne drei der vier A-Gemeinden.

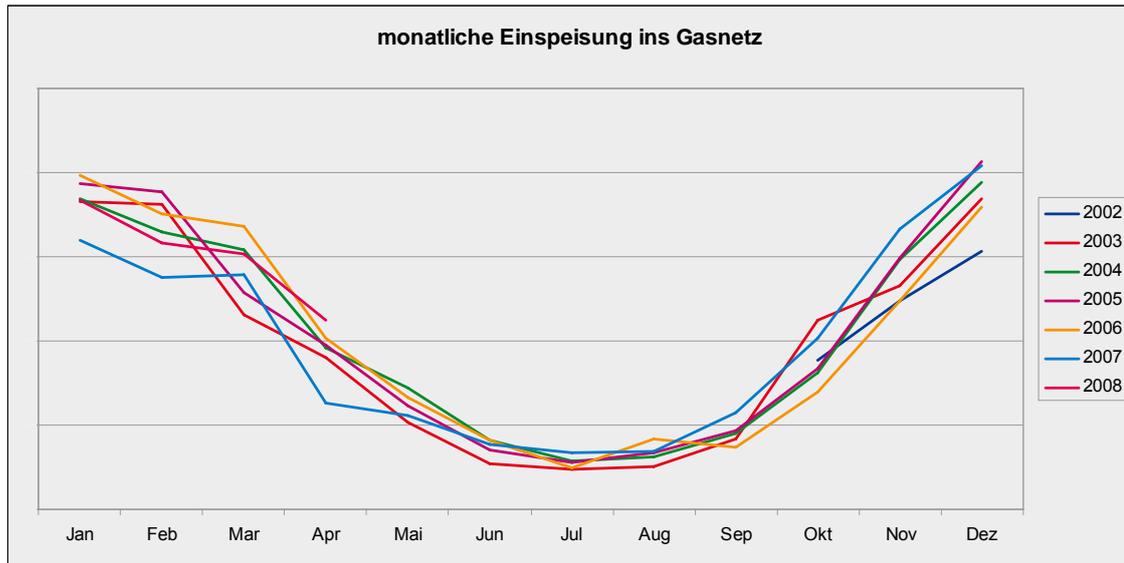


Tabelle 3: Charakterisierung der täglichen Einspeisemengen an Erdgas für Raumwärme nach Monat, indexiert. Der Indexwert von 100 entspricht der durchschnittlichen täglichen Einspeisemenge während der Beobachtungszeit.

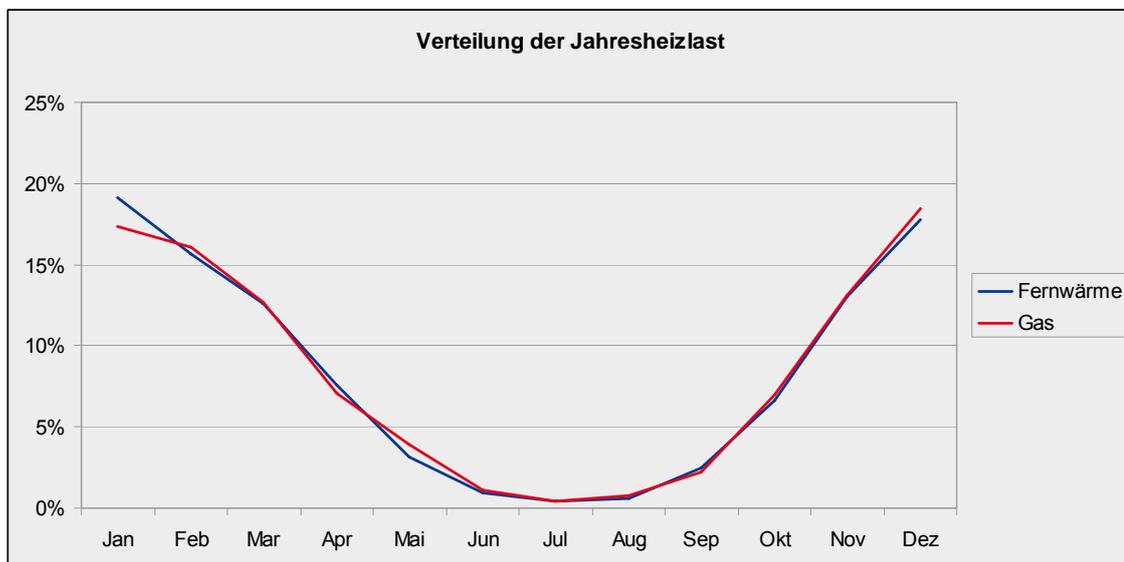
	Sample	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Mittel	100	178	177	132	79	41	19	7	11	27	71	134	181
Minimum	0	72	92	33	6	0	0	0	0	0	15	60	86
Maximum	260	254	257	234	185	118	106	36	56	102	175	232	260
Median	94	183	179	127	73	36	14	4	10	23	63	130	186
Quartil 0.05	2	106	110	59	20	6	0	0	0	0	29	78	107
Quartil 0.95	216	229	232	209	153	95	54	26	30	71	134	208	242
Standard Abweichung	72	37	37	47	40	27	19	9	11	22	33	38	40
Heizlastverteilung	100%	17.4%	16.0%	12.7%	7.1%	3.9%	1.1%	0.4%	0.8%	2.2%	7.0%	13.1%	18.4%
Anzahl Observationen	1'870	186	170	186	180	150	92	87	114	153	186	180	186

Die Verteilung der Jahresheizlast auf die einzelnen Monate unterscheidet sich leicht von der Fernwärmejahresverteilung. Bei den Gasdaten liegt der Monatsanteil an der Jahresheizlast im Dezember etwas höher, dafür im Januar um rund 1.5%-Punkte tiefer als bei den Fernwärmedaten. Auch im Mai unterscheiden sich die Verteilungen um mehr als einen halben Prozentpunkt, in den übrigen Monaten sind die Abweichungen gering. Die Differenzen könnten aufgrund von Unterschieden in der energetischen Qualität der Gebäudehüllen der belieferten Gebäudebestände zustande kommen. Eine systematische Verschiebung der Wärmelast von den Sommer- und Übergangsmonaten in die Wintermonate lässt sich jedoch nicht beobachten. Deshalb dürften die Differenzen

eher auf die unterschiedlichen Verwendungszwecke zurückzuführen sein: Das Gas wird nicht ausschliesslich zur Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser eingesetzt, sondern auch in industriellen und gewerblichen Prozessen<sup>9</sup>, zum Kochen sowie zur Zusatzfeuerung bei der Erzeugung der Fernwärme. Aufgrund spezifischer Eigenheiten der Verwendungszwecke werden möglicherweise bei der Elimination des konstanten Sockelverbrauchs nicht alle Nicht-Raumwärmeverbräuche eliminiert (beispielsweise saisonale Produktionsschwankungen). Darüber hinaus wird etwa die Hälfte des Gasabsatzes über Sonderverträge an Industrie- und Dienstleistungsbetriebe veräußert, wovon rund 65 % durch die *ewb* „abschaltbar“ sind (Lastabwurf). Dadurch können die „Spitzen“ an Tagen mit hoher Nachfrage geglättet werden.

Aufgrund der gemischten Nutzungen und dem Lastabwurf dürfte beim Gasdatensatz der Zusammenhang zwischen Verbrauch und Witterung weniger deutlich nachweisbar sein und folglich der Gasdatensatz für die Analyse weniger geeignet sein als der Fernwärmedatensatz. Trotzdem werden die Gasdaten ebenfalls ausgewertet. Der Vergleich mit den Resultaten der Fernwärmeanalyse ermöglicht es deren Güte abzuschätzen und damit die Robustheit und Aussagekraft der Resultate insgesamt zu erhöhen.

*Abbildung 4: Verteilung der Jahresheizlast für Raumwärme auf die einzelnen Monate: Vergleich der Fernwärmedaten und der Gasdaten.*



<sup>9</sup>

Nur von einem Industriekunden wird der Verbrauch einzelnen ausgewiesen und kann explizit von den Roh-Einseismengen abgezogen werden.

### 3.3 Meteodaten

Die Temperatur gilt als der wichtigste Wetterfaktor, der den Raumwärmebedarf beeinflusst, von untergeordneter Bedeutung ist die Solarstrahlung, welche gemäss Müller zu rund 10 % zur Variabilität der Wärmenachfrage beiträgt (Müller et al., 1995). Der Einfluss weiterer Wetterfaktoren, wie beispielsweise Wind, Luftfeuchtigkeit oder Bewölkungsgrad, werden als vergleichsweise gering und folglich vernachlässigbar eingeschätzt.<sup>10</sup> Deshalb werden in der Analyse nur die Faktoren Temperatur und Strahlung berücksichtigt.

Die verwendeten Temperatur- und Strahlungswerte wurden von der *MeteoSchweiz* erhoben, bis Ende 2005 an der Messstation Bern-Liebefeld, anschliessend an der neuen Messstation Bern-Zollikofen<sup>11</sup>. Durch die Verschiebung der Messstation entsteht ein leichter Bruch in der Messreihe, der die Resultate aber nicht entscheidend beeinflussen dürfte. Da sich beide Stationen innerhalb des Gasnetzes und in unmittelbarer Nähe zum Fernwärmenetz der *ewb* befinden, werden die verwendeten Messwerte als repräsentativ für die betrachteten Versorgungsgebiete betrachtet.

Als Temperaturwerte werden Tagesmittelwerte in Grad Celsius verwendet, die Strahlung wird in Tagessummen (MJ/m<sup>2</sup>) berücksichtigt. Die Charakteristiken der verwendeten Temperatur- und Strahlungswerte sind in den Tabellen 4 und 5 beschrieben. Die Kennwerte beziehen sich auf den Analysezeitraum der Fernwärmeeinspeisung (1.1.2000 bis 31.3.2008) und berücksichtigen nur die Tageswerte an „Heiztagen“ mit einer mittleren Temperatur unter 20°C. Die Kennwerte in den Tabellen 4 und 5 beschreiben deshalb nicht die effektive Witterung in Bern, sondern die Witterung an den im Datensample berücksichtigten Heiztagen.

*Tabelle 4: Mittlere Tagestemperatur - deskriptive Werte für die einzelnen Monate und den Jahresmittelwert, in °C.*

	insgesamt	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Mittel	8.3	0.4	1.9	5.4	9.2	13.4	15.9	16.8	16.4	13.9	10.2	4.3	1.0
Minimum	-10.5	-9.7	-9.6	-9.3	0.2	4.8	6.8	10.5	10.4	4.5	-0.2	-5.1	-10.5
Maximum	19.9	11.9	9.4	13.4	17.5	19.6	19.9	19.9	19.9	19.8	16.9	12.0	10.6
Median	8.4	0.7	2.2	6.0	9.3	13.6	15.9	17.3	16.6	14.1	10.7	4.7	0.9
Quartil 0.05	-3.0	-6.7	-4.5	-1.7	2.4	7.4	11.0	12.3	12.5	8.9	3.5	-1.3	-5.2
Quartil 0.95	18.4	8.0	7.7	11.8	15.1	18.4	19.6	19.8	19.5	18.6	15.1	9.3	7.7
Standard Abweichung	6.8	4.3	3.8	4.1	3.7	3.2	2.8	2.3	2.1	3.0	3.3	3.2	3.9

<sup>10</sup> Die Wetterfaktoren beeinflussen sich auch gegenseitig, so wird beispielsweise die tägliche Strahlungsmenge stark durch die Bewölkung beeinflusst.

<sup>11</sup> Aufgrund von städtebaulichen Massnahmen musste die Messstation verlegt werden.

*Tabelle 5: Tägliche Strahlungsmenge - deskriptive Werte für die einzelnen Monate und den Jahresmittelwert, in MJ/m<sup>2</sup>.*

	insgesamt	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Mittel	10.7	4.1	6.8	11.2	15.1	17.5	20.4	18.5	15.2	13.0	8.0	4.4	3.1
Minimum	0.4	0.4	1.0	1.2	1.6	2.5	3.7	3.5	1.7	1.2	1.0	0.4	0.6
Maximum	30.9	9.1	15.0	21.3	26.3	30.6	30.9	30.0	27.4	22.5	15.6	10.5	6.4
Median	8.8	3.8	6.5	11.4	15.8	18.4	21.4	18.5	15.2	14.0	8.6	4.2	2.6
Quartil 0.05	1.6	1.0	1.7	3.6	3.2	4.7	6.0	6.8	4.4	4.1	1.8	1.0	0.9
Quartil 0.95	26.0	8.0	12.2	18.5	24.3	28.3	29.9	28.7	24.6	20.6	13.3	8.8	6.0
Standard Abweichung	7.7	2.2	3.4	4.8	6.7	8.0	7.9	7.1	6.8	5.4	3.6	2.4	1.6

Das Klima in Bern unterscheidet sich geringfügig von demjenigen der Gesamtschweiz. In den Jahren 2000 bis 2007 war es in Bern leicht kühler als im Schweizer Mittel, die Strahlungsmenge war hingegen etwas höher. So lag in Bern die Anzahl Gradtage rund 3 % und die Strahlungsmenge 2.6 % über dem Landesmittel.

Im Vergleich zur Referenzperiode 1970 bis 1990, welche üblicherweise beim HGT-Verfahren nach Müller angewandt wird und zur Referenzperiode des Verfahrens nach Gradtagen und Strahlung (1984 bis 2002), war es in den Jahren 2000 bis 2007 im Mittel wärmer und strahlungsintensiver. Gegenüber der Periode 1984 bis 2002 hat die Gradtagsanzahl in allen Wintermonaten ausser dem Dezember abgenommen, im Mittel um 3.6 %. Gegenüber der Periode 1970 bis 1992 war die Abnahme noch stärker. Andererseits war die jährliche Strahlungsmenge im Mittel um fast 5 % höher (vgl. Abbildung 20 und Abbildung 21 im Anhang). Auch in der Sampleperiode 2000 bis Frühjahr 2008 gibt es jedoch mehrere Monate, die deutlich kühler waren als die langjährigen Monatsmittel.

## 4 Qualitative Vergleiche der Einspeisemengen und der Wetterparameter

In Abbildung 5 sind die bereinigten, berücksichtigten täglichen Einspeisemengen ins Fernwärmenetz gegenüber der mittleren Tagestemperatur aufgetragen. Der Zusammenhang zwischen den Grössen ist deutlich und scheint zumindest im Temperaturintervall von  $-5^{\circ}\text{C}$  bis  $15^{\circ}\text{C}$  annähernd linear zu sein. Die Grafik zeigt, dass der Energiebedarf für Raumwärme bereits zwischen  $15^{\circ}\text{C}$  bis  $20^{\circ}\text{C}$  ansteigt. Die Heizgrenze liegt demnach deutlich über der im HGT-Verfahren üblicherweise angewandten Heizgrenze von  $12^{\circ}\text{C}$ . Der deutliche Nachfrageanstieg ab  $15^{\circ}\text{C}$  bis  $20^{\circ}\text{C}$  zeigt sich bereits in den unbereinigten Rohdaten (Abbildung 6). Die Bereinigung des Verbrauchs des Industriekunden und des Warmwasserverbrauchs (Sockel) ist folglich nicht die Ursache für die gegenüber dem HGT-Verfahren ( $12/20$ ) höhere Heizgrenze.

Korrelationsanalysen, bei welchen der Korrelationskoeffizient zwischen Heizgradtagen mit verschiedenen Heizgrenzen und der Einspeisung berechnet wird, deuten ebenfalls darauf hin, dass die Heizgrenze höher als  $15^{\circ}\text{C}$  liegen dürfte (Tabelle 6). Der Anstieg der Heizgrenze gegen  $18^{\circ}\text{C}$  könnte auch als Hinweis auf eine Zunahme der Innentemperatur gedeutet werden. Eine solche würde bei gleich bleibender Qualität und Anzahl der belieferten Gebäude den Verbrauch erhöhen. Da die differenzierten Eigenschaften des Gebäudebestands und des Heizverhaltens nicht bekannt sind, können anhand der aggregierten Einspeisedaten jedoch keine Rückschlüsse auf die effektive Höhe der Innentemperatur oder deren Verschiebung gezogen werden.

*Abbildung 5: Zusammenhang zwischen täglicher Einspeisung ins Fernwärmenetz für Raumwärme und der mittleren Tagestemperatur, an Heiztagen.*

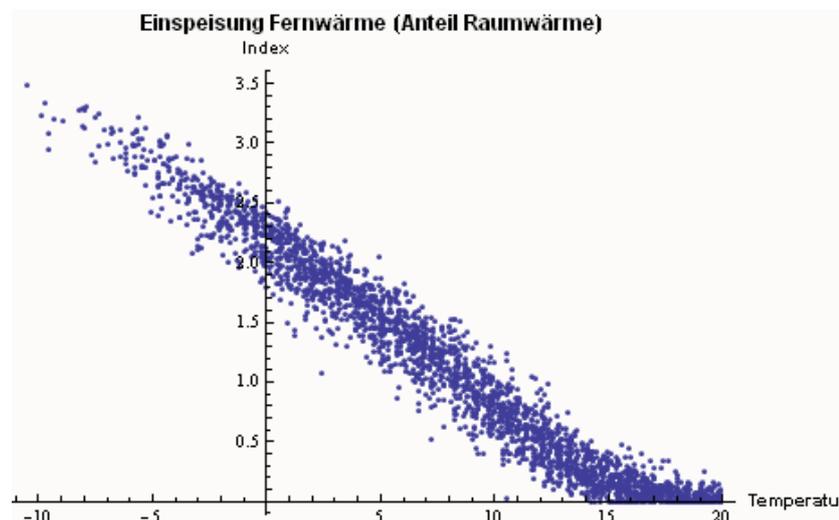


Abbildung 6: Zusammenhang zwischen täglicher Einspeisung ins Fernwärmenetz und der mittleren Tagestemperatur.

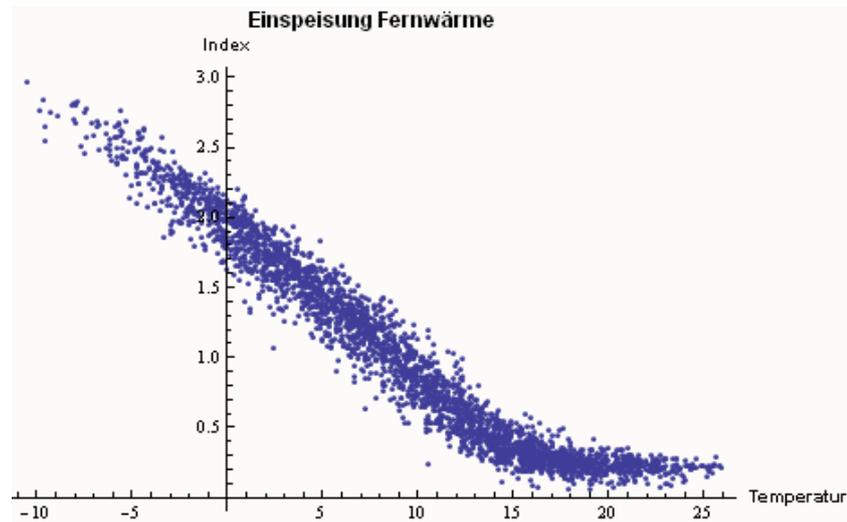
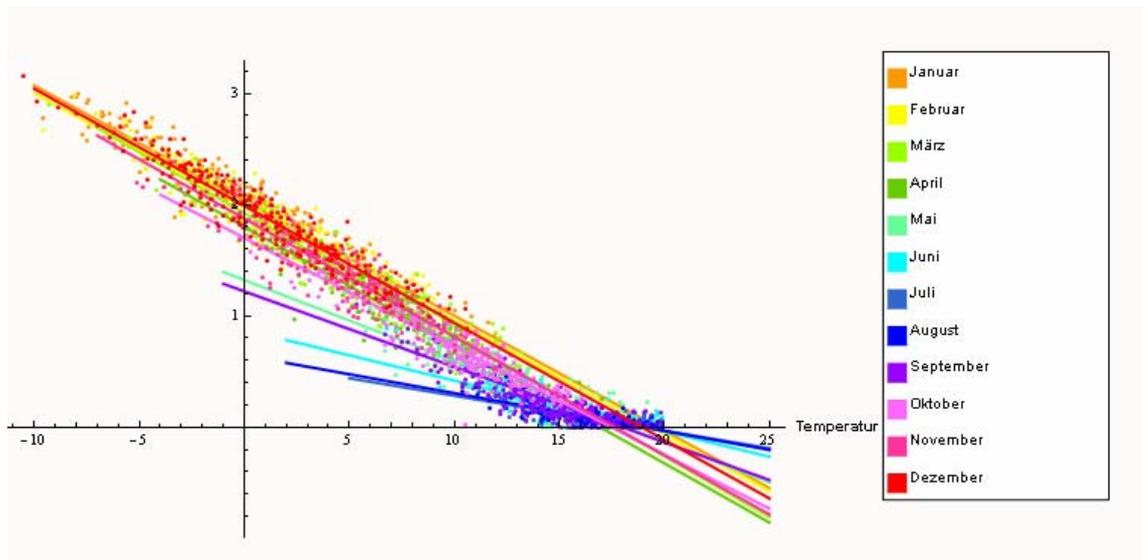


Tabelle 6: Korrelationskoeffizienten für den Zusammenhang zwischen "Heizgradtagen" mit variierender Heizgrenze und den gemessenen Einspeisemengen.

Heizgrenze	Korrelationskoeffizient
HGT 20 (GT)	0.951
HGT 18	0.956
HGT 15	0.947
HGT 12	0.922

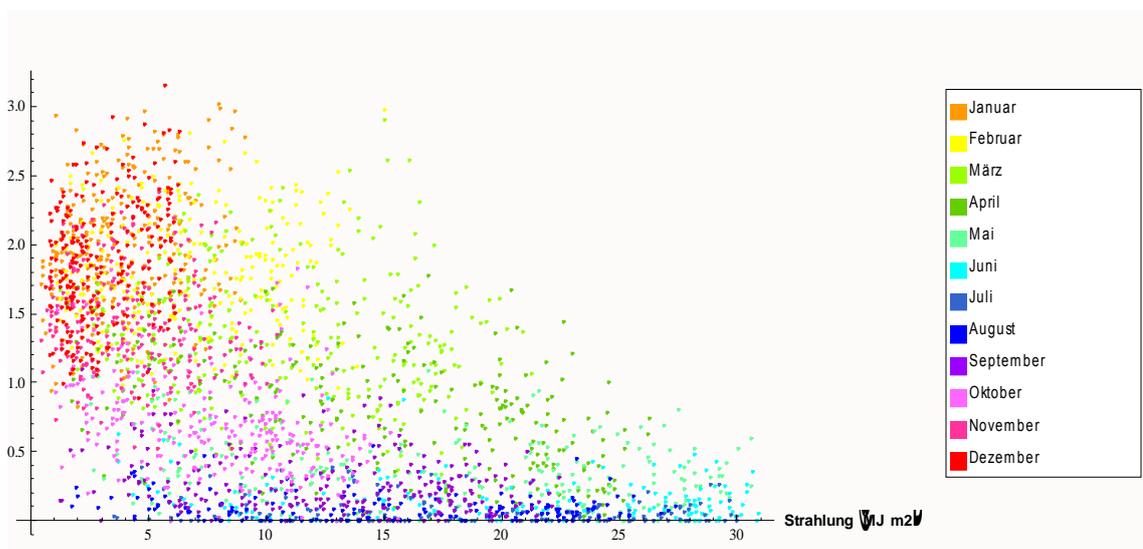
Aufgrund der unterschiedlichen Gebäudeeigenschaften ist die Heizgrenze kein fixer, für alle Gebäude identischer Wert. Zudem dürfte die Heizgrenze auch von der „gefühlten Temperatur“ und damit auch von der Jahreszeit abhängen. Gewisse Hinweise dazu sind in Abbildung 7 ersichtlich, welche die Regressionsgeraden der Grössen Temperatur und Einspeisung für die einzelnen Monate vergleicht. Die Regressionsgeraden durch die Einspeisemengen in den Monaten Mai bis Juli sind etwas flacher und schneiden die X-Achse bei einer etwas höheren Temperatur als diejenigen für die Übergangsmomente März, April, Oktober, November. Obwohl sich in Abbildung 5 ein linearer Zusammenhang zwischen Temperatur und Einspeisung zeigt, unterscheiden sich die Steigungen der Regressionsgeraden der einzelnen Monate deutlich. Dies deutet darauf hin, dass sich die Wirkung der Temperatur auf den Raumwärmebedarf im Jahresverlauf unterscheidet.

Abbildung 7: Regressionsgeraden der Größen Temperatur und Einspeisung ins Fernwärmenetz, nach einzelnen Monaten, an Heiztagen (Einspeisung nur Anteil Raumwärme).



Im Gegensatz zur Temperatur zeigt sich bei der Strahlung kein offensichtlicher Zusammenhang zwischen täglicher Strahlungsmenge und Einspeisung ins Fernwärmenetz (Abbildung 8). Einzelne Monatscluster sind hingegen deutlich sichtbar: die Wintermonate mit geringer Strahlung und hoher Einspeisung sowie die Sommermonate mit geringer Einspeisung und tiefer bis hoher Einstrahlung.

Abbildung 8: Zusammenhang zwischen täglicher Einspeisung ins Fernwärmenetz und täglicher Solarstrahlung, nach Monaten (ohne Berücksichtigung des Einflusses der Temperatur).



Die Auftragung der täglichen Gaseinspeisewerte gegen die Wetterfaktoren zeigt ein zu den Fernwärmedaten analoges Muster. Es deutet sich linearer Zusammenhang zwischen der Temperatur und der Einspeisemenge an, es zeigt sich aber kein offensichtlicher Zusammenhang zwischen Strahlung und Einspeisung (vgl. Abbildung 22 und Abbildung 23 im Anhang). Wohl aufgrund der Möglichkeit zum Lastabwurf weisen die Gaseinspeisemengen an kalten Tagen eine deutlich breitere Streuung auf.

Die Abbildungen 9 und 10 zeigen den indexierten Verlauf der monatlichen Einspeisung ins Fernwärmenetz für die Bereitstellung von Raumwärme sowie die Faktoren HGT, GT und Strahlung im Jahresverlauf 2000 bis 2007. Die Entwicklung der Einspeisemengen verläuft im Allgemeinen synchron zu den Entwicklungen der Temperaturgrößen GT und HGT, die Korrelation zum Strahlungsverlauf ist wenig überraschend antizyklisch.

Abbildung 9: Jahreskurven von monatlicher Einspeisemenge ins Fernwärmenetz für Raumwärme sowie Anzahl HGT und GT.

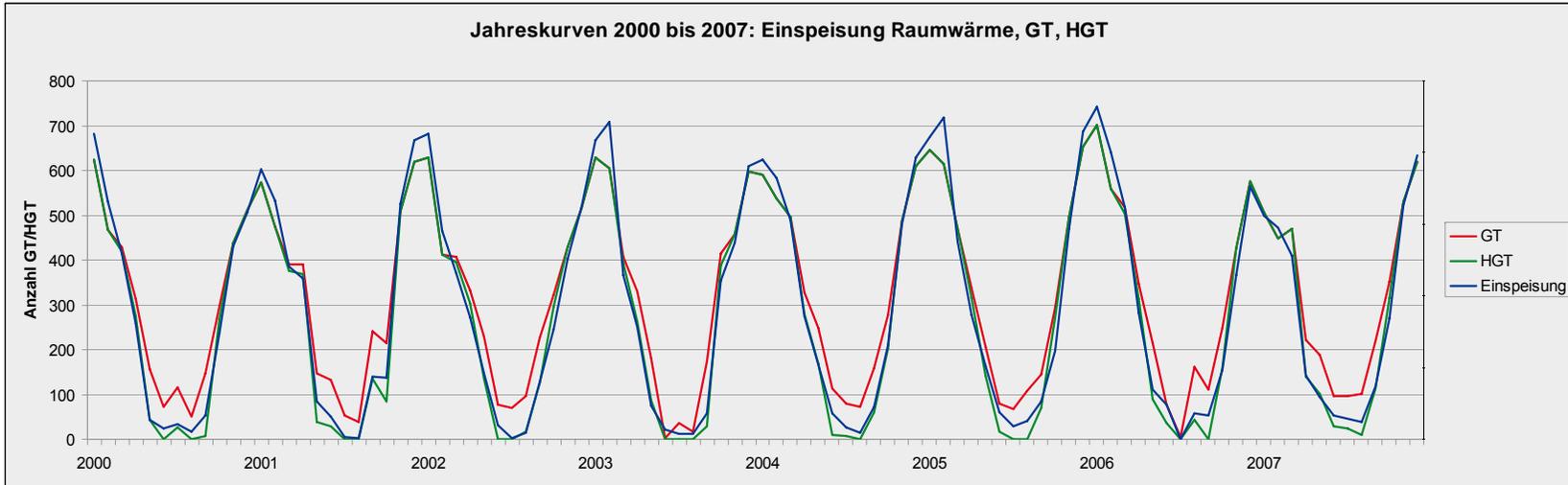
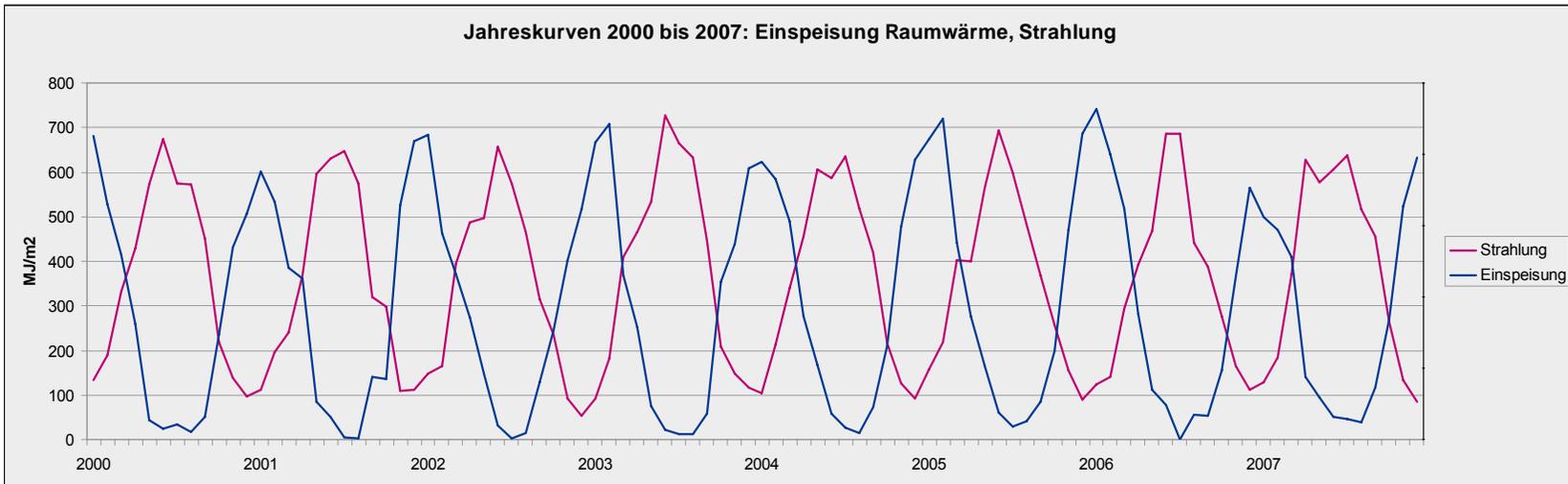


Abbildung 10: Jahreskurven von monatlicher Einspeisemenge ins Fernwärmenetz für Raumwärme und Strahlungsmenge.



## 5 Statistische Analyse – methodischer Ansatz

### 5.1 Theoretisches Modell

Im zweiten Arbeitsschritt werden mit Hilfe mathematisch-statistischer Verfahren die Verbrauchsreihen mit den Zeitreihen der Wetterfaktoren verknüpft, um Umfang und Richtung der Beeinflussung der Verbräuche durch die Witterung zu quantifizieren. Dazu werden Abhängigkeitshypothesen formuliert, die dann mit Hilfe der entsprechenden statistischen Verfahren der Zeitreihenanalyse überprüft werden.

Nebst dem dominanten Einfluss durch die Temperatur wird in dieser Analyse auch die Strahlung berücksichtigt, nicht aber weitere Wetterfaktoren wie Bewölkungsgrad, Windstärke oder Luftfeuchtigkeit, welche gemäss der Studie von Müller von untergeordneter Bedeutung sind (Müller et al., 1995).<sup>12</sup> Mit anderen Worten, die „Witterung“ wird reduziert auf die Wetterfaktoren Temperatur und Strahlung. Da sich die Analyse auf Tageswerte stützt, erscheint die Verwendung der Grössen HGT oder GT als wenig sinnvoll. Bei diesen Grössen wird an Tagen mit einer mittleren Temperatur über der Heizgrenze der Wert auf Null gesetzt, wodurch vorhandene Information verworfen wird. Die Witterungsabhängigkeit des Raumwärmeverbrauchs wird stattdessen direkt durch die mittlere Tagestemperatur am Einspeisetag sowie die mittleren Temperaturen am Vortag und am Vorvortag ausgedrückt. Die Temperaturwerte von weiter zurückliegenden Tagen zeigten in der Analyse keine Signifikanz.

Es wird davon ausgegangen, dass die Wirkung der Wetterfaktoren auf den Raumwärmeverbrauch über den Jahresverlauf betrachtet nicht konstant ist. Darauf deuten auch die deutlich voneinander abweichenden Regressionsgeraden in Abbildung 7 hin. Um die unterstellte Jahresdynamik näherungsweise abzubilden, erfolgt die Analyse für jeden Monat einzeln. Das heisst, das Grundsampl wurde in 12 Monatssamples getrennt, welche einzeln untersucht wurden. Dabei wurde die abhängige Variable, die tägliche Einspeisemenge ins Fernwärme- oder Gasnetz, auf den durchschnittlichen Verbrauch des jeweiligen Monats indiziert. Beispielsweise wurden die effektiven täglichen Einspeisemengen in kWh im Januar dividiert durch die durchschnittliche tägliche Einspeisemenge im Monat Januar. Durch das Verwenden von Indexwerten lassen sich die Ergebnisse der Analyse einfacher verallgemeinern.

Nicht-klimatische Einflussfaktoren wie beispielsweise die Entwicklung des Gebäudebestandes (Neuanschlüsse, Veränderung der beheizten Fläche, Veränderung des Wärmebedarfs aufgrund

<sup>12</sup> Weil die entsprechenden Wetterdaten nicht zur Hand waren, konnte diese Hypothese nicht überprüft werden.

von energetischen Sanierungen) oder Verhaltenseinflüsse (potenziell zunehmende Innentemperatur) werden im Modell vereinfacht durch eine Zeittrendvariable berücksichtigt. Diese Variable wird durch eine fortlaufende Nummerierung der Tageswerte ausgedrückt. Die Berücksichtigung der Energiepreise ist nicht möglich, da für die verschiedenen Kundensegmente unterschiedliche Preisniveaus und -entwicklungen bestehen, die täglichen Einspeisemengen jedoch aggregiert vorliegen. Zudem verfügen zahlreiche Kunden über Sonderverträge. Gemäss den Aussagen der *ebw* scheint der Einfluss der Energiepreise auf die nachgefragte Menge (noch) nicht von Bedeutung zu sein. Die Abhängigkeit des Raumwärmeverbrauchs von der Witterung und der nicht-klimatischen Einflussfaktoren kann somit durch folgenden Ausdruck in die formale Sprache umgesetzt werden:

$$ES_{ij} = F(T_i, T_{i-1}, T_{i-2}, S, TR)$$

wobei  $ES_{ij}$  für die indexierte tägliche Einspeisemenge im Monat  $j$  steht,  $T_i, T_{i-1}, T_{i-2}$  die mittleren Temperaturen am Einspeisetag, respektive des Vor- und des Vorvortags sind,  $S$  die Strahlungsmenge am Einspeisetag und  $TR$  den Zeittrend bezeichnen. Mit  $F$  ist ein grundsätzlicher funktionaler Zusammenhang gemeint, welcher mit Hilfe der statistischen Analyse geschätzt werden soll.

## 5.2 Statistisches Modell

Das Modell ist ein Ansatz der linearen bzw. affinen Näherung für die oben bezeichnete Abhängigkeit und basiert auf Einspeisemengen und Wetterdaten von aufeinander folgenden Tagen; die Daten bilden somit Zeitreihen.<sup>13</sup> Die indexierte tägliche Einspeisemenge  $ES_{ij}$  im Monat  $j$  beschrieben durch:

$$ES_{ij} = X_{ij} * \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

wobei  $X_{ij}$  den „Vektor“ der erklärenden Variablen Temperatur, Temperatur Vortag, Temperatur Vorvortag, Strahlung und Zeittrend abbildet,  $\beta_j$  ist der korrespondierende „Parametervektor“ und  $\varepsilon_{ij}$  ist der Fehlerterm (Residuum). Die mit \* bezeichnete Multiplikation bezeichnet das Skalarprodukt der beiden Vektoren, in Komponentendarstellung

$$X_{ij} * \beta_j = \sum_k X_{ijk} \cdot \beta_{jk} .$$

<sup>13</sup> Weil einzelne Tageswerte aus dem Sample entfernt wurden, aber auch weil bei den Monatssamples zeitliche „Sprünge“ zwischen den einzelnen Jahren entstehen, handelt es sich nicht um perfekte Zeitreihen. In der Analyse werden diese Diskontinuitäten jedoch ignoriert.

Die statistische Analyse läuft über den Tagesindex  $i$  und produziert so jeweils Monatswerte für die Komponenten der Parametervektoren. Bei Zeitreihendatensätzen zeigt sich häufig eine zeitliche Korrelation der Residuen  $\varepsilon$  (Autokorrelation). Ein statistischer Test, angewandt wurde eine Regression der Residuen auf den Lag der Residuen und die erklärenden Variablen, deutet auf eine starke Autokorrelation in den verwendeten Monatssamples hin. Deshalb dürfen keine einfachen Ordinary Least Squares (OLS)<sup>14</sup> Regressionen zur Bestimmung der Parametervektor  $\beta$  und ihrer Standardfehler verwendet werden. Aus diesem Grunde wurde zur Bestimmung dieser Grössen der Prais-Winston Ansatz gewählt, bei welchem durch eine Transformation der Variablen die Autokorrelation in  $\varepsilon$  eliminiert wird und dadurch belastbare Standardfehler generiert werden.<sup>15</sup> Da der *Breusch-Pagan*-Test in einzelnen Monaten Hinweise auf das Vorhandensein von Heteroskedastizität liefert, werden zusätzlich Heteroskedastizität-robuste Standardfehler geschätzt<sup>16</sup>.

Die Temperaturwerte korrelieren in der Regel stark mit den Temperaturwerten des Vortages, die entsprechenden Korrelationskoeffizienten variieren zwischen 0.6-0.85. Da im Modell zusätzlich zur mittleren Tagestemperatur die Werte des Vortages und des Vorvortages berücksichtigt wird, besteht die Gefahr einer Verzerrung der Schätzung aufgrund von Multikollinearität zwischen den Variablen. Ein entsprechender Test deutet aber darauf hin, dass trotz der hohen Korrelation zwischen den Grössen im Allgemeinen keine übermässige Multikollinearität in den Daten vorliegt.<sup>17</sup>

Um zu überprüfen, ob die Ergebnisse übermässig durch das ausserordentliche Witterungsjahr 2007 beeinflusst wurden, wurden die Regressionen zusätzlich mit einem kleineren Sample ohne die Werte des Jahres 2007 durchgeführt. Die Differenzen zum vollen Sample waren sehr gering. Folglich dürfte die Berücksichtigung der Werte des Jahres 2007 keinen ungünstigen Einfluss auf die Modellschätzungen haben.

<sup>14</sup> OLS: Methode der kleinsten quadratischen Abweichungen.

<sup>15</sup> Der Prais-Winston Ansatz korrigiert für Autokorrelationen 1. Grades (AR1). Als Alternative zum Prais-Winston Ansatz wurde auch eine Korrektur nach dem Newey-West Verfahren durchgeführt. Dieser Ansatz bestimmt die Parameter mit dem OLS Ansatz, korrigiert aber anschliessend die Standardfehler von Autokorrelation und Heteroskedastizität (Wooldridge, 2003). Dabei sind auch Korrekturen von Autokorrelationen höheren Grades möglich. In der Tat zeigt sich in den meisten Monatssamples eine Autokorrelation 2. Grades. Die Ergebnisse der Newey-West Analyse sind nachrichtlich im Anhang aufgeführt. Die Parameter unterscheiden sich leicht vom Prais-Winston Ansatz, grundsätzlich führen die beiden Ansätze jedoch zu vergleichbaren Ergebnissen.

<sup>16</sup> Heteroskedastizität bedeutet in der Statistik eine unterschiedliche Streuung der Residuen innerhalb einer Datenmessung.

<sup>17</sup> Für die transformierten Variablen wurde der so genannte Variance Inflation Factor (VIF) ermittelt. Der Wert  $1/VIF$  gibt an, welcher Prozentsatz der Varianz einer unabhängigen Variable nicht durch die anderen unabhängigen Variablen bestimmt wird. Gemäss einer Faustregel sollten die VIF-Werte kleiner als  $1/(1-R^2)$  sein, damit keine kritische Multikollinearität auftritt (Wolfram Mathematica, 2008). Mit Ausnahme der Monate Juni, Juli und August war dies der Fall. In diesen drei Monaten erreichten einzelne VIF-Werte die kritische Grösse. Die Schätzungen in diesen Monaten sind aber insgesamt schlecht: relativ kleine Samples, tiefe  $R^2$ , Parameter nur teilweise signifikant. Dies ist allerdings wenig relevant, da die Monate ohnehin sehr wenig zum Heizenergieverbrauch beitragen.

## 6 Resultate

### 6.1 Übersicht

Die Resultate der statistischen Analyse sind in den Tabellen 7 (Fernwärme) und 8 (Gas) abgebildet. Bei den Fernwärmedaten sind die Parameter zum grössten Teil signifikant, die Vorzeichen zeigen in die richtige Richtung und die  $R^2$  sind in der Regel hoch. Dabei zeigt die Güte der Schätzungen eine deutliche Jahresstruktur. Sie ist in den Wintermonaten (den Monaten mit hohen absoluten Einspeisemengen) deutlich besser als in den Sommermonaten. So sind bei der Fernwärmeanalyse die  $R^2$  in den Wintermonaten Oktober bis April stets grösser 0.8, während die Schätzungen für die drei Sommermonate Juni, Juli und August schlecht sind: die  $R^2$  sind tief, die Parameter zum Teil nicht signifikant und vereinzelt sogar mit falschem Vorzeichen. Es gibt verschiedene Erklärungsansätze für die geringe Güte der Schätzungen in den Sommermonaten. Einerseits ist gemäss Aussage der *ewb* die Datenqualität in den Sommermonaten schlechter, andererseits sind die Samples deutlich kleiner, weil die Anzahl der Heiztage kleiner ist. Zudem ist in den Sommermonaten der Verbrauch für Raumwärme sehr gering, beziehungsweise der Verbrauch für Warmwasser grösser als der Verbrauch für Raumwärme. Dadurch besteht die Möglichkeit, dass in diesen Monaten durch die Bereinigung der Einspeisemenge vom Warmwasserverbrauch teilweise Ausgangswerte von geringer Qualität generiert werden. Weil im Mittel nur rund 2 % Jahresverbrauchs für Raumwärme in diesen drei Sommermonaten anfallen, hat die geringe Modellgüte in diesen Monaten jedoch keine grossen Auswirkungen auf die Ergebnisse als Gesamtes.

Wie erwartet sind die Schätzungen mit den Fernwärmedaten besser als mit dem Gasdatensatz, entsprechend sind die  $R^2$  bei der Fernwärmeanalyse in der Regel höher. Bei der Analyse der Gasdaten zeigt die Güte der Modelle ebenfalls eine gewisse Jahresstruktur mit tiefen  $R^2$  in den Sommermonaten, insbesondere im Juli und August. Zusätzlich zeigt sich aber auch in den kalten Monaten Dezember und Januar eine etwas geringere Modellgüte. Diese dürfte unter anderem auf Lastabwürfe zurückzuführen sein.<sup>18</sup>

---

18

In einer zusätzlichen Analyse wurden die kältesten Tage (mit  $T < 0^\circ\text{C}$ ), an denen Lastabwürfe mit erhöhter Wahrscheinlichkeit erfolgt sein dürften, nicht berücksichtigt. In der Tat ergaben sich bei diesen Schätzungen für die Monate Januar, Februar und März höhere  $R^2$  und es zeigten sich für die Temperaturparameter (kumuliert) etwas kleinere Unterschiede gegenüber den Schätzungen mit den Fernwärmedaten. Hingegen konnte im Monat Dezember durch das Weglassen der kältesten Tage keine Verbesserung der Modellgüte erreicht werden. Im Monat Dezember dürfte auch die hohe Anzahl an Feiertagen (Betriebsferien) eine entscheidende Rolle für den Energieverbrauch spielen.

*Tabelle 7: Ergebnisse der Prais-Winston Schätzung für die Einspeisungen ins Fernwärmenetz: Parameterwert in Bezug auf die Variablen Temperatur, Strahlung, Trend, Standardabweichung (in Klammern) und Signifikanzniveau  $\alpha$ . \*\*\* entspricht dem 1 %  $\alpha$ -Niveau, respektive \*\* dem 5 % und \* dem 10 %  $\alpha$ -Niveau. Die Samplegrösse wird durch die Anzahl Observationen beschrieben.*

		Temperatur	Temperatur Vortag	Temperatur Vorvortag	Strahlung	Trend	Konstante	R <sup>2</sup>	Anzahl Ob- servationen
Januar	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-4.29 (0.16) ***	-0.78 (0.2) ***	-0.36 (0.16) **	-0.29 (0.2) -	-0.002 (0.001) ***	106.71	0.904	279
Februar	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-4.96 (0.22) ***	-0.62 (0.25) **	-0.47 (0.24) **	-0.35 (0.13) ***	-0.003 (0.001) ***	117.89	0.865	255
März	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-6.27 (0.23) ***	-1.91 (0.3) ***	-0.51 (0.21) **	-0.46 (0.11) ***	-0.004 (0.001) ***	156.78	0.917	279
April	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-10.14 (0.63) ***	-1.52 (0.52) ***	-1.69 (0.46) ***	-0.14 (0.16) -	-0.002 (0.002) -	226.21	0.863	240
Mai	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-14.05 (1.05) ***	-4.10 (0.98) ***	-2.91 (0.64) ***	0.03 (0.24) -	0.007 (0.007) -	371.62	0.760	240
Juni	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-24.00 (2.98) ***	-4.08 (2.16) *	-3.52 (1.5) **	0.40 (0.54) -	0.029 (0.008) ***	555.35	0.695	158
Juli	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-22.66 (3.61) ***	-8.47 (2.46) ***	-6.86 (1.96) ***	0.13 (0.71) -	0.031 (0.02) -	707.31	0.430	165
August	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-20.16 (3.25) ***	-11.12 (2.66) ***	-2.59 (2.18) -	-0.03 (0.62) -	0.032 (0.015) **	612.52	0.514	179
September	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-15.84 (1.17) ***	-8.60 (1.3) ***	-1.97 (1.16) *	-0.51 (0.3) *	-0.0004 (0.007) -	476.22	0.698	234
Oktober	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-9.50 (0.5) ***	-3.58 (0.52) ***	-1.18 (0.45) ***	-0.93 (0.24) ***	-0.004 (0.002) **	260.14	0.832	248
November	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-5.86 (0.26) ***	-1.15 (0.26) ***	-1.00 (0.26) ***	-1.14 (0.21) ***	-0.003 (0.001) ***	144.51	0.832	240
Dezember	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-4.76 (0.16) ***	-0.73 (0.19) ***	-0.43 (0.16) ***	0.01 (0.23) -	-0.002 (0.001) *	108.62	0.881	248

Die geschätzten Parameter weichen bei den Gasdaten etwas von den mit den Fernwärmedaten geschätzten Parametern ab. Grundsätzliche Unterschiede ergeben sich aber allenfalls in den Sommermonaten, in denen die Modellgüte jedoch in beiden Fällen gering ist. Insgesamt zeigt sich bei der Fernwärme ein etwas stärkerer Einfluss der Temperatur (Abbildung 11), hingegen ein etwas geringerer Einfluss der Strahlung (Abbildung 12). Dies ist bei der Altersstruktur der Gebäude (Fernwärme beheizte Gebäude sind älter als Gas beheizte Gebäude) auch zu erwarten: ältere Gebäude mit höheren Transmissionsverlusten sind „immuner“ gegenüber Strahlungsschwankungen als jüngere Gebäude.

*Tabelle 8: Ergebnisse der Prais-Winston Schätzung für die Einspeisungen ins Gasnetz: Parameterwert in Bezug auf die Variablen Temperatur, Strahlung, Trend, Standardabweichung (in Klammern) und Signifikanzniveau  $\alpha$ . \*\*\* entspricht dem 1 %  $\alpha$ -Niveau, respektive \*\* dem 5 % und \* dem 10 %  $\alpha$ -Niveau. Die Samplegrösse wird durch die Anzahl Observationen beschrieben.*

		Temperatur	Temperatur Vortag	Temperatur Vorvortag	Strahlung	Trend	Konstante	R <sup>2</sup>	Anzahl Ob- servationen
Januar	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-4.10 (0.28) ***	0.35 (0.28) -	-0.26 (0.24) -	-0.83 (0.31) ***	0.003 (0.003) -	102.42	0.585	186
Februar	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-4.41 (0.39) ***	0.04 (0.34) -	-0.71 (0.29) **	-0.60 (0.24) **	0.001 (0.002) -	106.55	0.695	170
März	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-5.65 (0.69) ***	-0.43 (0.51) -	-0.66 (0.47) -	-0.77 (0.18) ***	0.005 (0.004) -	134.43	0.717	186
April	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-10.33 (0.82) ***	-1.09 (0.64) *	-0.70 (0.53) -	-0.59 (0.23) **	0.005 (0.003) -	215.44	0.851	180
Mai	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-12.95 (1.28) ***	-3.97 (1.25) ***	-0.95 (0.82) -	-0.76 (0.29) **	0.004 (0.01) -	342.85	0.773	150
Juni	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-17.79 (4.19) ***	-4.54 (3.97) -	-5.61 (2.49) **	-1.04 (0.88) -	-0.003 (0.024) -	569.61	0.647	92
Juli	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-26.73 (5.9) ***	-6.38 (4.26) -	-2.53 (2.27) -	-3.46 (1.22) ***	0.043 (0.028) -	727.13	0.510	87
August	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-12.60 (5.42) **	-8.50 (4.08) **	-2.85 (3.82) -	-1.78 (1.04) *	0.015 (0.035) -	496.20	0.246	114
September	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-14.20 (1.5) ***	-6.73 (1.75) ***	-2.34 (1.64) -	-0.76 (0.48) -	0.003 (0.011) -	435.11	0.662	153
Oktober	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-8.19 (0.69) ***	-2.76 (0.64) ***	-1.53 (0.52) ***	-1.20 (0.27) ***	0.005 (0.004) -	227.52	0.799	186
November	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-5.75 (0.42) ***	-0.90 (0.42) **	-1.14 (0.38) ***	-0.89 (0.3) ***	0.006 (0.002) ***	133.16	0.776	180
Dezember	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-4.51 (0.25) ***	-0.30 (0.27) -	-0.17 (0.28) -	-0.41 (0.32) -	0.007 (0.002) -	98.53	0.710	186

Abbildung 11. Die geschätzten Temperaturparameter dargestellt im Jahresverlauf, Fernwärme und Gas im Vergleich. Zur Vereinfachung der Darstellung, wurden die Parameterwerte von Temperatur am Einspeisetag, Temperatur Vortag und Temperatur Vorvortag kumuliert.

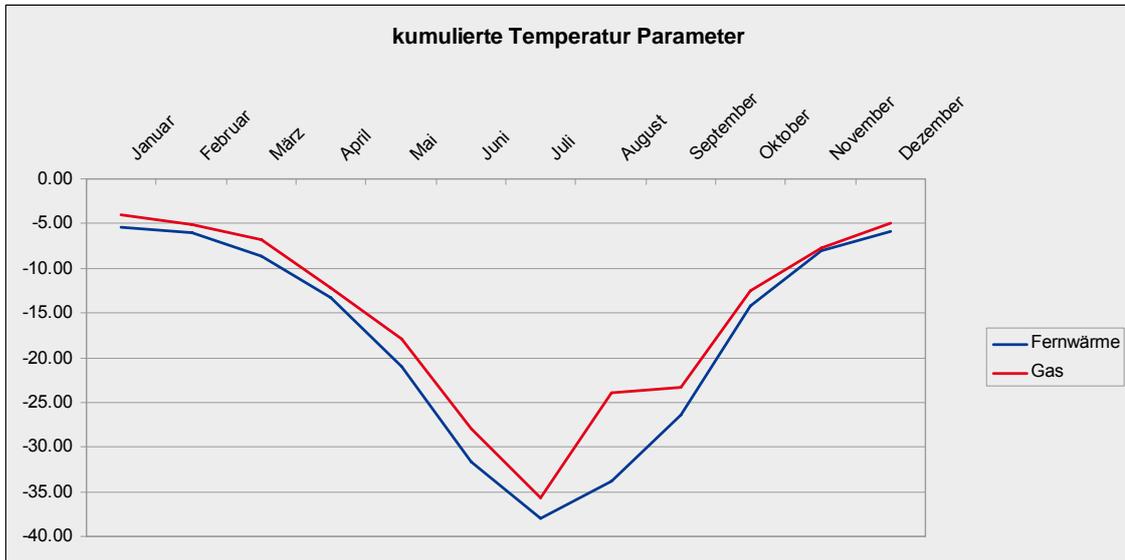
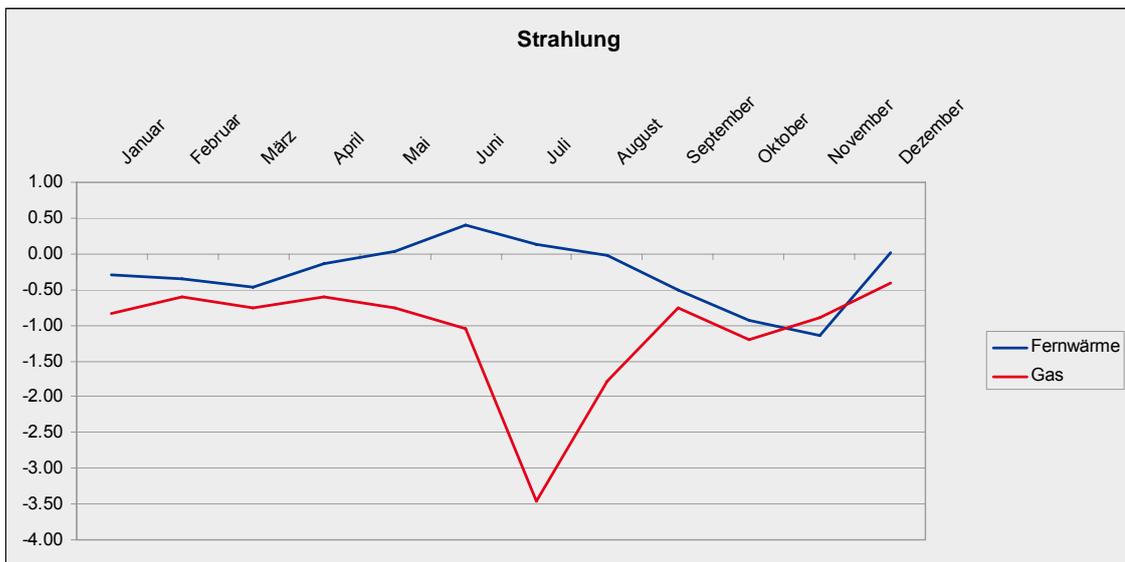


Abbildung 12: Die geschätzten Parameter für die Strahlung, dargestellt im Jahresverlauf, Fernwärme und Gas im Vergleich.



## 6.2 Die Parameter der Wetterfaktoren im Einzelnen

Die Schätzungen der Parameter der unterschiedenen Variablen zeigen im Einzelnen folgende Ergebnisse:

### Temperatur

Die geschätzten Parameter für die Variable *Temperatur* sind in allen Monaten sowohl beim Fernwärme- als auch beim Gasdatensatz hoch signifikant und die Vorzeichen zeigen in die richtige Richtung: eine Erhöhung der mittleren Tagestemperatur senkt den täglichen Raumwärmebedarf und somit auch die tägliche Einspeisemenge. Die Beträge der Parameter sind in den Sommermonaten höher als in den Wintermonaten. Dies bedeutet aber nicht, dass der Einfluss einer Temperaturänderung auf den Raumwärmebedarf im Sommer grösser wäre als im Winter. Hinter den indexierten Einspeisemengen verbergen sich je nach Monat unterschiedliche Niveaus von absoluten Einspeisemengen, welche im Winter deutlich höher sind als im Sommer (vgl. beispielsweise Abbildung 2). Werden in den Modellen anstelle der indexierten Einspeisemengen die absoluten Mengen verwendet, so zeigen sich im Sommer sogar kleinere Beträge für die Parameter und folglich ein geringerer Einfluss durch Temperaturänderungen auf die Nachfrage an Raumwärme. Dies lässt sich unter anderem mit der Heizgrenze erklären. Steigt beispielsweise die Temperatur von 16°C auf 17°C, so nimmt der Raumwärmeverbrauch nur in jenen Gebäuden ab, bei welchen die Heizgrenze bei, bzw. unter 16°C liegt. Steigt hingegen im Winter die Temperatur von 3°C auf 4°C an, so dürfte die mittlere Tagestemperatur bei allen Gebäuden deutlich unter der Heizgrenze liegen und folglich nimmt der Raumwärmeverbrauch in allen Gebäuden ab. Dadurch ergibt sich an kalten Tagen eine grössere absolute Abnahme des Heizenergieverbrauchs als an warmen Tagen.

Die *Temperatur* ist eindeutig der wichtigste Einflussfaktor unter den Wetterfaktoren. Dies wird ersichtlich aus den Tabellen 9 und 10, welche die standardisierten Parameter für Fernwärme, respektive für Gas abbilden.<sup>19</sup> Gemäss den standardisierten Parametern korrelieren im Jahresdurchschnitt rund 70 % bis 75 % der witterungsbedingten Energieverbrauchsschwankungen direkt linear mit der Tagestemperatur. Der Vergleich der standardisierten Temperaturparameter zwischen den Monaten stützt die Aussage, dass der Temperatureinfluss auf den Raumwärmeverbrauch im Winter

<sup>19</sup>

Standardisierte Parameter, oftmals auch Beta-Parameter genannt, eignen sich zum Vergleich der Einflussstärke unterschiedlicher Parametern (Kohler und Kreuter, 2001). Die standardisierten Parameter werden wie folgt interpretiert: Eine Erhöhung der mittleren Tagestemperatur im Januar um eine Standardabweichung senkt beispielsweise den Raumwärmeverbrauch um 0.79 Standardabweichungen. Die Erhöhung der Strahlung um eine Standardabweichung senkt den Raumwärmeverbrauch hingegen lediglich um 0.03 Standardabweichungen.

stärker ist als in den Übergangsmonaten und im Sommer. Im Gas-sample scheint der Einfluss der Temperatur von etwa gleicher Grössenordnung zu sein wie im Fernwärmesample.

*Tabelle 9: Standardisierte Parameter der Fernwärmedaten-Analyse.*

	Temperatur	Temperatur Vortag	Temperatur Vorvortag	Strahlung	Trend
Januar	- 0.786	- 0.144	- 0.067	- 0.027	- 0.087
Februar	- 0.816	- 0.101	- 0.077	- 0.052	- 0.121
März	- 0.733	- 0.230	- 0.063	- 0.063	- 0.092
April	- 0.751	- 0.111	- 0.121	- 0.019	- 0.031
Mai	- 0.583	- 0.172	- 0.122	0.003	0.073
Juni	- 0.655	- 0.130	- 0.128	0.031	0.232
Juli	- 0.381	- 0.164	- 0.149	0.007	0.173
August	- 0.387	- 0.248	- 0.064	- 0.002	0.225
September	- 0.564	- 0.309	- 0.071	- 0.033	- 0.003
Oktober	- 0.642	- 0.244	- 0.081	- 0.068	- 0.066
November	- 0.715	- 0.145	- 0.129	- 0.105	- 0.093
Dezember	- 0.813	- 0.124	- 0.072	0.001	- 0.051

*Tabelle 10: Standardisierte Parameter der Gasdaten- Analyse.*

	Temperatur	Temperatur Vortag	Temperatur Vorvortag	Strahlung	Trend
Januar	- 0.880	0.076	- 0.057	- 0.085	0.077
Februar	- 0.776	0.007	- 0.120	- 0.101	0.031
März	- 0.697	- 0.054	- 0.085	- 0.099	0.085
April	- 0.798	- 0.083	- 0.052	- 0.082	0.057
Mai	- 0.658	- 0.204	- 0.049	- 0.093	0.029
Juni	- 0.544	- 0.160	- 0.224	- 0.079	- 0.013
Juli	- 0.490	- 0.141	- 0.065	- 0.176	0.165
August	- 0.267	- 0.205	- 0.074	- 0.123	0.061
September	- 0.569	- 0.271	- 0.094	- 0.051	0.017
Oktober	- 0.620	- 0.211	- 0.118	- 0.097	0.060
November	- 0.681	- 0.110	- 0.140	- 0.074	0.111
Dezember	- 0.737	- 0.048	- 0.028	- 0.030	0.188

### Temperatur der Vortage

Der Einfluss der Temperatur an den Vortagen ist bei den Fernwärmedaten deutlicher als bei den Gasdaten. So sind die Parameter des Faktors *Temperatur Vortag* bei der Fernwärmeanalyse in allen Monaten, bei Gasdatensatz jedoch nur teilweise signifikant. Und die Parameter der Variable *Temperatur Vorvortag* sind bei der Fernwärme meist, bei Gas hingegen nur vereinzelt signifikant. Trotz der teilweise nicht signifikanten Parameter, werden die Modelle in der Regel durch die Berücksichtigung der Temperatur an den Vortagen besser: die  $R^2$  werden etwas erhöht und die Vorzeichen, insbesondere jene der Strahlung, zeigen häufiger in die „richtige“ Richtung.

Der im Vergleich zu den Fernwärmedaten etwas schwächere Einfluss bei den Gasdaten zeigt sich auch bei den standardisierten Parametern. Gemäss diesen ist der Einfluss der Temperatur an den Vortagen zwar deutlich geringer als derjenige der Tages-temperatur, dennoch korrelieren rund 20 % (Gas) bis 25 % (Fernwärme) der witterungsbedingten Verbrauchsschwankungen linear mit der Temperatur an den Vortagen. Der geringere Einfluss bei den Gasdaten könnte mit einer unterschiedlichen Qualität des zu versorgenden Gebäudeparks zusammenhängen. Beispielsweise könnte die durchschnittliche Wärmespeicherkapazität der Gebäudehüllen bei den gasbeheizten Gebäuden geringer sein, was eine raschere Reaktion der Gebäude auf eine Temperaturänderung bedeutet.

### **Strahlung**

Im Gegensatz zu den Temperaturen an den Vortagen, zeigt sich bei der Strahlung ein stärkerer Einfluss bei den Gasdaten als bei den Fernwärmedaten. Bei den Gasdaten sind die meisten monatlichen Strahlungsparameter signifikant, während bei der Fernwärme nur knapp die Hälfte der Parameter signifikant ist. Die grössere Bedeutung der Strahlung bei den Gasdaten widerspiegelt sich auch bei den standardisierten Parametern: bei der Fernwärme korrelieren rund 4 % der witterungsbedingten Schwankungen linear mit der Strahlung, beim Gas 8 %. Der gemessene Einfluss der Strahlung liegt im Mittel somit leicht unter den in der Müller-Studie veranschlagten 10%, andererseits liegt in einzelnen Monaten der Einfluss über 10 %.

Auch bei der Strahlung könnte die Differenz der Einflussstärke zwischen Fernwärme und Gas auf Unterschiede im Gebäudepark zurückzuführen sein. Der mit Fernwärme beheizte Gebäudepark dürfte älter sein und die Gebäude weniger darauf ausgerichtet, die Strahlung aktiv zur Wärmegewinnung zu nutzen. Da bei der Errichtung neuer Gebäude die Transmissionsverluste im Vergleich zu den internen und externen Wärmegewinnen kleiner werden und darüber hinaus die Strahlung zunehmend als Energiequelle berücksichtigt wird, z.B. durch grosse gegen Süden ausgerichtete Fensterflächen, wird der Einfluss der Strahlung auf den Wärmebedarf zunehmen. Es kann angenommen werden, dass damit auch die Bedeutung der Strahlung für den Zusammenhang zwischen Witterung und Raumwärmeverbrauch in der Zukunft aufgrund der Veränderungen im Gebäudepark grösser werden kann.

Auffallend sind die geringen Beträge der Strahlungsparameter im Monat Dezember. Diese gehen gegen Null und die Parameter sind sowohl bei den Fernwärmedaten als auch bei den Gasdaten nicht signifikant. Ausserdem ist bei der Fernwärme auch der Strahlungsparameter des Monats Januar nicht signifikant. Im Allgemeinen bedeutet eine Erhöhung der Strahlungsmenge eine erhöhte Ab-

sorption an Solarwärme und dadurch eine Verringerung des Raumwärmebedarfs. Die Strahlungsmenge, die auf der Erdoberfläche auftrifft, wird unter anderem auch durch den Bewölkungsgrad beeinflusst. Die Bewölkung hat aber auch eine der Solarstrahlung in gewissen Sinne entgegen gesetzte Wirkung, sie vermindert die Abstrahlungsverluste aus der Atmosphäre. An wolkenlosen Tagen im Winter könnte somit die Solarstrahlung durch den Energieeintrag zu einer geringen Abnahme des Wärmebedarfs tagsüber führen, durch die gleichzeitig verstärkte Abstrahlung aufgrund fehlender Bewölkung, insbesondere über Nacht, wird dieser Effekt aber möglicherweise kompensiert. Im Sommer und in den Übergangsmontaten dürfte dieser Effekt aufgrund der deutlich höheren Strahlungsmengen weniger relevant sein. Ein möglicher Hinweis auf diesen Effekt sind die negativen Korrelationskoeffizienten zwischen den Grössen Temperatur und Strahlung in den Wintermonaten, insbesondere im Dezember und Januar. Gemäss dieser Hypothese würde im Modell der Effekt der Strahlung signifikanter und wohl auch grösser sein, wenn der Effekt der Bewölkung mitberücksichtigt würde. Darüber hinaus könnten auch die Windverhältnisse einen gewissen Einfluss auf das Zusammenwirken zwischen Strahlung und Raumwärmeverbrauch ausüben, da in den Wintermonaten die klaren Tage oft mit kühlen Nordostströmungen verbunden sind.

### **Zeittrend**

Die Variable Zeittrend weist bei der Fernwärme im Allgemeinen ein negatives Vorzeichen, beim Gas jedoch ein positives Vorzeichen auf. Bei der Fernwärme ist das Energieangebot limitiert durch die vorhandene Netzinfrastruktur sowie die Kapazitäten der KVA und des Zusatzbrenners. Neuanschlüsse wurden in der Beobachtungsperiode nicht verzeichnet. Aufgrund einzelner energetischer Sanierungen scheint jedoch der Verbrauch zurückgegangen zu sein, und zwar um rund 4,2 % über die Periode 2000 bis 2008. In allen Wintermonaten sind die Parameter signifikant und die Vorzeichen negativ. In den Sommermonaten sind die Parameter positiv, aber in der Regel nicht signifikant. Die Güte der Modelle der drei Sommermonate ist jedoch dürftig und die positiven Vorzeichen sollten deshalb nicht überinterpretiert werden.

Im Gegensatz zur Fernwärme waren im Gasnetz Neuanschlüsse zu beobachten, diese sind in den Daten der *ewb* dokumentiert. Neuanschlüsse führen zu einer Erhöhung des Gesamtverbrauchs des Energieträgers. Aufgrund der positiven Vorzeichen beim Gas scheint der verbrauchssteigernde Effekt der Neuanschlüsse über den reduzierenden Effekt der energetischen Sanierungen zu dominieren. Diese Dominanz ist statistisch jedoch nicht eindeutig, weil die Trendparameter beim Gasdatensatz nicht signifikant sind. Deshalb ist auch die berechnete trendbedingte Gasverbrauchszunahme von rund 6.5 % für die Periode 2003 bis 2008 mit Vorsicht zu betrachten. Die kürzere Beobachtungszeit beim Gas

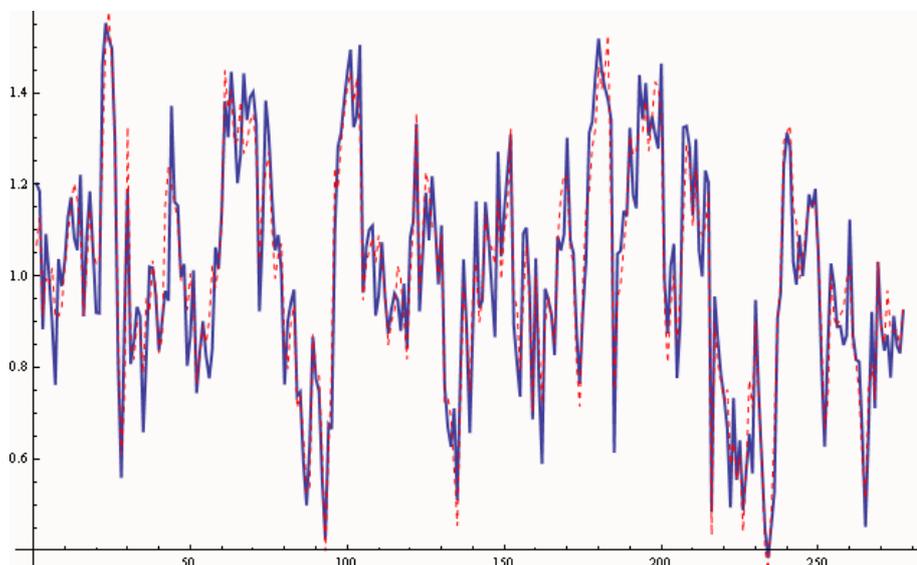
könnte ein Grund dafür sein, dass die Trendparameter im Gegensatz zur Fernwärme nicht signifikant sind.

## 7 Neue Witterungsbereinigungsverfahren

### 7.1 Entwicklung von Witterungsbereinigungsfaktoren

Mit den in den Regressionen geschätzten Parametern und den entsprechenden Wetterdaten können Schätzungen für die täglichen Einspeisemengen ins Fernwärme- und Gasnetz generiert werden. Da die tatsächlichen Einspeisewerte bekannt sind, lässt sich abmessen, wie gut diese Schätzungen im Vergleich zu den tatsächlichen Werten sind und ob sie sich als Grundlage für ein Witterungsbereinigungsverfahren eignen. In Abbildung 13 werden beispielsweise die effektiven Einspeisemengen ins Fernwärmenetz an Januartagen (2000 bis 2008) mit den geschätzten Einspeisemengen verglichen: Die geschätzten Werte decken sich in der Regel sehr gut mit den effektiven Werten, was aufgrund des hohen  $R^2$  zu erwarten war. In den Sommermonaten zeigen sich hingegen teilweise grössere Abweichungen zwischen den effektiven und den geschätzten Einspeisemengen.

*Abbildung 13: Tägliche Einspeisung ins Fernwärmenetz an Januartagen (2000 bis 2008): effektive Einspeisung (blau) und geschätzte Einspeisung (rot). Indexierte Werte (1= durchschnittliche Tages-Einspeisung im Januar).*



Sofern alle anderen Faktoren gleich bleiben, sollte eine durchschnittliche Witterung einen durchschnittlichen Verbrauch, respektive eine durchschnittliche Energieeinspeisung zur Folge haben, wohingegen Abweichungen von der durchschnittlichen Witterung zu einem witterungsbedingten Mehr- oder Minderver-

brauch führen.<sup>20</sup> Zur Entwicklung von Witterungsbereinigungsfaktoren (Jahreskorrekturfaktoren) können die täglichen Abweichungen erst zu Monats- und anschliessend weiter zu Jahresabweichungen aggregiert werden. Dabei ist der Witterungsbereinigungsfaktor definiert als das Verhältnis des jährlichen IST-Verbrauchs zum entsprechenden witterungsbereinigten Verbrauch. Der Bereinigungsfaktor gibt somit in an, wie stark ein Jahresverbrauch aufgrund der spezifischen Jahreswitterung vom durchschnittlichen Verbrauch abweicht.

Ausgangspunkt für den Bereinigungsfaktor sind die Schätzungen für die indexierte tägliche Einspeisung an Heiztagen. Diese können entweder direkt über die Regressionsparameter und die Wetterfaktoren gewonnen werden, oder durch die Verwendung der Differenzen zwischen den Tageswerten der Wetterfaktoren und den Monatsdurchschnittswerten dieser Faktoren. Dabei werden die Abweichungen der Wetterfaktoren von ihren entsprechenden Monatsdurchschnittswerten mit den Regressionsparametern verknüpft. Um den Witterungseffekt isoliert zu beschreiben, werden dabei lediglich die Wettervariablen, nicht aber die Trendvariable berücksichtigt. Mit anderen Worten, die Bereinigungsfaktoren sollen nur von den Wettervariablen abhängen, während alle anderen Faktoren, inklusive Trend, konstant gehalten werden. Dadurch werden trendbereinigte tägliche Einspeisemengen generiert (Einspeisemengen ohne Einfluss des Zeittrends). Bei diesem Ansatz ergibt sich für einen durchschnittlichen trendbereinigten Heiztag, welcher eintritt wenn die Wetterfaktoren den Monatsdurchschnittswerten an den Heiztagen entsprechen, der Wert von 1. Der Ansatz kann abgebildet werden durch

$$TBES_{ij} = 1 + (X_{ij} - \bar{X}_j) * \beta_j$$

wobei  $TBES_{ij}$  die indexierte trendbereinigte tägliche Einspeisung  $ij$  im Monat  $j$  ist,  $X_{ij}$  den Vektor der erklärenden Wettervariablen und  $\bar{X}_j$  den Vektor der entsprechenden Klimadurchschnittswerte abbilden sowie  $\beta_j$  der korrespondierende Parametervektor ist. Ein TBES-Wert von 1.2 würde beispielsweise eine gegenüber der durchschnittlichen trendbereinigten Einspeisung um 20 % erhöhte Einspeisung bedeuten - bezogen auf den spezifischen Monat und den gewählten Referenzzeitraum.

Die indexierten Tageswerte können zu Monatsindices aggregiert werden, dabei muss die durchschnittliche Anzahl der Heiztage je Monat berücksichtigt werden. Der Monatsindex für den Monat  $j$  wird gewonnen durch die Summierung aller Tageswerte (TBES) des Monats  $j$  und die anschliessende Division durch die durchschnittliche Anzahl Heiztage im Monat  $j$ . Auch hier ist der Monats-

<sup>20</sup> „Durchschnittlich“ bezieht sich im Folgenden auf den Durchschnitt in der Referenzperiode, bei der Fernwärme also auf die Zeit vom 1.1.2000 bis 31.3.2008, bei Gas auf die Zeit vom 22.9.2002 bis 30.4.2008.

index von 1 dem in der Referenzperiode durchschnittlichen trendbereinigten Monatsverbrauch gleichgesetzt.

Da den Monatsindices je nach Monat unterschiedliche Niveaus von absoluten Verbräuchen hinterlegt sind, können sie nicht direkt addiert werden. Die Korrektur um die Niveauunterschiede kann durch die Gewichtung mit dem Monatsanteil an der Jahresheizlast erreicht werden. Diese Anteile sind für die Fernwärme aus Tabelle 2 und für das Gas aus Tabelle 3 ersichtlich. Die Entwicklung dieser monatlichen Verbräuche im Jahresverlauf ist in den Abbildungen 14 und 15 illustriert. Die Grafiken zeigen, dass sich die Entwicklungen der geschätzten monatlichen Verbräuche sehr gut mit den effektiven Einspeisemengen decken.

*Abbildung 14: Monatliche Einspeisung ins Fernwärmenetz: effektive Einspeisung (blau) und geschätzte Einspeisung (rot), indexierte Werte (1=durchschnittlicher Jahresverbrauch).*

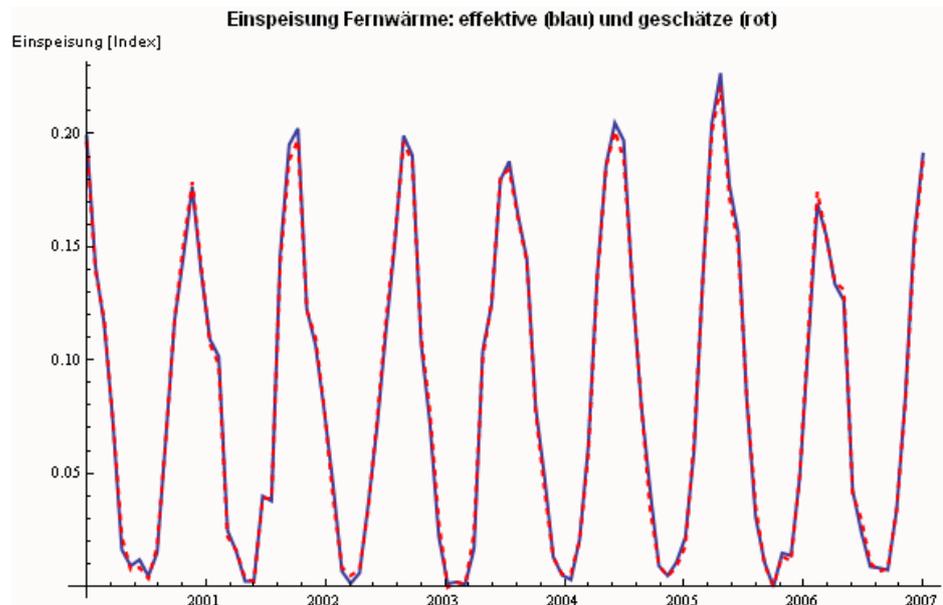
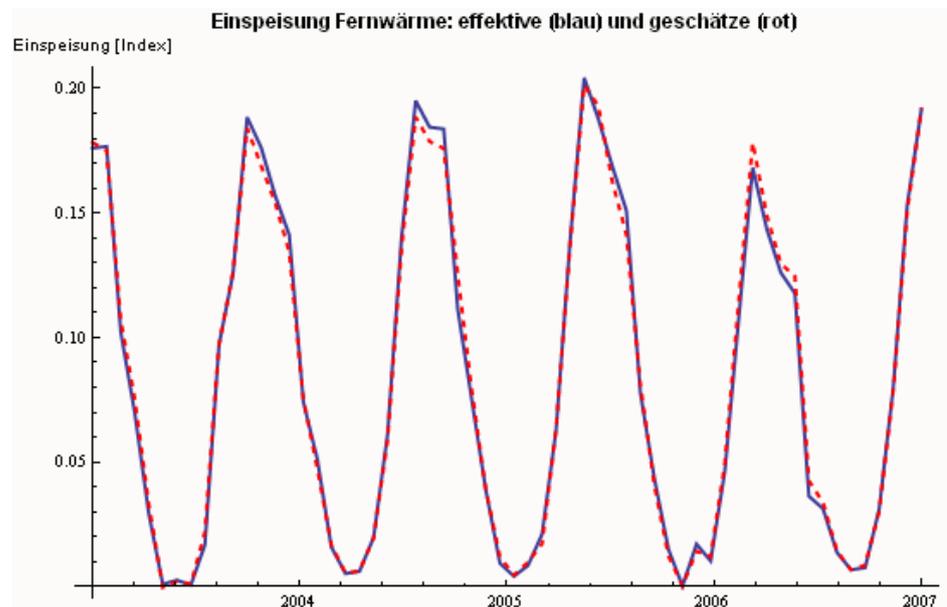


Abbildung 15: Monatliche Einspeisung ins Gasnetz: effektive Einspeisung (blau) und geschätzte Einspeisung (rot), indizierte Werte (1=durchschnittlicher Jahresverbrauch).



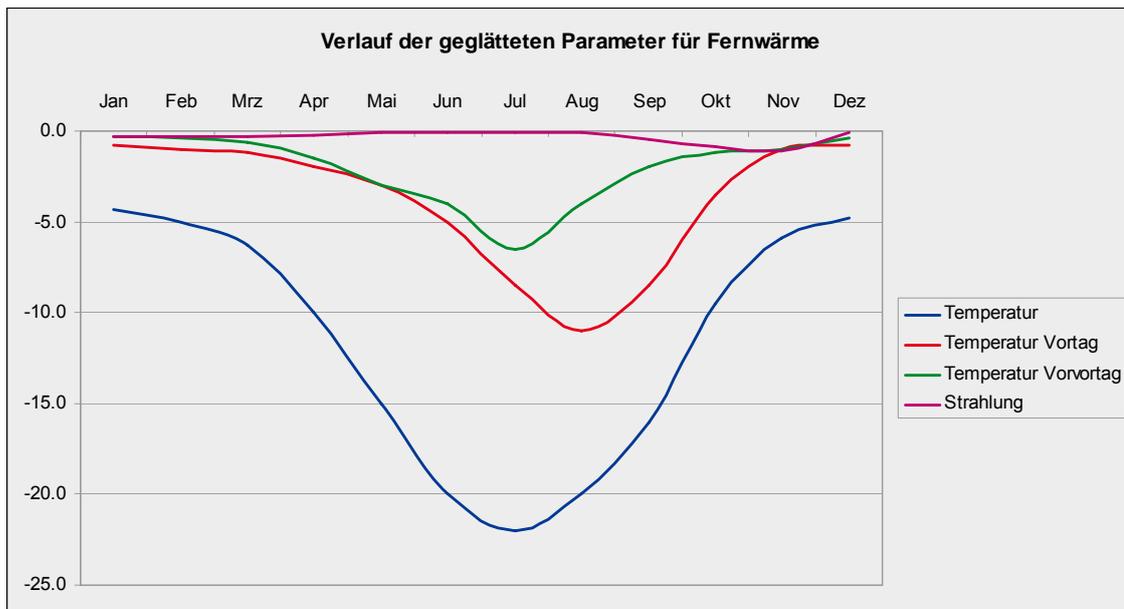
Die mit dem Anteil an der Jahresheizlast korrigierten Monatswerte können nun zum Jahreskorrekturfaktor, dem so genannten Witterungsbereinigungsfaktor aufsummiert werden. Auch hier entspricht der Wert 1 dem durchschnittlichen trendbereinigten Jahresverbrauch, der bei durchschnittlicher Witterung eintritt. Werte grösser als 1 bedeuten einen witterungsbedingten Mehrverbrauch aufgrund von unterdurchschnittlichen Temperaturen und / oder Strahlungsmengen. Entsprechend bedeuten Werte kleiner als 1 einen witterungsbedingten Minderverbrauch aufgrund von überdurchschnittlichen Temperaturen und / oder Strahlungsmengen.

Es können verschiedene Varianten zur Bestimmung der Bereinigungsfaktoren unterschieden werden:

- Die Varianten können sich einerseits in den verwendeten Parametern ( $\beta$ ) unterscheiden. Nebst der Verwendung der Regressionsparameter aus der Fernwärme- oder Gasanalyse können beispielsweise auch davon abgeleitete „geglättete“ Parameter verwendet werden. Die geschätzten Regressionsparameter sind ohnehin lediglich Annäherungen an die unbekanntenen „wahren“ Parameter. Es scheint wahrscheinlich, dass die „wahren“ Parameter einen gleichmässigeren Jahresverlauf besitzen. Die in Abbildung 16 illustrierten Parameter sind ein Versuch sich ausgehend von den geschätzten Parametern den „wahren“ Parametern zu nähern. Darüber hinaus sind die mit den entsprechenden Parametern erhaltenen linearen oder affinen Gleichungen eine erste Näherung für den unbekanntenen

„wahren“ funktionalen Zusammenhang. Die Grafiken zeigen allerdings, dass das Modell die Empirie für die hier angestrebten Zwecke sehr gut trifft.

Abbildung 16: Ein möglicher Verlauf von Hand „geglätteter“ Parameter, ausgehend von den mit den Fernwärmedaten geschätzten Parametern.



- Andererseits lassen sich Bereinigungs-faktoren mittels eines vereinfachten Ansatzes aus den monatlichen Mittelwerten der täglichen Werte von Temperatur und Strahlung an Heiztagen generieren. Das heisst, die Berechnung dieser Varianten erfolgt nicht auf Basis von einzelnen Tageswerten, sondern auf aggregierten Monatsmittelwerten. Dabei lässt sich die indexierte trendbereinigte Monateinspeisung (MES) durch die Verknüpfung der Regressionsparameter mit der Differenz zwischen den jeweiligen Monatsmittelwerten der Wetterparameter und den Monatsdurchschnittswerten der Referenzperiode annähern. Da in den Monatsmittelwerten die Information über die Anzahl der Heiztage nicht enthalten ist, wird der Wert multipliziert mit der Angabe über die relative Anzahl der Heiztage. Die indexierte trendbereinigte Einspeisung des spezifischen Monats  $jl$  ( $MES_{jl}$ ) kann somit ausgedrückt werden als

$$MES_{jl} = (1 + (Y_{jl} - \bar{Y}_j) * \beta_j) \cdot \frac{HT_{jl}}{HT_j}$$

wobei der Vektor  $Y_{jl}$  die Monatsmittelwerte der Wetterfaktoren des spezifischen Monats  $j$  im Jahr  $l$  abbildet,  $\bar{Y}_j$  der Vektor der entsprechenden Klimadurchschnittswerte ist und  $\beta_j$  für den

korrespondierende Parametervektor steht.  $HT_{jl}$  sind die Anzahl Heiztage des spezifischen Monats  $j$  im Jahr  $l$  und  $HT_j$  die durchschnittliche Anzahl Heiztage des Monats  $j$  in der Referenzperiode. Auch hier ist der Monatsindex von 1 mit dem in der Referenzperiode durchschnittlichen trendbereinigten Monatsverbrauch gleichgesetzt.

Da sich auf Ebene der Monatsmittelwerte die Werte der Wetterfaktoren Temperatur, Temperatur Vortag und Temperatur Vorvortag nur unwesentlich unterscheiden, können diese Werte approximativ gleichgesetzt werden: mittlere Temperatur  $\approx$  mittlere Temperatur Vortag  $\approx$  mittlere Temperatur Vorvortag. Dadurch lässt sich das Modell zusätzlich vereinfachen. Die Regressionsparameter der drei Temperaturvariablen werden zu einem einzigen Parameter aggregiert und dieser mit der Differenz zwischen dem Monatsmittel der Temperatur an Heiztagen und dem entsprechenden Monatsdurchschnittswert über die gesamte Periode verknüpft.

Die Aggregation der Monatsindices zum Jahreskorrekturfaktor (Bereinigungsfaktor) erfolgt analog dem Ansatz auf Basis der Tageswerte. Die Monatsindices werden mit ihrem entsprechenden Anteil an der Jahresheizlast gewichtet und anschließend aufsummiert.

## 7.2 Vergleich der Bereinigungsfaktoren

Tabelle 11 bildet sowohl für Fernwärme als auch für Gas die effektiven Jahreseinspeisungen, die trendbereinigten Einspeisungen sowie die mit verschiedenen Varianten geschätzten trendbereinigten Jahreseinspeisungen als Indices ab. Der Indexwert 1 entspricht der jeweiligen durchschnittlichen (trendbereinigten) Jahreseinspeisung. Da sich die Referenzperioden zwischen Fernwärme und Gas unterscheiden, dürfen die Verbrauchswerte der Energieträger nicht direkt verglichen werden. Die Referenzperiode beim Gas, vom 22.9.2002 bis zum 30.4.2008, war etwas kühler als die Referenzperiode bei der Fernwärme vom 1.1.2000 bis zum 31.3.2008. Dies hat zur Folge, dass das Niveau der indexierten Einspeisemengen beim Gas aufgrund der berücksichtigten Referenzperiode im Vergleich zu den Einspeisemengen aus dem Fernwärmesample in der Regel etwas tiefer liegt.

Als Varianten wurden Tageswert-basierte Ansätze und Monatsmittelwert-basierte Ansätze unterschieden. Zudem wurde zwischen der direkten Verwendung der Parameter aus den geschätzten Regressionsmodellen (RP) und den von Hand geglätteten Parametern (GP) unterschieden. In zwei zusätzlichen Varianten wurden die im Gasmodell geschätzten Parameter zur Bestimmung der Fernwärmeverbräuche verwendet (RP Gas), respektive die im Fernwärmemodell geschätzten Parameter zur

Bestimmung der Gasverbräuche verwendet. Diese indexierten Einspeisewerte sind zugleich die Bereinigungs-faktoren, mit denen sich die witterungsbedingte Abweichung vom durchschnittlichen Verbrauch in der Referenzperiode ermitteln lassen: Die Differenz zu 1 ergibt die witterungsbedingte prozentuale Abweichung von Durchschnittsverbrauch (1 = 100%). Die Division eines IST-Jahresverbrauchs durch den entsprechenden Bereinigungs-faktor ergibt den witterungsbereinigten Verbrauch.

*Tabelle 11: Die effektiven, die trendbereinigten und die mit verschiedenen Varianten geschätzten Jahreseinspeisungen als Indices. Der Indexwert 1 entspricht der durchschnittlichen trendbereinigten Jahreseinspeisung in der Referenzzeit. Aufgrund der unterschiedlichen Referenzzeiten zwischen Fernwärme und Gas entspricht der Indexwert 1 bei der Fernwärme nicht dem Indexwert 1 beim Gas.*

	Fernwärme							
	effektive ES	ES trend-bereinigt	Tageswertbasis		Monatswertbasis			RP Gas
			RP	GP	RP	GP		
2000	0.936	0.914	0.919	0.918	0.914	0.913		0.926
2001	1.006	0.991	0.979	0.979	0.982	0.982		0.992
2002	0.949	0.940	0.947	0.946	0.944	0.944		0.953
2003	1.024	1.020	1.033	1.036	1.049	1.052		1.041
2004	1.050	1.053	1.035	1.034	1.029	1.028		1.025
2005	1.095	1.104	1.080	1.082	1.086	1.088		1.070
2006	1.022	1.038	1.033	1.032	1.039	1.038		1.027
2007	0.949	0.969	0.971	0.969	0.968	0.967		0.975

	Gas							
	effektive ES	ES trend-bereinigt	Tageswertbasis		Monatswertbasis			RP FW
			RP	GP	RP	GP		
2003	0.959	0.991	1.002	1.002	1.019	1.019		1.021
2004	1.032	1.047	1.013	1.012	1.004	1.004		1.004
2005	1.047	1.046	1.044	1.047	1.048	1.052		1.059
2006	1.015	0.997	1.000	1.004	1.004	1.009		1.010
2007	0.978	0.942	0.961	0.954	0.956	0.949		0.944

1=durchschnittliche, trendbereinigte jährliche Einspeisemenge im Referenzzeitraum

ES: Einspeisemenge - als Index

RP: Regressionsparameter

GP: geglättete Parameter

Die Abweichungen der mit den unterschiedlichen Varianten geschätzten trendbereinigten Jahresverbräuche von den tatsächlichen trendbereinigten Verbräuchen sind in Tabelle 12 aufgeführt. Bei der Einspeisung ins Fernwärmenetz zeigen die Bereinigungs-faktoren, welche auf Basis von Monatsmittelwerten erzeugt wurden, zwar leicht höhere maximale Abweichungen (3.1 %) als jene auf Basis von Tageswerten (2.3 %). Andererseits zeigen die monatswertbasierten Korrekturfaktoren bei vergleichbaren mittleren Abweichungen (1.1 %) eine geringere summierte Abweichung (-1.8 %). Das Verwenden der Regressionsparameter aus der Gasanalyse (RP Gas) führt zu etwas höheren Abweichungen.

Die Güte der Bereinigungsfaktoren für den Gasverbrauch ist erwartungsgemäss leicht schlechter als bei der Fernwärme, so sind sowohl die mittleren Abweichungen als auch die maximalen Abweichungen etwas grösser. Die geringere Qualität der Bereinigungsfaktoren für den Gasverbrauch dürfte im Wesentlichen auf die schlechtere Datenqualität und die damit implizierte schlechtere Anpassung der effektiven Verbräuche durch die geschätzten Modelle zurückzuführen sein. Die summierten Abweichungen sind beim Gas kleiner als bei der Fernwärme. Dies könnte jedoch rein zufällig sein und dürfte auch vom beobachteten Zeitraum abhängen, welcher beim Gas drei Jahre weniger umfasst.

*Tabelle 12: Abweichungen zwischen den tatsächlichen trendbereinigten Einspeisemengen und den geschätzten trendbereinigten Einspeisemengen, in %-Punkten.*

	Fernwärme					
	ES trend-berenigt	Tageswertbasis		Monatswertbasis		
		RP	GP	RP	GP	RG Gas
2000	0%	0.5%	0.4%	-0.1%	-0.1%	1.1%
2001	0%	-1.2%	-1.2%	-0.9%	-0.9%	0.2%
2002	0%	0.7%	0.6%	0.4%	0.4%	1.3%
2003	0%	1.3%	1.7%	2.9%	3.2%	2.2%
2004	0%	-1.8%	-1.9%	-2.4%	-2.5%	-2.8%
2005	0%	-2.4%	-2.2%	-1.8%	-1.6%	-3.4%
2006	0%	-0.6%	-0.7%	0.1%	0.0%	-1.1%
2007	0%	0.2%	0.0%	-0.1%	-0.2%	0.6%
mittl. Abweichung	0%	1.1%	1.1%	1.1%	1.1%	1.6%
max. Abweichung	0%	2.4%	2.2%	2.9%	3.2%	3.4%
sum. Abweichung	0%	-3.3%	-3.3%	-1.9%	-1.8%	-2.0%
	Gas					
	ES trend-berenigt	Tageswertbasis		Monatswertbasis		
		RP	GP	RP	GP	RP FW
2003	0%	1.2%	1.1%	2.8%	2.9%	3.0%
2004	0%	-3.5%	-3.6%	-4.3%	-4.4%	-4.4%
2005	0%	-0.2%	0.1%	0.2%	0.6%	1.3%
2006	0%	0.3%	0.7%	0.6%	1.2%	1.3%
2007	0%	1.9%	1.2%	1.3%	0.6%	0.2%
mittl. Abweichung	0%	1.4%	1.3%	1.9%	1.9%	2.0%
max. Abweichung	0%	3.5%	3.6%	4.3%	4.4%	4.4%
sum. Abweichung	0%	1.0%	-0.4%	0.7%	0.9%	1.5%

% als Prozentpunkte  
 ES: Einspeisemenge  
 RP: Regressionsparameter  
 GP: geglättete Parameter

Insgesamt kann die Qualität der entwickelten Bereinigungsfaktoren für den Fernwärmeverbrauch als sehr gut beurteilt werden, da die Abweichungen zur Referenz verhältnismässig gering sind. Zudem basieren die verwendeten Parameter auf empirischen Daten, die verwendeten Samples besitzen eine ausreichende Grösse, die Parameter und deren Standardabweichungen sind um die

Autokorrelation korrigiert, die Parameter sind meist signifikant, die  $R^2$  der Schätzungen sind in den wichtigen Wintermonaten sehr hoch und die Residuen sind in der Regel annähernd normalverteilt.

Die Güte der Anpassung wird durch die Vereinfachung des Verfahrens unter Rückgriff auf Monatsmittelwerte kaum geschmälert, die mittleren Abweichungen unterscheiden sich nicht wesentlich. Aufgrund der kleineren summierten Abweichungen scheint das monatswertbasierte Verfahren sogar etwas robuster zu sein als der tageswertbasierte Ansatz. Entsprechend ist die Verwendung des vereinfachten Ansatzes auf Basis von Monatsmittelwerten ein guter Kompromiss zwischen Aufwand und Anpassungsgüte. Die Unterschiede zwischen den Regressionsparametern und den von Hand geglätteten Parametern sind gering. Die etwas willkürliche Glättung hat keinen erheblichen negativen Einfluss auf die Anpassungsgüte.

Aufgrund der Datenlage lassen sich in dieser Anwendung keine Anpassungen zu branchen- oder sektorspezifischen Reaktionen des Verbrauchs auf die Witterungsschwankungen machen. Das Verfahren nach GT+S hat jedoch gezeigt, dass nur beim Vorliegen von deutlich höherer oder deutlich geringerer Innentemperatur als in Wohngebäuden grössere Abweichungen zu erwarten sind.

### 7.3 Vergleich mit den herkömmlichen Bereinigungsverfahren

In Tabelle 13 sind die Bereinigungs-faktoren des HGT- und des GT+S-Verfahrens aufgeführt. Um diese Werte mit dem effektiven trendbereinigten Fernwärmeeinspeiseindex und den auf Regressionsparameter basierenden Bereinigungs-faktoren vergleichen zu können, wurden die HGT- und GT+S- basierten Bereinigungs-faktoren unter Berücksichtigung des Referenzzeitraums 2000-2007 und der Klimawerte der Stadt Bern berechnet.<sup>21</sup> Die Korrekturwerte, welche mit dem Verfahren GT+S erstellt wurden, weisen nur leicht grössere mittlere (und maximale) Abweichungen auf als die mit den Regressionsparametern bestimmten Bereinigungs-faktoren. Die Qualität der HGT-Bereinigungs-faktoren ist geringer, sowohl die mittlere als auch die maximale Abweichung sind höher. Andererseits zeigt sich beim HGT-Verfahren eine geringe summierte Abweichung von -3.3 %,

<sup>21</sup> Aufgrund der Referenzperiode unterscheiden sich die Werte deutlich von den Werten in Tabelle 1, welche die Bereinigungs-faktoren für die Gesamtschweiz mit der Referenzperiode 1984 bis 2002 abbilden. Die Periode 2000 bis 2007 war deutlich wärmer als die in den HGT und GT+S Verfahren üblicherweise verwendeten Referenzperioden. Beispielsweise liegt die durchschnittliche Anzahl HGT mit 3357 deutlich unter der durchschnittlichen Anzahl HGT in der Periode 1970-1992 mit 3588.

während die kumulierte Abweichung der GT+S-Verfahren mit 4.3 % relativ gross erscheint.

*Tabelle 13: Die Bereinigungsfaktoren der herkömmlichen Witterungsbereinigungsverfahren und deren Abweichungen zur effektiven trendbereinigten Einspeisung ins Fernwärmenetz (in %-Punkten). Basis: Klimawerte Bern, Referenzzeit 2000 bis 2007. (ES: Einspeisung).*

	ES Index / Bereinigungsfaktoren		Abweichung zu ES FW	
	GT+S	HGT	GT+S	HGT
2000	0.913	0.937	-0.10%	2.24%
2001	1.006	0.966	1.47%	-2.51%
2002	0.971	0.977	3.11%	3.76%
2003	1.050	1.021	3.07%	0.11%
2004	1.048	1.021	-0.51%	-3.15%
2005	1.074	1.074	-3.03%	-3.04%
2006	1.054	1.011	1.60%	-2.71%
2007	0.955	0.989	-1.35%	1.97%
mittl. Abweichung			1.78%	2.44%
max. Abweichung			3.11%	3.76%
sum. Abweichung			4.27%	-3.34%

*Abbildung 17: Vergleich zwischen der effektiven trendbereinigten Jahreseinspeisung ins Fernwärmenetz (FW) und den geschätzten Einspeisemengen, als Index (1 = durchschnittlicher trendbereinigter Jahresverbrauch der Referenzperiode).*

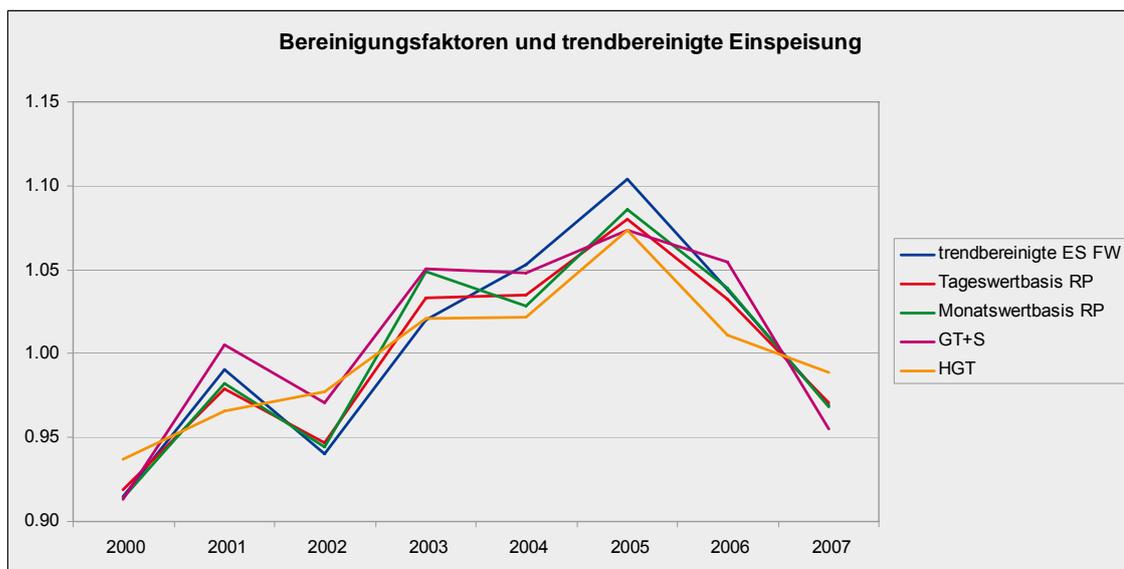
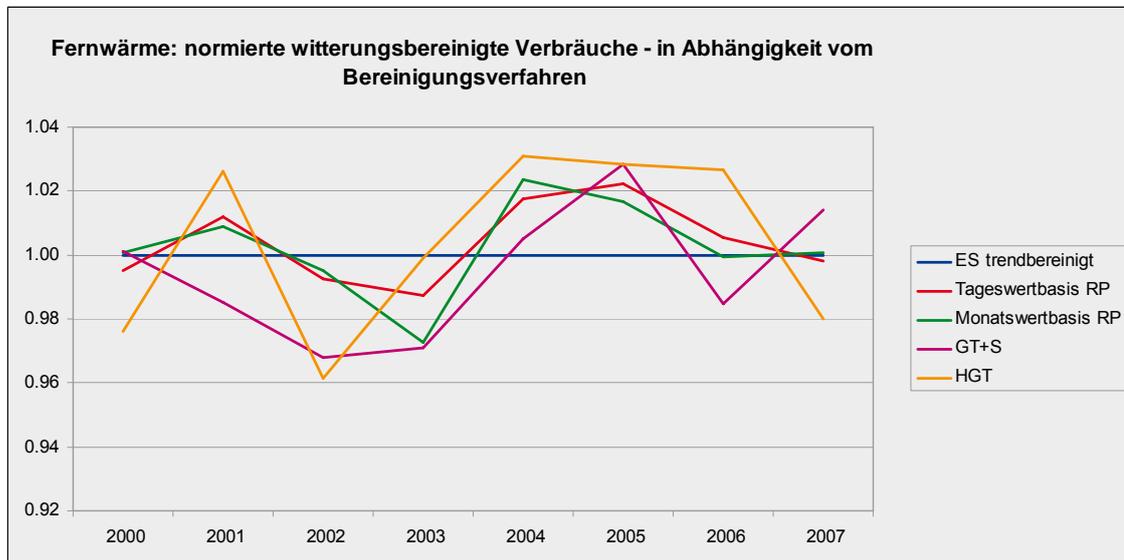
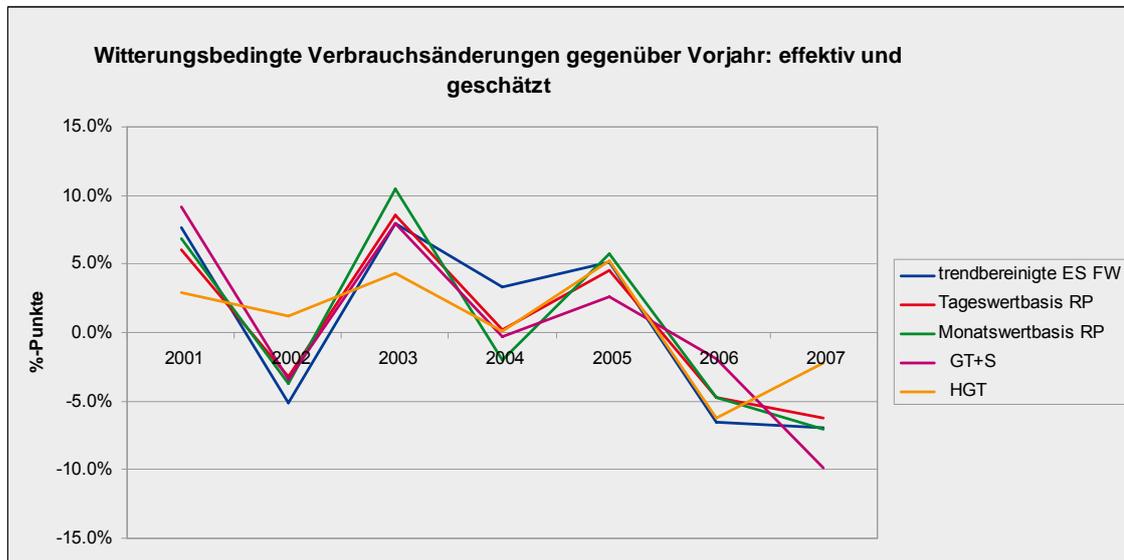


Abbildung 18: Vergleich normierter trend- und witterungsbereinigter jährlicher Einspeisemengen ins Fernwärmenetz in Abhängigkeit vom gewählten Bereinigungsverfahren. (1 = durchschnittlicher trend- und witterungsbereinigter Jahresverbrauch der Referenzperiode).



Die Entwicklung der Verbrauchsänderungen gegenüber dem Vorjahr ist in Abbildung 19 dargestellt. Die auf Basis der Regressionen geschätzten Änderungen stimmen mit Ausnahme des Jahres 2004 gut mit den effektiv gemessenen Änderungen überein. Dabei wird der Verbrauch im Jahr 2003 etwas überschätzt, jener im 2004 unterschätzt, dadurch ergibt sich für die Änderung 2003/2004 eine Differenz von gut 3 %-Punkten, bei den Monatsbasierten Ansätzen ist die Abweichung 2003/2004 gar noch höher (~5 %-Punkte). Die Abweichungen bei den GT+S Faktoren sind etwas grösser, in drei Jahren liegen die Abweichungen über 3 %-Punkten, insbesondere im Jahr 2006, wo die Abweichung rund 4.5 %-Punkte beträgt. Am grössten sind die Abweichungen bei den HGT-Korrekturfaktoren. Diese sind relativ robust gegenüber den Witterungsschwankungen und entsprechend zeigen sich lediglich geringe jährliche witterungsbedingte Verbrauchsschwankungen. Die Abweichungen zur Referenz, der gemessenen trendbereinigten Einspeiseveränderung sind teilweise erheblich: -4.7 %-Punkte in 2001, 6.3 %-Punkte in 2002, -3.6 %-Punkte in 2003, -3.3 %-Punkte in 2004 und 4.7 %-Punkte in 2007.

Abbildung 19: Vergleich zwischen der effektiven und den geschätzten witterungsbedingten Verbrauchsänderungen gegenüber dem Vorjahr (Fernwärme (FW), trendbereinigt).



Das Jahr 2007 war unter Witterungsaspekten, aufgrund des milden Winters und Frühjahrs aussergewöhnlich. Insbesondere der April war sehr warm. Gemäss den *ewb* Einspeisemengen ist der Raumwärmeverbrauch im April 2007 gegenüber dem durchschnittlichen Aprilverbrauch der Jahre 2000 bis 2007 um rund 45 % zurückgegangen. Der trendbereinigte Jahresverbrauch für Raumwärme im Jahr 2007 liegt bei der Fernwärme rund 7 % unter dem entsprechenden Vorjahresverbrauch, der Gasverbrauch ist um 5.5 % zurückgegangen. Das Bereinigungsverfahren nach GT+S scheint mit einem Verbrauchsrückgang gegenüber dem Vorjahr um 10 % den effektiven Rückgang zu überschätzen. Hingegen dürfte das Bereinigungsverfahren auf Basis von HGT mit einem ausgewiesenen Rückgang von 2 % den effektiven Rückgang unterschätzen. Der „wahre“ Bereinigungsfaktor im Jahr 2007 dürfte wohl irgendwo zwischen den Faktoren der beiden Verfahren zu liegen.

## 7.4 Übertragbarkeit auf die Gesamtschweiz

In wieweit sich die aus den Berner Daten gewonnenen Erkenntnisse zur Ableitung neuer Bereinigungsfaktoren für die Gesamtschweiz eignen, ist schwierig abzuschätzen. Folgende Punkte sind dabei zu berücksichtigen:

- Das Berner Klima unterscheidet sich vom Schweizer Durchschnitts-Klima. Die Differenz ist jedoch relativ gering, seit 1990 waren die Sommer etwas milder, die Winter etwas kühler und die Jahresstrahlungsmenge war rund 2.5 % höher. Aufgrund dieser Differenzen scheint die Übertragbarkeit der Ergebnisse nicht in Frage gestellt.
- Durch die Unterschiede im lokalen Klima und im Gebäudepark könnte sich auch die Verteilung der Jahresheizlast unterscheiden. Ein Vergleich mit einer schweizweiten Jahresheizlastkurve, welche im Verfahren GT+S verwendet wird, zeigt jedoch nur geringe Abweichungen zur „Berner Heizlastverteilung“. Die Übertragbarkeit der hier verwendeten Jahresheizlastkurven dürfte deshalb ebenfalls gegeben sein.
- Die Differenzen zwischen den Fernwärme- und den Gasparametern weisen auf die Abhängigkeit der Parameterschätzungen von der Charakteristik des belieferten Gebäudeparks hin. Insofern müsste überprüft werden, inwieweit der Berner Gebäudepark repräsentativ für den Schweizer Gebäudepark steht. Eventuell müssten für verschiedene Typen von Gebäudeparks oder Energieträgern spezifische Bereinigungsfaktoren entwickelt werden. Andererseits haben die Unterschiede zwischen den Fernwärme- und den Gasparametern nur eine beschränkte Wirkung auf die Güte der daraus abgeleiteten Bereinigungsfaktoren. So ergibt beispielsweise das Verwenden der Gasparameter zur Erzeugung der Bereinigungsfaktoren für den Fernwärmeverbrauch ein vergleichbares Ergebnis wie das Verwenden der Fernwärmeparameter.
- Bei einer Betrachtung über einen längeren Zeitraum dürfte jedoch der Einfluss von Sanierungen und neuen Gebäuden an Bedeutung gewinnen, allfällige Veränderungen der Parameter und der Jahresheizlastverteilung sollten deshalb berücksichtigt werden.

Um die Übertragbarkeit der „Berner“ Bereinigungsfaktoren auf die Gesamtschweiz verlässlich beurteilen zu können, sollte die Analyse in anderen Regionen mit vergleichbaren Einspeisedaten wiederholt werden. Durch einen Vergleich der Ergebnisse liesse sich die Möglichkeit zur Übertragung empirisch überprüfen und die sich dabei ergebenden Abweichungen abschätzen.

## 8 Anhang

### 8.1 Grafiken und Tabellen

Abbildung 20: Vergleich Gradtage: Bern (2000-2007), Schweizer Mittel (2000-2007) und langfristige Referenzperiode Bern (1984-2002).

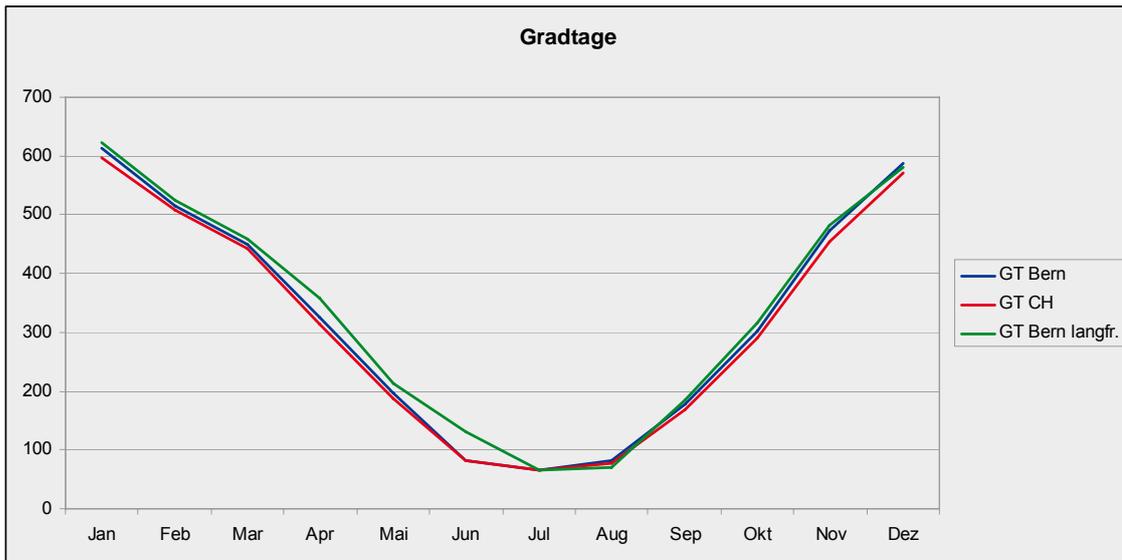


Abbildung 21: Vergleich Strahlungsmenge: Bern (2000 -2007), Schweizer Mittel (2000-2007) und langfristige Referenzperiode Bern (1984-2002).

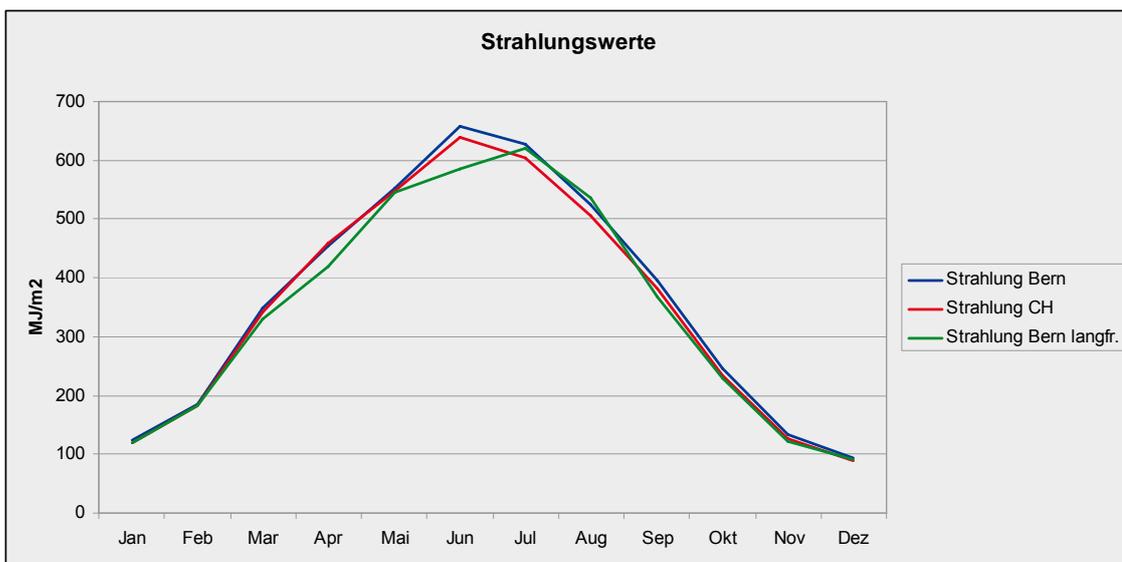


Abbildung 22 Zusammenhang zwischen täglicher Einspeisung ins Gasnetz und der mittleren Tagestemperatur.

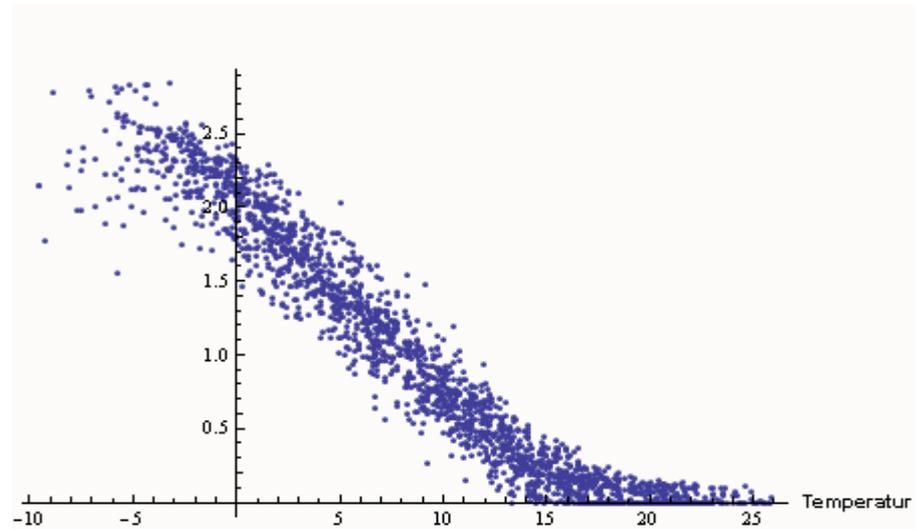


Abbildung 23: Zusammenhang zwischen täglicher Einspeisung ins Gasnetz und Strahlungsmenge.

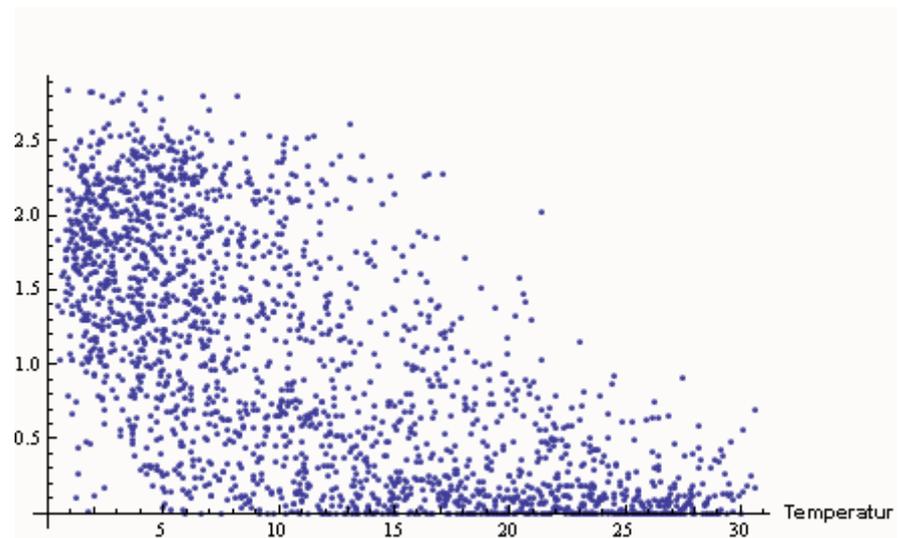


Tabelle 14: Anzahl Heiztage je Monat. Bei einer angenommenen Heizgrenze von 20°C entspricht dies der Anzahl Gradtags-Tage je Monat.

	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
2000	31	29	31	30	31	23	29	16	30	31	30	31
2001	31	28	31	30	28	25	22	19	30	31	30	31
2002	31	28	31	30	31	18	27	30	30	31	30	31
2003	31	28	31	30	30	5	17	6	30	31	30	31
2004	31	29	31	30	31	25	22	21	30	31	30	31
2005	31	28	31	30	28	18	21	29	27	31	30	31
2006	31	28	31	30	31	17	3	31	27	31	30	31
2007	31	28	31	30	30	27	24	27	30	31	30	31
Mittel 2000-2007	31	28	31	30	30	20	21	22	29	31	30	31

*Tabelle 15: Von Hand „geglättete“ Parameter für das Modell Fernwärme, auf Basis der Prais-Winston Schätzung.*

	Temperatur	Temperatur Vortag	Temperatur Vorvortag	Strahlung
Jan	-4.3	-0.8	-0.3	-0.3
Feb	-5.0	-1.0	-0.4	-0.3
Mrz	-6.3	-1.2	-0.6	-0.3
Apr	-10.0	-2.0	-1.5	-0.2
Mai	-15.0	-3.0	-3.0	-0.1
Jun	-20.0	-5.0	-4.0	-0.1
Jul	-22.0	-8.5	-6.5	-0.1
Aug	-20.0	-11.0	-4.0	-0.1
Sep	-16.0	-8.5	-2.0	-0.5
Okt	-9.5	-3.5	-1.2	-0.9
Nov	-5.9	-1.0	-1.0	-1.1
Dez	-4.8	-0.8	-0.4	-0.1

*Tabelle 16: Von Hand „geglättete“ Parameter für das Modell Gas, auf Basis der Prais-Winston Schätzung.*

	Temperatur	Temperatur Vortag	Temperatur Vorvortag	Strahlung
Jan	-4.1	-0.3	-0.3	-0.7
Feb	-4.4	-0.3	-0.7	-0.7
Mrz	-5.7	-0.5	-0.7	-0.7
Apr	-10.0	-1.5	-0.7	-0.7
Mai	-15.0	-3.0	-1.5	-0.7
Jun	-20.0	-4.5	-4.0	-1.0
Jul	-25.0	-6.5	-3.0	-1.5
Aug	-19.5	-8.5	-2.8	-1.5
Sep	-14.2	-6.5	-2.3	-1.3
Okt	-8.2	-2.8	-1.5	-1.1
Nov	-5.8	-0.9	-1.1	-0.9
Dez	-4.5	-0.3	-0.2	-0.7

*Tabelle 17: Ergebnisse der Newey-West Schätzung für die Einspeisungen ins Fernwärmenetz: Parameterwert in Bezug auf die jeweilige Variable, Standardabweichung und Signifikanzniveau  $\alpha$ . \*\*\* entspricht dem 1 %  $\alpha$ -Niveau, respektive \*\* dem 5 % und \* dem 10 %  $\alpha$ -Niveau. Die Samplegrösse wird durch die Anzahl Observationen beschrieben.*

		Temperatur	Temperatur Vortag	Temperatur Vorvortag	Strahlung	Trend	Konstante	Anzahl Ob- servationen
Januar	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-4.31 (0.19) ***	-0.68 (0.22) ***	-0.48 (0.17) ***	-0.37 (0.2) *	-0.002 (0.001) ***	107.0	279
Februar	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-5.10 (0.23) ***	-0.46 (0.3) -	-0.67 (0.24) ***	-0.57 (0.12) ***	-0.003 (0.001) ***	119.7	255
März	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-6.12 (0.24) ***	-1.88 (0.35) ***	-0.70 (0.26) ***	-0.60 (0.11) ***	-0.004 (0.001) ***	158.3	279
April	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-10.17 (0.63) ***	-1.43 (0.8) *	-1.86 (0.61) ***	-0.25 (0.18) -	-0.002 (0.002) -	228.7	240
Mai	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-15.38 (1.48) ***	-3.44 (1.51) **	-5.54 (0.97) ***	-0.41 (0.37) -	0.004 (0.004) -	428.5	240
Juni	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-21.16 (3.5) ***	-6.32 (2.69) **	-3.29 (1.64) **	-0.60 (0.83) -	0.026 (0.006) ***	566.2	158
Juli	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-31.36 (5.45) ***	-10.37 (3.49) ***	-9.40 (2.56) ***	-0.33 (1.21) -	0.03 (0.011) ***	933.9	165
August	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-21.66 (6.55) ***	-12.10 (3.92) ***	-5.21 (2.64) **	-0.25 (1.11) -	0.031 (0.006) ***	701.7	179
September	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-15.20 (1.64) ***	-8.42 (1.85) ***	-2.47 (1.73) -	-1.59 (0.61) ***	0.006 (0.003) *	477.7	234
Oktober	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-9.16 (0.52) ***	-3.18 (0.62) ***	-1.89 (0.54) ***	-1.62 (0.28) ***	-0.004 (0.001) ***	265.2	248
November	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-6.08 (0.27) ***	-0.76 (0.27) ***	-1.38 (0.25) ***	-1.39 (0.32) ***	-0.003 (0.001) ***	146.4	240
Dezember	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-4.92 (0.18) ***	-0.57 (0.22) **	-0.52 (0.18) ***	-0.21 (0.24) -	-0.002 (0.001) **	109.5	248

*Tabelle 18: Ergebnisse der Newey-West Schätzung für die Einspeisungen ins Gasnetz: Parameterwert in Bezug auf die jeweilige Variable, Standardabweichung und Signifikanzniveau  $\alpha$ . \*\*\* entspricht dem 1 %  $\alpha$ -Niveau, respektive \*\* dem 5 % und \* dem 10 %  $\alpha$ -Niveau. Die Samplegrösse wird durch die Anzahl Observationen beschrieben.*

		Temperatur	Temperatur Vortag	Temperatur Vorvortag	Strahlung	Trend	Konstante	Anzahl Ob- servationen
Januar	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-4.46 (0.38) ***	0.69 (0.38) *	-0.35 (0.32) -	-1.00 (0.47) **	0.003 (0.001) -	102.8	186
Februar	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-5.06 (0.41) ***	0.36 (0.47) -	-0.75 (0.37) **	-0.70 (0.26) ***	0.002 (0.001) -	107.3	170
März	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-6.25 (0.57) ***	-0.22 (0.72) -	-0.73 (0.58) -	-1.25 (0.25) ***	0.004 (0.002) *	143.6	186
April	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-10.07 (0.8) ***	-1.33 (0.65) **	-0.61 (0.63) -	-0.78 (0.22) ***	0.005 (0.002) **	217.0	180
Mai	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-14.25 (1.8) ***	-2.28 (1.87) -	-2.71 (1.17) **	-0.54 (0.44) -	0.006 (0.007) -	355.5	150
Juni	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-13.54 (5.15) ***	-6.99 (4.7) -	-3.76 (2.59) -	-2.61 (1.2) **	-0.003 (0.016) -	543.5	92
Juli	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-26.01 (6.97) ***	-8.66 (5.74) -	-3.45 (3.57) -	-4.87 (1.56) ***	0.04 (0.023) *	801.5	87
August	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-18.84 (8.76) **	-4.07 (4.92) -	-8.97 (4.24) **	-1.20 (1.54) -	0.019 (0.02) -	612.1	114
September	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-15.47 (1.88) ***	-5.81 (2.3) **	-1.59 (2.03) -	-1.32 (0.69) *	0.009 (0.007) -	431.1	153
Oktober	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-8.41 (0.87) ***	-2.31 (0.91) **	-1.93 (0.58) ***	-1.71 (0.35) ***	0.005 (0.003) *	232.6	186
November	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-6.43 (0.44) ***	-0.43 (0.47) -	-1.22 (0.42) ***	-1.29 (0.4) ***	0.005 (0.001) ***	136.3	180
Dezember	Parameter Std. Abw. $\alpha$ -Niveau	-5.36 (0.28) ***	-0.01 (0.34) -	-0.10 (0.36) -	-0.63 (0.42) -	0.006 (0.001) ***	100.8	186

## 8.2 Glossar

### Autokorrelation

In der Regressionsanalyse werden die Residuen als Folge von unabhängig und identisch verteilten Zufallsvariablen interpretiert. Damit die Regressionsanalyse belastbare Ergebnisse liefert, müssen diese den Erwartungswert Null und gleiche Varianzen haben. Und sie müssen unkorreliert, wenn nicht gar unabhängig sein. Sind die Residuen jedoch zeitlich korreliert, spricht man von Autokorrelation.

### Heteroskedastizität

Heteroskedastizität bedeutet in der Statistik eine unterschiedliche Streuung der Residuen innerhalb einer Datenmessung. Haben die Residuen alle die gleiche Varianz, liegt Homoskedastizität vor. Wenn die Residuen allerdings nicht die gleiche Varianz aufweisen, führt die OLS Methode nicht zu effizienten Schätzwerten für die Regressionskoeffizienten. Dies bedeutet, dass diese Schätzwerte nicht die kleinstmögliche Varianz aufweisen und ausserdem ist dann eine naive Anwendung des t-Testes nicht möglich und die t-Werte sind nicht mehr brauchbar.

### Klima

Der für eine Region typische jährliche Ablauf der Witterung. Kann detailliert beschrieben werden durch Monatskurven von Temperatur und anderen Wetterparametern, die sich aus Wetterstatistiken vieler Jahre bis Jahrzehnte ergeben.

### OLS – „Ordinary Least Squares“

Die Methode der kleinsten quadratischen Abweichungen ist das mathematische Standardverfahren zur Ausgleichsrechnung. Es ist eine Wolke aus Datenpunkten gegeben, in die eine möglichst genau passende, parameterabhängige Modellkurve gelegt werden soll. Dazu bestimmt man die Parameter dieser Kurve numerisch, indem die Summe der quadratischen Abweichungen der Kurve von den beobachteten Punkten minimiert wird.

### Multikollinearität

Multikollinearität ist ein Problem der Regressionsanalyse und liegt vor, wenn zwei erklärende Variablen eine sehr starke Korrelation miteinander haben; die Regressoren sind damit inkonsistent. Aufgrund der Tatsache, dass empirische Daten immer einen gewissen Grad an Multikollinearität aufweisen, wurden statistische Tests entwickelt, die Hinweise auf Multikollinearität liefern, einen eindeutigen Richtwert gibt es jedoch nicht.

### Newey-West

Verfahren zur Korrektur von Autokorrelation in Zeitreihenanalysen. Beim Newey-West Verfahren werden die Parameter mit dem OLS

Ansatz bestimmt, anschliessend die Standardfehler von Autokorrelation und Heteroskedastizität korrigiert. Dabei sind auch Korrekturen von Autokorrelationen höheren Grades möglich.

$R^2$

Das Bestimmtheitsmass  $R^2$  ist ein Mass für den Anteil der erklärten Varianz eines Zusammenhangs. Beträgt es für zwei Variablen X und Y beispielsweise  $R^2 = 0.5$ , dann heisst dies, dass die Hälfte (50%) der Streuung von Y durch lineare Abhängigkeit von X erklärt werden kann.

Prais-Winston

Verfahren zu Elimination von Autokorrelation 1. Grades, bei welchem durch eine Transformation der Variablen die Autokorrelation in den Residuen eliminiert wird und dadurch belastbare Standardfehler erzeugt werden.

Residuen (Fehlerterme)

Residuen werden durch Subtrahieren der Modellschätzungen von den eigentlichen Daten berechnet. Die Residuen definieren den Anteil der Variabilität, der durch ein gegebenes Modell nicht erklärt werden kann.

Signifikanzniveau  $\alpha$

Das Signifikanzniveau  $\alpha$  gibt die Wahrscheinlichkeit an mit der die Nullhypothese, dass ein spezifischer Parameter den Wert Null besitzt, fälschlicherweise verworfen wird (Fehler 1. Art). Beispielsweise bedeutet das Signifikanzniveau  $\alpha = 5\%$ , dass wir in Kauf nehmen, die Nullhypothese zu verwerfen, obwohl diese mit einer Wahrscheinlichkeit von 5% zutrifft.

Wetter

Das Wetter charakterisiert den Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort und zu einem bestimmten Zeitpunkt (in dieser Arbeit erstreckt sich der Zeitpunkt auf einen Tag).

Witterung

Das Wetter an einem Ort über einen Zeitraum von mehreren Tagen oder Wochen betrachtet.

Zeitreihe

Eine Zeitreihe besteht aus mehreren Werten, die chronologisch angeordnet sind.

## 9 Literatur

- BAFU (2008). Emissionen nach CO<sub>2</sub>-Gesetz - Informationen zur Klimakorrektur.  
<http://www.bafu.admin.ch/klima/00503/00504/index.html?lang=de>  
 eingesehen: Juni 2008.
- Carlevaro, F., Spierer, C. (1986). Choix d'une mesure de l'intensité de froid pour l'analyse macro-économique de la demande d'énergie. Revue de l'énergie, Nr: 386, Pages: 828-833.
- Kohler, U., Kreuter, F. (2001). Datenanalyse mit STATA. Allgemeine Konzepte der Datenanalyse und ihre praktische Anwendung. München / Wien: Oldenbourg.
- Müller, E.A., Gartner, R., Meyer-Hunziker, B. (1995). Klimanormierung Gebäudemodell Schweiz. Bundesamt für Energiewirtschaft, Arbeitsgruppe Energieperspektiven; Schlussbericht.
- Prognos (2003). Einfluss von Temperatur- und Globalstrahlungsschwankungen auf den Energieverbrauch der Gebäude. P.Hofer, Prognos AG Basel, im Auftrag des Bundesamtes für Energie BFE, Bern.
- Wolfram Mathematica (2008). Help Manual: Variance Inflation.
- Wooldridge, J.M. (2003). Introductory Econometrics, S. 410 ff. Thomson, South-Western, Ohio.