

WETTERINFORMATIONEN FÜR STROMVERBRAUCHSPROGNOSEN FÜR WEICHENHEIZUNGEN

WISpro WHZ hatte zum Ziel, den ÖBB Wetterprognosen zur verbesserten Abschätzung des Energieverbrauchs der Weichenheizungen zur Verfügung zu stellen. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf der Prognose von Schneeverwehungen, um das manuelle Einschalten der Weichenheizung durch ÖBB-Mitarbeiter in der Energieverbrauchsprognose zu berücksichtigen.

Um Schneeablagerungen zu verhindern, beheizen die ÖBB in den Wintermonaten einen Großteil der Weichen. Die ÖBB versuchen gleichzeitig die dafür notwendigen Energiekosten durch ein entsprechendes Energiemanagement zu reduzieren. Hierfür wird versucht, den Energieverbrauch im Vorhinein möglichst genau abzuschätzen, um besser planen zu können, wann Energie zugekauft oder aus den ÖBB-Speicherseen verwendet werden kann.

Da das Ein- und Ausschalten der Weichenheizung über meteorologische Messungen von Temperatur und Niederschlag gesteuert wird, werden für die Stromverbrauchsprognose präzise Wettervorhersagen benötigt. Im Rahmen des Projektes verbesserte UBIMET das Schneehöhenmodell und entwickelte ein Modell für die Prognose von Schneeverwehungen. Dies ermöglicht die zusätzliche Berücksichtigung von Wettersituationen in der Energieverbrauchsprognose, die zum manuellen Einschalten der Weichenheizung führen.

Da Schneehöhe und Temperatur nicht linear mit dem Energieverbrauch zusammenhängen (die Weichenheizung verbraucht nicht zunehmend mehr Energie mit zunehmender Schneehöhe), untersuchte

UBIMET anhand historischer Energieverbrauchsdaten und gemessener Wetterparameter, auch die Möglichkeit der Transformation ausgewählter meteorologischer Parameter und deren Kombination, um den Energieverbrauch der Weichenheizung direkt vorherzusagen. Dabei wurden Transformationen für Temperatur und Niederschlag gefunden, die deutlich stärker mit dem Energieverbrauch der Weichenheizungsanlagen korrelieren als untransformierte Wetterparameter.

Facts:

- Laufzeit: 06/2014-08/2015
- Förderprogramm: Verkehrsinfrastrukturförderung 2013
- Auftraggeber: ÖBB
- Auftragnehmer: UBIMET GmbH
- Ergebnisse: Verbessertes Schneehöhenmodell, Entwicklung eines Schneeverwehungsindex, Untersuchung linearer Zusammenhänge zwischen Energieverbrauch und Wetterparametern



ABB 1. Schneefreie Weichen durch Weichenheizanlage © shutterstock



ABB 2. Verifikation des Regressionsmodells (rot) mit Messdaten des gemittelten Energieverbrauchs aller Weichenheizungsanlagen (blau) mittels Kreuzvalidierung

Problem

Die Steuerung der Weichenheizungsanlagen erfolgt automatisch über Temperaturfühler und Niederschlagssensor. Diese erfassen aber keine Schneeablagerung auf den Weichen durch Schneeverwehungen, welche ein manuelles Einschalten der Weichenheizungen durch den Fahrdienstleiter erfordern. Diese Ereignisse müssen in der Stromverbrauchsprognose berücksichtigt werden. Zusätzlich stellt sich für die Stromverbrauchsprognose das Problem, dass es keine linearen Zusammenhänge zwischen Wetterparametern und Energieverbrauch gibt.

Gewählte Methodik

Die Schneehöhe ist ein wichtiger Parameter für die Beurteilung des Risikos für Schneeverwehung. UBIMET hat das Schneemodell daher durch Berücksichtigung von Schneesetzung und -schmelze verbessert. Hierauf aufbauend wurde ein Modell entwickelt, das die verwehbare Schneemenge und die Wahrscheinlichkeit für Schneeverwehung aus Windgeschwindigkeit, Schneehöhe und Beschaffenheit des Schnees berechnet. Anhand historischer Energieverbrauchsdaten und gemessener Wetterparameter wurden Transformationen von Temperatur und Niederschlag gesucht, die deutlich stärker mit dem Energieverbrauch der Weichenheizungsanlagen korrelieren als die untransformierten Wetterparameter. Mittels Regressionsanalyse wurde eine Kombination von Wetterparametern gesucht, die den Energieverbrauch der Weichenheizung direkt prognostizieren.

Ergebnisse

Resultat des Projektes sind ein verbessertes Schneemodell, ein Schneeverwehungsindex und der Prototyp eines Regressionsmodells zur direkten Abschätzung des Energieverbrauch durch die Weichenheizungen. Eine Kreuzvalidierung des Regressionsmodells zeigte gute Übereinstimmung mit gemessenen Energieverbräuchen durch Weichenheizungsanlagen.

Schlussfolgerungen

Die direkte Verwendung meteorologischer Variablen wie Temperatur, Wind oder Schneefall sind als Prädiktoren für die Prognose des Energieverbrauchs durch Weichenheizungsanlagen nicht optimal, aufgrund fehlender linearer Zusammenhänge. Die Qualität von Vorhersagen des Energieverbrauchs könnte über ein Regressionsmodell, das gemittelte und transformierte Wetterparameter als Prädiktoren verwendet deutlich verbessert werden.

English Abstract

Besides the traditional energy consumption by traction (train operation) and buildings, switch heating plays a significant role during operation in winter. Due to more accurate weather forecasts the estimation of expected energy consumption by switch heating can be improved and thus allowing an optimization of energy trading and the use of renewable energy resources.

Impressum:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

DI Dr. Johann Horvatiits,
Abt. IV/ST 2 Technik und
Verkehrssicherheit
johann.horvatiits@bmvit.gv.at,

DI (FH) Andreas Blust,
Abt. III/14 Mobilitäts- und
Verkehrstechnologien
andreas.blust@bmvit.gv.at,
www.bmvit.gv.at

ÖBB-Infrastruktur AG

Ing. Wolfgang Zottl, ISM;
Leitung Forschung & Entwicklung
wolfgang.zottl@oebb.at,
www.oebb.at

ASFINAG

DI Eva Hackl,
Manager International Relations
und Innovation
eva.hackl@asfinag.at,

DI (FH) René Moser, Leiter Strategie, Internationales und Innovation
rene.moser@asfinag.at,
www.asfinag.at

Österreichische Forschungs-förderungsgesellschaft mbH

DI Dr. Christian Pecharda,
Programmleitung Mobilität
Sensengasse 1, 1090 Wien
christian.pecharda@ffg.at,
www.ffg.at

September, 2015

Wetterinformationen für Stromverbrauchsprognosen für die Weichenbeheizung WISpro WHZ

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung 2013
(VIF2013)

September 2015



Impressum:

Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien
Radetzkystraße 2
A - 1030 Wien



ÖBB-Infrastruktur AG
Praterstern 3
A - 1020 Wien



Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs
Aktiengesellschaft
Rotenturmstraße 5-9
A - 1010 Wien



Für den Inhalt verantwortlich:

UBIMET GmbH
Donau-City-Straße 11
1220 Wien



Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Bereich Thematische Programme
Sensengasse 1
A – 1090 Wien



Wetterinformationen für Stromverbrauchsprognosen für die Weichenbeheizung WISpro WHZ

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung
(VIF2013)

AutorInnen:

Dr. Daniela KNORR

Dr. Dieter MAYER

Dr. Günther DOPPELBAUER

Auftraggeber:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

Auftragnehmer:

UBIMET GmbH

INHALTSVERZEICHNIS

| | |
|--|----|
| INHALTSVERZEICHNIS..... | 4 |
| ABBILDUNGSVERZEICHNIS..... | 4 |
| TABELLENVERZEICHNIS..... | 6 |
| 1 EINLEITUNG | 7 |
| 2 PROBLEMSTELLUNG | 8 |
| 3 ZIELSTELLUNG | 8 |
| 4 ERGEBNISSE | 9 |
| 4.1 Schneemodell | 9 |
| 4.1.1 Berücksichtigung der Schneesetzung | 10 |
| 4.1.2 Berücksichtigung der Schneeschmelze..... | 11 |
| 4.2 Schneeerwehungsindex..... | 12 |
| 4.2.1 Definition des Schneeerwehungsindex..... | 13 |
| 4.2.2 Kombination von zwei Schneeschichten | 14 |
| 4.2.3. Schneemodell der obersten erwehbaren Schneeschicht | 16 |
| 4.2.4 Berechnung des Pseudoniederschlag..... | 17 |
| 4.3 Zusammenhänge zwischen Wetterparametern und Stromverbrauch | 22 |
| 4.3.1 Vorgangsweise | 22 |
| 4.3.2 Transformation der Wetterparameter | 23 |
| 4.3.3 Auswahl passender Orte..... | 31 |
| 4.3.4 Vorhersage des gesamten (aufsummierten) Energieverbrauchs der Weichenheizungsanlagen..... | 32 |
| 4.3.5 Vorhersage des Energieverbrauchs einzelner Weichenheizungsanlagen | 42 |
| 5 ZUSAMMENFASSUNG UND EMPFEHLUNGEN | 44 |
| Literaturverzeichnis..... | 47 |

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Schneeerwehungsindex (SBI) und Einzelkomponenten ($SBI_T = \text{Temp}$, $SBI_{FF} = \text{Windgeschwindigkeit}$, $SBI_{FFX} = \text{Windböen}$, $SBI_H = \text{Schneehöhe}$, $SBI_p =$ Schneedichte) für Wien am 9.2.2015 | 14 |
| Abbildung 2: Kombination zweier Schneeschichten - Höhenanpassung der unteren Schneeschicht aufgrund der Kompression bzw. Durchnässung)..... | 16 |
| Abbildung 3: Schneemodell am Beispiel Brenner (26.1.2014 bis 30.1.2015) | 17 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 4: Wahrscheinlichkeit für Schneeverwehung als Funktion der Windgeschwindigkeit U_{10} für verschiedene Schneedichten und damit zusammenhängender Feuchttemperaturen. | 20 |
| Abbildung 5: Die gestrichelte Linie zeigt die (finale) Schneeverwehungswahrscheinlichkeit mit Feuchttemperatur-Korrekturfaktor, die durchgezogene Linie zeigt die (unmodifizierte) Wahrscheinlichkeit ohne Korrekturfaktor. | 21 |
| Abbildung 6: Zusammenhang zwischen gemittelter Temperatur und Energieverbrauch aller Weichenheizungsanlagen | 24 |
| Abbildung 7: Scatterplot des Energieverbrauchs aller Weichenheizungsanlagen vs. über alle betrachteten Orte gemittelten binären Schneefallparameter (Schneefall ja = 1, Schneefall nein = 0) | 26 |
| Abbildung 8: Scatterplot des Energieverbrauchs aller Weichenheizungsanlagen vs. über alle betrachteten Orte gemittelten binären Schneebedeckungsparameter (Schneebedeckung ja = 1, Schneebedeckung nein = 0) | 27 |
| Abbildung 9: Zusammenhang zwischen Schneehöhe aus dem Modell und Energieverbrauch der Weichenheizungsanlagen | 28 |
| Abbildung 10: Vergleich des mittleren Tagesganges des Energieverbrauchs mit dem invertierten Tagesgang der Temperatur | 29 |
| Abbildung 11: Übereinstimmung des mittleren Tagesganges des Energieverbrauchs mit der mittleren Nachtlänge | 30 |
| Abbildung 12: ausgewählte ÖBB-Wetterstationen..... | 31 |
| Abbildung 13: Korrelationskoeffizienten von Weichenheizungsverbrauchsdaten mit gemittelten Messdaten von Wetterstationen | 33 |
| Abbildung 14: Korrelationskoeffizienten von Weichenheizungsverbrauchsdaten mit gemittelten Vorhersagendaten aus Wettermodellen..... | 34 |
| Abbildung 15: Abnahme des RMSE durch Hinzunahme weiterer Parameter | 36 |
| Abbildung 16: Vergleich des gemessenen Energieverbrauchs (rot) mit der Vorhersage des Regressionsmodells mit allen sechs Prädiktoren (blau) , oben im Dezember 2012, unten im Januar 2013 | 37 |
| Abbildung 17: Vergleich des gemessenen Energieverbrauchs (rot) mit der Vorhersage des Regressionsmodells mit allen sechs Prädiktoren (blau), oben im Februar 2013, unten im März 2013..... | 38 |

Abbildung 18: Vergleich des gemessenen Energieverbrauchs (rot) mit der Vorhersage des Regressionsmodells mit allen sechs Prädiktoren (blau), oben im April 2013, unten im Dezember 201339

Abbildung 19: Vergleich des gemessenen Energieverbrauchs (rot) mit der Vorhersage des Regressionsmodells mit allen sechs Prädiktoren (blau) im Januar 201440

Abbildung 20: Vergleich des gemessenen Energieverbrauchs mit dem Gesamtmodell des Verbrauchs und den Beiträgen der einzelnen Prädiktoren.....40

Abbildung 21: Verifikation der Vorhersage des Regressionsmodells (blau) mit Messungen des mittleren Energieverbrauchs aller Weichenheizungsanlagen (rot) mittels Kreuzvalidierung über den gesamten Testzeitraums Dezember 2013 bis April 201441

Abbildung 22: Verifikation im Zeitraum 20.01. - 20.02.201442

Abbildung 23: Korrelation zwischen transformierter Temperatur (blau) und Niederschlag (grün) und Energieverbrauch einzelner Weichenheizungsanlagen (rot) (2.1. bis 4.2.2014) (oben Station Krems, unten Station Attnang-Puchheim)43

Abbildung 24: Korrelation des Gesamtenergieverbrauchs aller Weichenheizungen (rot) mit den transformierten mittleren Messdaten aller ausgewählten Wetterstationen (blau = Temperatur, grün = Niederschlag)44

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Variablen für die Berechnung der Schneeverwehung 19

Tabelle 2: ausgewählte ÖBB-Stationen..... 31

Tabelle 3: Fehlermaße der verschiedenen Prädiktorsets 35

1 EINLEITUNG

Im Rahmen der Ausschreibung Verkehrsinfrastrukturforschung 2013 (VIF2013) wurde das Thema „2.2.3 Wetterdaten für Stromverbrauch von Weichenheizungen“ ausgeschrieben. Mit Hilfe von Neuschneevorhersagen und zusätzlichen Wetterdaten kann der Mehrverbrauch von Bahnstrom durch die Weichenheizungen an Neuschneetagen bis zu drei Tage im Voraus prognostiziert werden. Durch eine möglichst genaue Bahnstromverbrauchsprognose können die ÖBB nicht nur Ausgleichsenergiekosten vermeiden, sondern langfristig auch ihre Speicherseen noch besser bewirtschaften. Das Ziel der Ausschreibung bestand daher darin, Wetterprognosedaten, sowie historische Analyse-/Messdaten für Bahnstromprognosen als Zeitreihen verfügbar zu machen und diese in die bestehende Prognosesoftware einzubinden, um aus diesen Daten verbesserte Bahnstromverbrauchsprognosen zu generieren.

UBIMET hat sich auf diese Ausschreibung erfolgreich mit einer Projektidee beworben, die die Verbesserung der Schneehöhenprognose und die Entwicklung eines Schneesverwehungsindex zum Inhalt hatte, um auch die Wettersituationen abzubilden, die bisher nicht in die Stromverbrauchsprognose der ÖBB berücksichtigt werden. Da die klassischen Wetterparameter, die die ÖBB momentan aus dem INFRA:Wetter beziehen, aufgrund fehlender linearer Beziehungen zum Stromverbrauch nicht optimal für die Stromverbrauchsprognose sind erweiterte sich die Aufgabenstellung von UBIMET um die Forschungsfrage, ob eine Transformation der Wetterparameter bessere Korrelationen mit dem Stromverbrauch aufweisen.

Der gegenständige Ergebnisbericht beschreibt das Schneebilanzmodell, den Schneesverwehungsindex und die Ergebnisse der Untersuchung zur Transformation der Wetterparameter, um einen linearen Zusammenhang mit dem Stromverbrauch herzustellen.

2 PROBLEMSTELLUNG

Für einen möglichst reibungslosen Eisenbahnbetrieb in den Wintermonaten wird bei Eisenbahnunternehmen ein Großteil der Weichen beheizt um Schneeablagerungen zu verhindern. Die elektrische Beheizung von Weichen kann dabei – je nach Region und Wetter – kurzfristig und kurzzeitig für bis zu 20% des Energieverbrauchs verantwortlich sein.

Generell sind Weichenheizungen so aufgebaut, dass bei Unterschreitung einer festgelegten Temperatur und messbarem Niederschlag die Heizung für eine Gruppe an Weichen automatisch eingeschaltet und bei Überschreiten einer festgelegten Temperatur und Unterschreitung eines Grenzwertes für Niederschlag wieder automatisch ausgeschaltet wird. Die Steuerung erfolgt dabei über einen bei der Weichenanlage installierten Temperaturfühler und einen Niederschlagssensor (LANGER & SCHINK 2012). Temperatur- und Niederschlagsmessungen reichen aber nicht aus, um das Problem der Schneeablagerung auf den Weichen durch Schneeverwehungen durch Wind und durch die Züge verfrachteten Schnee (Flugschnee) zu erfassen. Diese können auch bei trockenem Wetter auftreten, wenn der Niederschlagssensor keinen Niederschlag misst. Um die Energiekosten durch ein entsprechendes Energiemanagement zu reduzieren, planen die ÖBB mit Hilfe von Energieverbrauchsprognosen für die kommenden Stunden bzw. Tage, wann Energie aus den eigenen Kraftwerken verwendet wird und wann am freien Strommarkt Energie zugekauft werden kann. Hierfür müssen alle Ereignisse, die zum Einschalten der Weichenheizungen führen – also Temperatur, Niederschlag und Schneeverwehungen - in die Stromverbrauchsprognose einbezogen werden. Zeitlich exakte Temperatur-, Neuschnee- und Schneeverwehungsprognosen können daher helfen, die Bahnstromverbrauchsprognose und damit das Energiemanagement zu verbessern.

3 ZIELSTELLUNG

Ziel des Projektes war es, den ÖBB meteorologische Prognosen zur exakten Berechnung des Energieverbrauchs der Weichenheizungen zur Verfügung zu stellen. Neben zeitlich verbesserten meteorologischen Grundparametern (Temperatur, Niederschlag, Wind) wurde das Hauptaugenmerk auf die Problematik der Schneeverwehungen gelegt, um

diesen Auslöser für das Einschalten der Weichenheizung ebenfalls in der Energieverbrauchsprognose zu berücksichtigen. Die Entwicklung eines Schneeverwehungsindex und die Verbesserung der Schneehöhenprognose stellten die Hauptziele des Projektes dar. Um dies zu erreichen mussten die bei UBIMET existierenden Wettermodelle bzw. benötigten Wetterparameter (v.a. Wind) räumlich durch Downscaling-Ansätze angepasst und verbessert werden. Die Prognosen der meteorologischen Grundparameter, sowie Schneehöhe und Schneeverwehungsindex sollten den ÖBB als Zeitreihen über eine eigene Schnittstelle in die bei den ÖBB bestehende Prognosesoftware für den Bahnstromverbrauch zur Verfügung gestellt werden.

Da die direkte Verwendung der meteorologischen Grundparameter Temperatur, Wind, Schneefall und Schneeverwehung als Prädiktoren in linearen Regressionsmodellen, wie sie von den ÖBB für die Energieverbrauchsprognose verwendet werden, nicht optimal ist, weil der Zusammenhang zwischen diesen Variablen und dem Energieverbrauch keinen linearen Verlauf aufweist, wurde die Zielstellung des Projektes im Projektverlauf erweitert. UBIMET sollte aus den Wetterparametern weitere Variablen ableiten, die stärkere Korrelationen mit den gemessenen Energieverbrauchswerten liefern.

4 ERGEBNISSE

4.1 Schneemodell

Die Schneehöhe ist ein wichtiger Parameter für die Beurteilung des Risikos für Schneeverwehung. UBIMET hat das Schneemodell daher im Rahmen des Projektes durch Berücksichtigung eines Bilanzierungsmodells verbessert. Die Prognose der Gesamtschneehöhe SH kann durch ein komplexes Bilanzmodell durch Beachtung folgender Gegebenheiten deutlich verbessert werden:

- Erhöhung von SH durch Neuschnee
- Reduktion von SH durch Setzung
- Reduktion von SH durch Schmelzen

Die beteiligten Größen und Einheiten sind hier:

- Gesamtschneehöhe SH [cm]
- Neuschneehöhe NSH [cm]

- Masse des Schnees pro Fläche: M_{SH} [kg/m²]
- Masse- bzw. Wasseräquivalent des geschmolzenen Schnees pro Fläche: Δm [kg/m²] bzw. [mm]
- Verhältnis zwischen Neuschneehöhe und Wasseräquivalent x_{NS} [cm/mm]
- Dichte des Gesamtschnees ρ_S [kg/m³]
- Dichte des Neuschnees ρ_{NS} [kg/m³]
- Feuchttemperatur T_f [°C] (entspricht TF)
- Trockentemperatur T [°C] (entspricht TT)
- Taupunkt T_d [°C] (entspricht TD)
- Einstündige Niederschlagssumme RR_{1h} [mm] (entspricht $RR1H$)
- Luftdruck am Boden p [hPa] (entspricht P)
- Irradianz der globalen kurzwelligeren Einstrahlung F_{kw} [W/m²] (entspricht RAD)
- Irradianz der langwelligen Gegenstrahlung F_w [W/m²]
- Wasserdampfdruck e [hPa]
- Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe V [m/s] (entspricht FF)
- Albedo der Schneeoberfläche a [1]
- Zeitintervall für Schnee-Update Δt [h]
- Zeitkonstante für Zunahme der Schneedichte [h], hier werden 5 Tage, also $\tau = 120$ h verwendet.

Mit einer stündlichen Auflösung werden folgende Schritte durchgeführt, bei welchen jeweils die Dichte des Schnees ρ_S sowie die Masse M_S (pro m²) des Schnees angepasst werden müssen.

4.1.1 Berücksichtigung der Schneesetzung

Die Setzung von Schnee wird durch eine exponentiell gedämpfte Zunahme der Dichte ρ_S in Richtung ρ_{max} parametrisiert, wobei die Masse konstant bleibt.

$$\rho_S(t) = \rho_{max} - (\rho_{max} - \rho_S(t)) \cdot \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right)$$

$$SH(t) = M_S(t) \frac{100}{\rho_S(t)}$$

In einer eventuellen Erweiterung wäre es angebracht, die Zeitkonstante von Wind und Temperatur abhängig zu machen.

4.1.2 Berücksichtigung der Schneeschmelze

Die Abnahme der Schneemasse hängt von der kurzwelligen Strahlung, von der langwelligen Strahlung, von der Wärme des Niederschlages, vom Wind sowie vom turbulenten Austausch von fühlbarer und latenter Wärme ab.

$$\Delta m_S = \max \left[0, 10.7482 \times 10^{-3} \left[F_{kw}^\downarrow (1 - a) + F_{lw}^\downarrow \right] - 3.37 + 1.25 \times 10^{-2} RR_{1h} T_f \right. \\ \left. + 8.5 \cdot 2 \times 10^{-3} \cdot 3.6 V \left[\frac{e}{100} - 6.11 + 5.7 \times 10^{-4} pT \right] + RR_{1h} (T_f \geq 1.5) \right]$$

Dabei ist $a = 0,7$ die in erster Näherung als konstant angenommene Albedo. Der letzte Term berücksichtigt die im Regen gebundene Masse (bei $T_f \geq 1,5$ °C). Abnahme von Schneehöhe oder Schneemasse hängt nun davon ab, ob die maximal mögliche Schneedichte ρ_{max} bereits erreicht wurde. Falls $\Delta m_S > 0$ gilt im Fall, dass die Dichte zunimmt und das Schmelzwasser noch im Schnee verbleibt: Die langwellige Strahlung F_{lw} ergibt sich aus Dampfdruck e und Temperatur T wie folgt:

$$F_{lw}^\downarrow = (0.804 - 0.236 \times 10^{-0.052 \cdot e}) \cdot \sigma T^4$$

Dabei ist $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$ die Stefan-Boltzmann Konstante. Die Irradianz F_{lw} liegt in W/m^2 , der Dampfdruck e in Pa und die Temperatur T in diesem Fall in Kelvin vor. Der Dampfdruck e berechnet sich aus dem Taupunkt T_d (in °C)

$$e = 610.78 \exp \left(\frac{17.08085 T_d}{234.175 + T_d} \right)$$

In obiger Formel ist der Dampfdruck e in Pa und der Taupunkt T_d in °C zu verwenden.

Während die Schneedecke schmilzt, also Masse bzw. Wasseräquivalent der Höhe Δm_S abbaut, nimmt die Dichte ρ_S bis zu einem Maximalwert zu während die Gesamtmasse noch konstant bleibt. Erst danach sollte sowohl Masse als auch Schneehöhe abnehmen, während die Dichte konstant bleibt.

$$SH(t) = \max \left[0, SH(t) + \frac{100}{1000} \Delta m_S - \frac{100}{\rho_S(t)} \Delta m_S \right] \\ \rho_S(t) = \min \left[\rho_{max}, \frac{100}{SH(t)} M_S(t) \right]$$

Falls die Schneehöhe in obiger Gleichung den Wert $SH(t) = 0$ erreicht, wird die Dichte auf $\rho_s(t) = 300 \text{ kg/m}^3$ und die Masse auf $M_S(t) = 0$ gesetzt.

Falls zuvor die Dichte bereits der Maximaldichte $\rho_s(t) = \rho_{max}$ entsprach, wird anstelle von obiger Gleichung folgende Parametrisierung verwendet:

$$M_S(t) = \max [0, M_S(t) - \Delta m_S(t)]$$

$$SH(t) = \frac{100}{\rho_{max}} M_S(t)$$

4.2 Schneeverwehungsindex

Unter dem Schneeverwehungsindex versteht man die Anfälligkeit für den vom Wind getriebenen Massentransport von Alt- oder Neuschnee. Der Prognosehorizont beläuft sich auf $t_{max} = 3$ Tage, die gewünschte zeitliche Auflösung beträgt $\Delta t = 6$ Stunden. Der Schneeverwehungsindex wurde eng an die in der Literatur recherchierten Methoden für den Blowing Snow Index (BSI) angelehnt (z.B. LI & POMEROY 1997, GUYOMARG'H & MÉRINDOL 1998, BAGGALEX & HANESIAK 2005, DÉRY & YAU 2008). In diesen fließt die 2m Temperatur T , die 5cm Temperatur T_s , die mittlere 10m Windgeschwindigkeit V , die Windböen FFX , die in Punkt 3.1 beschriebene Schneehöhe SH sowie die Schneedichte ρ ein.

Da nicht die gesamte Schneehöhe SH „verwehbar“ ist, sondern nur die oberste(n) Schneeschicht(e)n mit einer bestimmten Schneedichte, war die größte Herausforderung die Bestimmung der Schneedichte sowie die Höhe der obersten Schneeschicht, welche diese Dichte aufweist. Für diesen Zweck müsste man sowohl Höhe als auch Dichte der verwehbaren Schneeschicht mitführen und updaten. In Zeitperioden ohne Neuschnee wird abhängig von Temperatur und Strahlung die Schneedichte erhöht (bis zu einem Sättigungswert). Fällt (verwehbarer) Neuschnee auf eine bereits vorhandene Schneedecke, so muss basierend auf der bisherigen Höhe und Dichte eine äquivalente Höhe mit angenommener gleicher Dichte wie bei der neu hinzukommenden Schicht berechnet werden und beide Schichten zu einer Schicht kombiniert werden. Diese eine Schicht hätte dann die Dichte der Neuschneesicht und die Höhe der Neuschneesicht zuzüglich der effektiven Altschneesicht.

4.2.1 Definition des Schneesverwehungsindex

Der Schneesverwehungsindex setzt sich aus 6 Anteilen zusammen, wobei zwei davon Temperaturmaße, zwei weitere Windmaße und die verbleibenden zwei vom Schnee selbst abhängen:

- Einfluss der Temperatur T 2m über dem Boden:

$$\begin{array}{ll} T \leq -6.5 & f(T) = 1 \\ -6.5 < T \leq 0.5 & f(T) = -0.0087T^2 + 0.2447 \\ T > 0.5 & f(T) = -(0.0181 T)^2 - 0.139 T + 0.2257 \end{array}$$

- Einfluss der Windgeschwindigkeit V in 10m Höhe:

$$\begin{array}{ll} V \leq 4.0 & f(V) = 1.014 V - 4.014 \\ 4.0 < V < 15.0 & f(V) = -0.0076 V^2 + 0.2314 V - 0.7616 \\ V \geq 15.0 & f(V) = 1 \end{array}$$

- Einfluss der Windböen G in 10m Höhe

$$\begin{array}{ll} G \leq 6.0 & f(G) = -0.075 G^2 + 1.1192 G - 3.9657 \\ 6.0 < G < 21.0 & f(G) = -0.0029 G^2 + 0.1416 G - 0.6952 \\ G \geq 21.0 & f(G) = 1 \end{array}$$

- Einfluss der Schneehöhe SH :

$$\begin{array}{ll} SH \leq 5.0 & f(SH) = -0.0732 SH^2 + 0.6711 SH - 3.9321 \\ 5.0 < SH < 31.0 & f(SH) = -0.0007 SH^2 + 0.0538 SH - 0.0022 \\ SH \geq 31.0 & f(SH) = 1 \end{array}$$

- Einfluss der Dichte des Schnees ρ_s :

$$\begin{array}{ll} \rho_s \leq 100 & f(\rho_s) = 1 \\ 100 < \rho_s < 240 & f(\rho_s) = -1.83 \cdot 10^{-5} \rho_s^2 + 0.0019 \rho_s + 0.9912 \\ \rho_s \geq 240 & f(\rho_s) = -0.0534 \rho_s + 13.207 \end{array}$$

Der Schneesverwehungsindex (SBI) ist nun die Summe aus den einzelnen Anteilen

$$SBI = 2 f(T) + f(V) + f(G) + f(H) + f(\rho)$$

Interpretation des Schneeverwehungsindex

Der Schneeverwehungsindex wird in 5 Gefahrenstufen aufgeteilt (siehe Abbildung 1), wobei sich die Gefahr aus der Wahrscheinlichkeit für Schneeverwehung und der Menge an verwehbarem Schnee ergibt. Extreme Gefahr für Schneeverwehung bedeuten sowohl eine sehr hohe Wahrscheinlichkeit, als auch eine große Menge an Schnee, eine mäßige Gefahr kann sowohl viel Schnee, aber geringe Wahrscheinlichkeit, als auch hohe Wahrscheinlichkeit aber wenig Schnee bedeuten. Ist kein Schnee zum Verwehen vorhanden, herrscht keine Gefahr. Ist zwar Schnee vorhanden, aber die Windgeschwindigkeit zu gering, herrscht ebenfalls keine Gefahr.

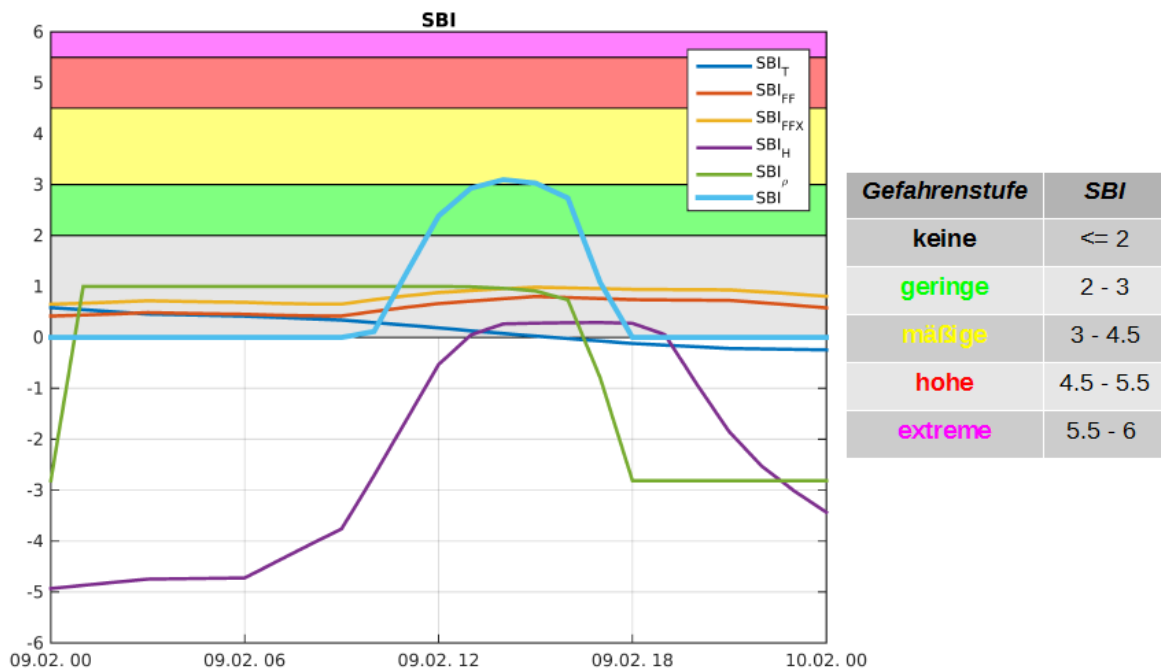


Abbildung 1: Schneeverwehungsindex (SBI) und Einzelkomponenten (SBI_T = Temp, SBI_{FF} = Windgeschwindigkeit, SBI_{FFX} = Windböen, SBI_H = Schneehöhe, SBI_{ρ} = Schneedichte) für Wien am 9.2.2015

4.2.2 Kombination von zwei Schneeschichten

Fällt auf eine existierende (und auch verwehbare) Schneeschicht der Höhe H_u und der Dichte $\rho_{S,u}$ eine neue Schneeschicht der Höhe H_o und Dichte ρ_o , so kann man diese wie eine einzelne Schicht mit der Dichte ρ_o und der Höhe $H_o + \delta H_u$ behandeln, wobei δ noch zu bestimmen ist. Dieser Faktor wandelt die ursprüngliche Höhe H_u in eine effektive Höhe

δH_u um, damit diese mit der Dichte ρ_o das selbe Verwehungspotential hat wie die ursprüngliche Schicht mit der Dichte ρ_u .

Zur Berechnung von δ wird davon ausgegangen, dass die Summe der Gewichtungsfaktoren f bei Änderung der Dichte und Anpassung der Schneehöhe nicht verändert wird:

$$f(\rho_{alt}) + f(H_{alt}) = f(\rho_{neu}) + f(H_{neu})$$

Konkret gilt hier:

$$f(\rho_u) + f(H_u) = f(\rho_o) + f(\delta H_u)$$

Während für die Dichte die obigen Gewichtungsfunktionen verwendet werden, wurde für die Schneehöhe eine einzelne invertierbare Funktion nachgebildet, die von obiger Parametrisierung nur unwesentlich abweicht:

$$f(H) = \arctan(H/20)$$

Damit würde man für δ folgende Formel erhalten:

$$f(\delta H_u) = f(\rho_u) + f(H_u) - f(\rho_o)$$

$$\delta H_u = 20 \tan(\max[0, f(\rho_u)] + \max[0, f(H_u)] - \max[0, f(\rho_o)])$$

Daraus kann der Multiplikationsfaktor δ berechnet werden:

$$\delta = 20/H_u \tan(\max[0, f(\rho_u)] + \max[0, f(H_u)] - \max[0, f(\rho_o)])$$

Sollte der neu gefallene Schnee eine größere Dichte haben als die bereits vorliegende alte Schneeschicht ($\rho_o > \rho_u$), so sollte man aufgrund der Kompression oder Durchnässung die Schneedichte der unteren Schicht vor der Höhenanpassung gleichsetzen ($\rho_u = \max[\rho_u, \rho_o]$).

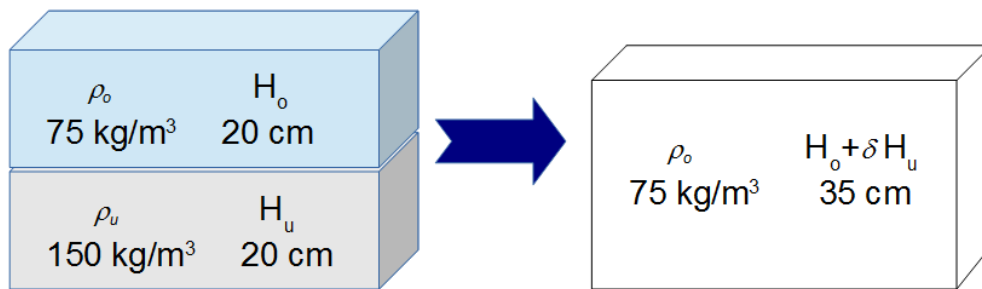


Abbildung 2: Kombination zweier Schneesichten - Höhenanpassung der unteren Schneesicht aufgrund der Kompression bzw. Durchnässung)

4.2.3. Schneemodell der obersten verwehbaren Schneesicht

Im Gegensatz zu dem in Punkt 3.1 vorgestellten Schneemodell müssen für die Bilanz der obersten verwehbaren Schneesicht einige Adaptionen vorgenommen werden.

- Falls 1h Neuschnee ($NSH > 0$)

$$SH_o(t) = NSH + \delta SH_o(t - \Delta t)$$

$$\rho_o(t) = \min [\rho_{max}, \rho_{NS}(t)]$$

- Ansonsten bleibt:

$$SH_o(t) = SH_o(t - \Delta t)$$

$$\rho_o(t) = \rho_o(t - \Delta t)$$

- Berechnung der Masse (pro m^2) vor dem Schmelzprozess:

$$M_o(t) = \rho_o(t) / 100 SH_o(t)$$

- Modifikation von Dichte und Höhe der obersten Schicht durch Setzung, wobei die Masse konstant bleibt:

$$\rho_o(t) = \rho_{max} - (\rho_{max} - \rho_o(t)) * \exp(-\Delta t / \tau)$$

$$SH_o(t) = 100 / \rho_o(t) M_o(t)$$

- Änderung von Masse, Dichte und Schneehöhe durch Schmelzung, falls $\Delta m > 0$

– Falls Dichte $\rho_o(t) < \rho_{max}$ (noch kein Massenverlust)

- Falls Dichte bereits maximal ($\rho_o(t) = \rho_{max}$) ist:

$$M_o(t) = \max [0, M_o(t) - \Delta m_s(t)]$$

$$SH_o(t) = 100 / \rho_{max} M_o(t)$$

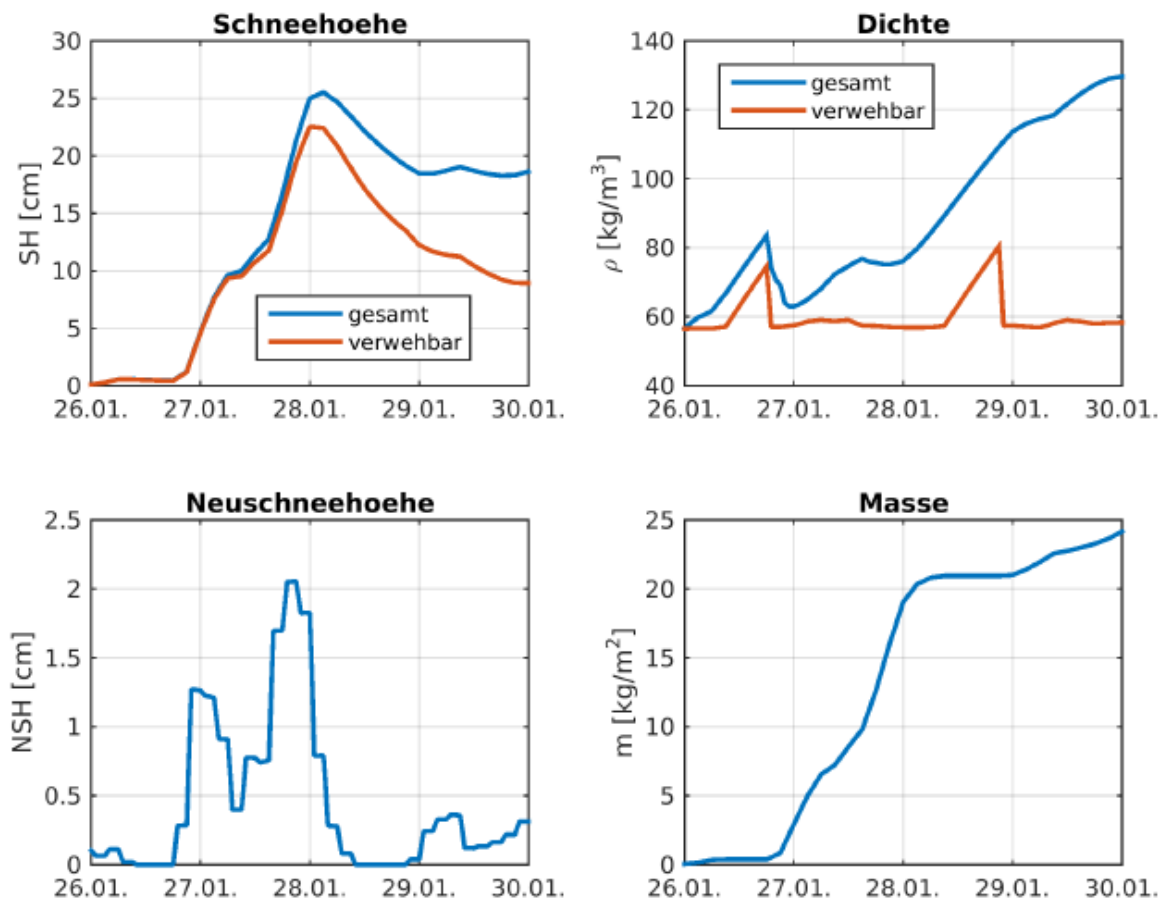


Abbildung 3: Schneemodell am Beispiel Brenner (26.1.2014 bis 30.1.2015)

4.2.4 Berechnung des Pseudoniederschlags

Damit die ÖBB die Schneeverwehung als Parameter für die Energieverbrauchsprognose verwenden können, muss sie in eine Art „Pseudoniederschlag“ umgerechnet werden, also in mm Schnee, der auf den Weichen zum Liegen kommt. Das hängt zum einen von der Schneedichte und damit von der von der Temperatur und zum anderen von der Menge an verwehbarem Schnee (siehe Punkte 3.2.2. bis 3.2.3) ab.

Um sicherzustellen, dass der Tangens sich in der definierten Bandbreite befindet, muss die folgende Funktion auf die Neuschneedichte angewendet werden

$$\rho_{NS} = \begin{cases} \rho_{NS} & \text{if } \geq 53 \text{ kgm}^{-3} \\ 53 \text{ kgm}^{-3} & \text{if } < 53 \text{ kgm}^{-3} \end{cases}$$

Mit der folgenden Formel wird die Temperatur des obersten Schneelayers ermittelt
(Invertierung der Formel für Schneehöhe bei gegebener Temperatur):

$$x_{NS} = \frac{100}{\rho_{NS}}$$

$$T_f = \frac{1}{0.51} \cdot \tan \left[-\frac{\pi}{2} \left(\frac{x_{NS} + 0.69}{1.33} - 1 \right) \right]$$

Als nächster Schritt wird die Wahrscheinlichkeit der Schneeverwehung als Funktion der Windgeschwindigkeit berechnet. Zuerst wird das Polynom, dass die arctan-Parameter anpasst definiert:

$$Q_1 = p_1 \cdot T_f^3 + p_2 \cdot T_f^2 + p_3 \cdot T_f + p_4$$

mit $p_1 = 0,00043452$

$p_2 = 0,025554$

$p_3 = 0,58985$

$p_4 = 13,565$

$$Q_2 = r_1 \cdot T_f^3 + r_2 \cdot T_f^2 + r_3 \cdot T_f + r_4$$

mit $r_1 = 0,0001369$

$r_2 = 0,0096607$

$r_3 = 0,22872$

$r_4 = 3,5192$

Die Wahrscheinlichkeit für Schneeverwehung p_d ist

$$p_{Tf} = \min \left(1, \max \left[0, 0.3 - 0.8 \cdot \arctan \left(\frac{T_f - 0.3}{0.15} \right) \cdot \frac{2}{\pi} \right] \right)$$

$$p_d = \min \left[1, \max \left(0, p_{Tf} \cdot \left[0.5 + 0.6 \cdot \arctan \left(\frac{U_{10} - Q_1}{Q_2} \right) \cdot \frac{2}{\pi} \right] \right) \right]$$

Der Term p_{Tf} stellt sicher, dass feuchter und schwerer Schnee auch bei sehr hohen Windgeschwindigkeiten nicht verweht werden kann (siehe Abbildung 5).

Das resultierende Wasseräquivalent RR_{SD} für die Schneeverwehung für eine Periode von 3 Stunden kann ausgedrückt werden als

$$RR_{SD} = p_d \cdot \frac{SH}{100} \rho_{NS}$$

Um das Wasseräquivalent für einen ganzen Tag RR_{SD24h} zu berechnen wird folgende Formel verwendet

$$RR_{SD24h} = \frac{\sum_{n=1}^8 RR_{SDn}}{8}$$

Tabelle 1: Variablen für die Berechnung der Schneeverwehung

| Variable | Bedeutung | Einheit |
|--------------|---|-------------------|
| x_{NS} | Ratio Schneehöhe zu Wasseräquivalent | cm/mm |
| p_d | Wahrscheinlichkeit für Schneedrift | [0-1] |
| ρ_{NS} | Schneedichte für 3 h | kgm ⁻³ |
| U_{10} | Mittlere Windgeschwindigkeit in 10m Höhe über 3 h | ms ⁻¹ |
| T_f | Feuchttemperatur | °C |
| SH | Schneehöhe des verwehbaren Schnees in 3 h | cm |
| RR_{SD} | Wasseräquivalent in 3 h | kgm ⁻² |
| RR_{SD24h} | Wasseräquivalent in 24 h | kgm ⁻² |

Bei der Berechnung der Schneeverwehung, wird davon ausgegangen, dass maximal die anfangs vorhandene Schneehöhe verweht werden kann.

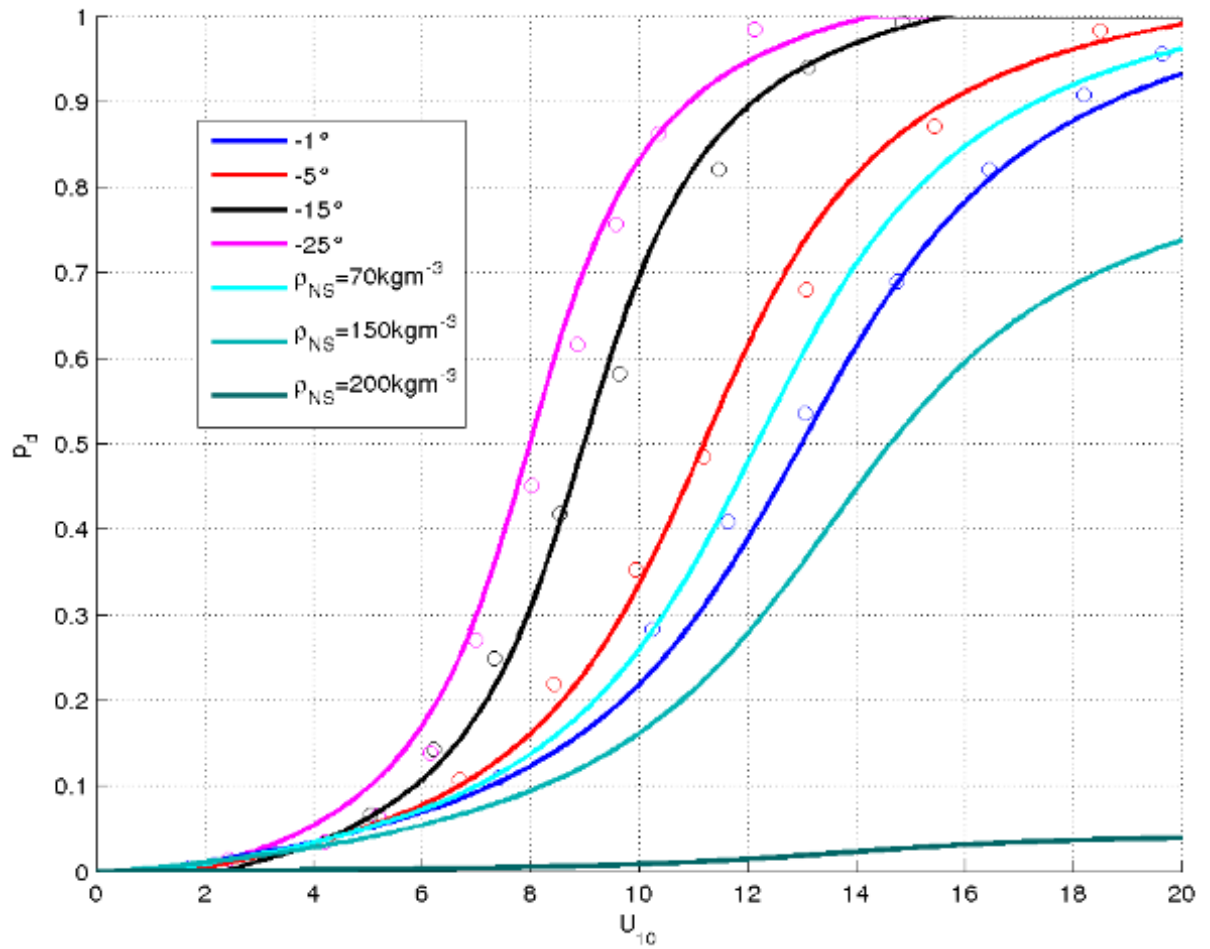


Abbildung 4: Wahrscheinlichkeit für Schneeverwehung als Funktion der Windgeschwindigkeit U_{10} für verschiedene Schneedichten und damit zusammenhängender Feuchttemperaturen.

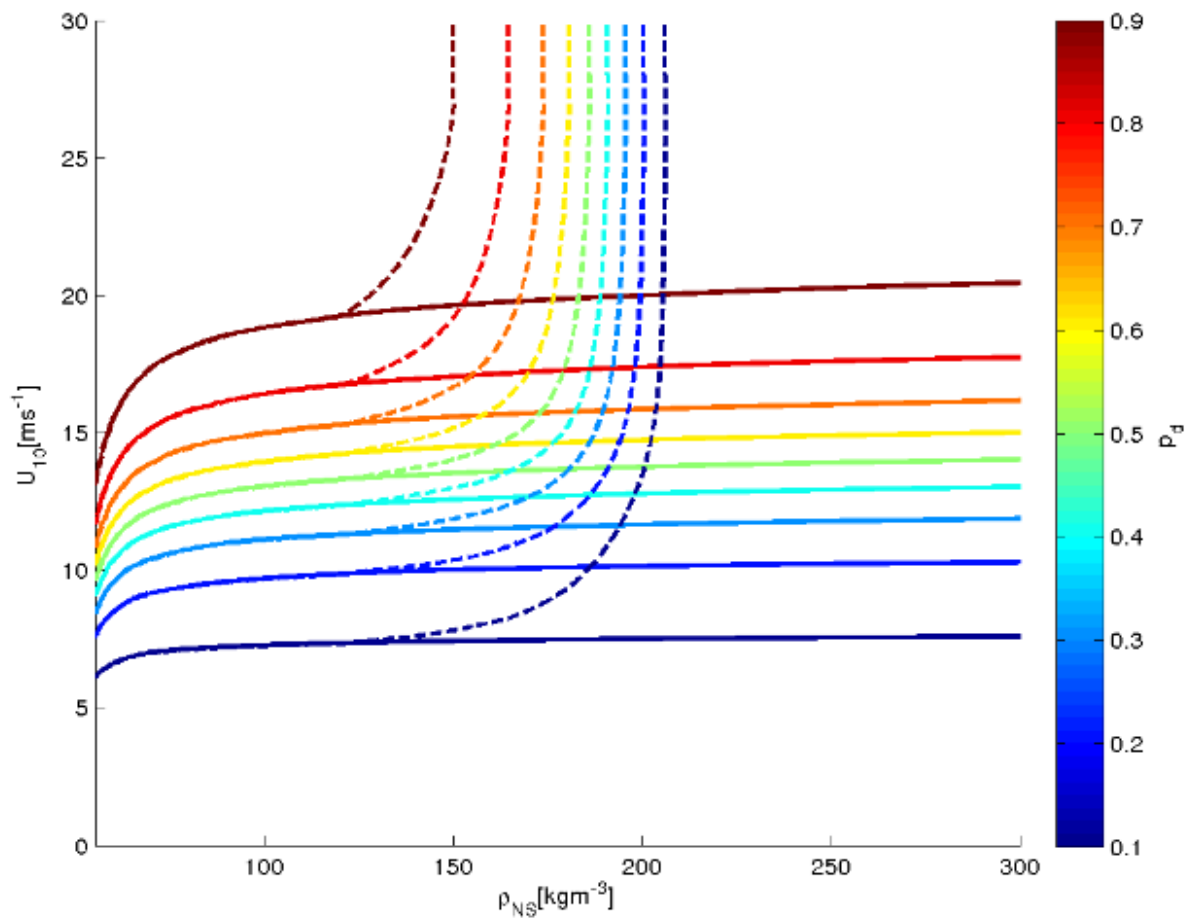


Abbildung 5: Die gestrichelte Linie zeigt die (finale) Schneeverwehungswahrscheinlichkeit mit Feuchttemperatur-Korrekturfaktor, die durchgezogene Linie zeigt die (unmodifizierte) Wahrscheinlichkeit ohne Korrekturfaktor.

Interpretation des Schneeverwehungs-Pseudoniederschlags:

Beim Pseudoniederschlag handelt es sich um eine Niederschlagsangabe in mm, die dem Wasseräquivalent der verwehten Schneemenge entspricht. Man könnte sich dabei eine homogene Schneefläche vorstellen, bei der unter Gleichgewichtsbedingungen gleich viel Schnee angeweht wie weggeweht wird und sich die Schneehöhe daher nicht ändert. Tritt nun eine schneefreie Fläche (Beispiel Bahnweichenanlage) auf, so kommt es unter Schneeverwehungsverhältnissen zu einem Pseudoniederschlag der maximal dem Wasseräquivalent der Schneehöhe in der Umgebung entsprechen kann.

Der Schneeverwehungs-Pseudoniederschlag wird zweimal täglich als Summe über drei Stunden in mm an die ÖBB geliefert.

4.3 Zusammenhänge zwischen Wetterparametern und Stromverbrauch

Ziel des Projekts war es, die Vorhersage des aufsummierten Energieverbrauchs aller Weichenheizungsanlagen der ÖBB mittels Wetterparametern zu verbessern. Es hat sich herausgestellt, dass die direkte Verwendung von fundamentalen Variablen wie Temperatur, Wind oder Schneefall als Prädiktoren in linearen Regressionsmodellen nicht optimal ist, da der Zusammenhang zwischen diesen Variablen und dem Energieverbrauch keinen linearen Verlauf aufweist. Daher stellte sich die zum Werkvertrag zusätzliche Aufgabe, von Wettervariablen abgeleitete Parameter zu finden, die stärkere Korrelationen mit den gemessenen Energieverbrauchswerten liefern. Regressionsmodelle mit abgeleiteten Prädiktoren sollten dann eine genauere Vorhersage des zu erwartenden Energieverbrauchs ermöglichen.

4.3.1 Vorgangsweise

Für die Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Wetterparametern und Energieverbrauch und die Ableitung von Regressionsmodellen stellten die ÖBB UBIMET folgende Verbrauchsdaten für den Zeitraum September 2011 bis August 2014 zur Verfügung:

- Gesamtenergieverbrauch der ÖBB
- Energieverbrauch aller Weichenheizungsanlagen
- Energieverbrauch einzelner Weichenheizungsanlagen

Zunächst wurden in einem Screeningverfahren unterschiedliche Transformationsfunktionen auf **Observationsdaten von Wetterstationen** angewandt und die Korrelationskoeffizienten der transformierten Variablen mit den von den ÖBB gelieferten Verbrauchswerten berechnet. In einem zweiten Schritt wurden dann lineare Regressionsmodelle mit unterschiedlichen Kombinationen der vielversprechendsten Variablen als Prädiktoren mittels Kreuzvalidierung verglichen. Dabei konnten Modelle gefunden werden, die deutlich geringere Vorhersagefehler aufweisen, als jene, die nur untransformierte Observationsdaten als Prädiktoren verwenden.

Im operationellen Einsatz können jedoch keine Observationsdaten zur Vorhersage des Energieverbrauchs verwendet werden, da diese zum Vorhersagezeitpunkt noch nicht zur Verfügung stehen. Daher wurden die oben beschriebenen Versuche mit historischen **Vorhersagedaten aus Wettermodellen** wiederholt. Die Vorhersagedaten wurden jeweils aus Modellläufen extrahiert, die 12 bis 36 Stunden vor dem zu prognostizierenden

Zeitpunkt initialisiert wurden. Dabei hat sich herausgestellt, dass Regressionsmodelle, die mit Daten aus Wettermodellen arbeiten, ähnlich gute Ergebnisse wie mit Observationsdaten betriebene Regressionsmodelle liefern können.

In den oben beschriebenen Versuchen wurden jeweils die aufsummierten Energieverbrauchswerte aller Weichenheizungen mit **über viele Orte gemittelten Wetterparametern** in Zusammenhang gebracht. Die Energieverbrauchswerte werden zum Teil einzeln für Stationen (Bahnhöfe), also in hoher räumlicher Auflösung, gemessen. Daher sollte noch getestet werden, ob bei einer Vorhersage des Energieverbrauchs auf Stationsebene, bei der die Aggregation nicht schon durch Mittelung der Wetterparameter, sondern erst nach dem Regressionsschritt erfolgt, noch weitere Verbesserungen erwartet werden können. Dabei zeigte sich allerdings, dass die Korrelationen zwischen Energieverbrauch und Wetterparametern auf Stationsebene weniger ausgeprägt erscheinen und eine Verbesserung der Vorhersagen durch diesen Ansatz, wenn überhaupt, wohl nicht auf einfache Weise möglich ist.

4.3.2 Transformation der Wetterparameter

Die getesteten Transformationsfunktionen wurden basierend auf Hinweisen von Seiten der ÖBB sowie physikalisch-meteorologischer Intuition ausgewählt. Das Ziel dabei war jeweils Parameter zu wählen, mit denen der Energieverbrauch möglichst linear steigt oder fällt:

Temperatur

Es ist davon auszugehen, dass der aufsummierte Energieverbrauch aller Weichenheizungsanlagen mit fallender Temperatur steigt. Ob dieser Zusammenhang annähernd linear ist oder beispielsweise besser durch eine Potenzfunktion beschrieben werden kann ist aber nicht sofort klar. Außerdem sollte ein oberer Temperaturgrenzwert, ab dem überhaupt keine Energie mehr verbraucht wird, und ein unterer Grenzwert, unterhalb dem der Energieverbrauch nicht weiter zunimmt, existieren, und somit alle Werte außerhalb dieser Grenzwerte für ein Vorhersagemodell äquivalent sind. Abbildung 66 zeigt einen Scatterplot des Zusammenhangs des Energieverbrauchs aller Weichenheizungsanlagen und der gemittelten Temperatur im Untersuchungszeitraum. Es zeigt sich deutlich, dass der Energieverbrauch oberhalb von 5°C deutlich abnimmt und für den Energieverbrauch irrelevant ist. Unterhalb dieser Grenztemperatur ist der Zusammenhang aber nicht mehr linear.

Wir haben daher die gemittelten Temperaturwerte T durch Funktionen

$$f(T, T_{\text{thresh}}, a) = \begin{cases} (T - T_{\text{thresh}})^a, & \text{falls } T < T_{\text{thresh}} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

transformiert, wobei für den Exponenten a Werte zwischen 1 und 5°C sowie für die Grenztemperatur T_{thresh} Werte zwischen -3 und 10°C getestet wurden.

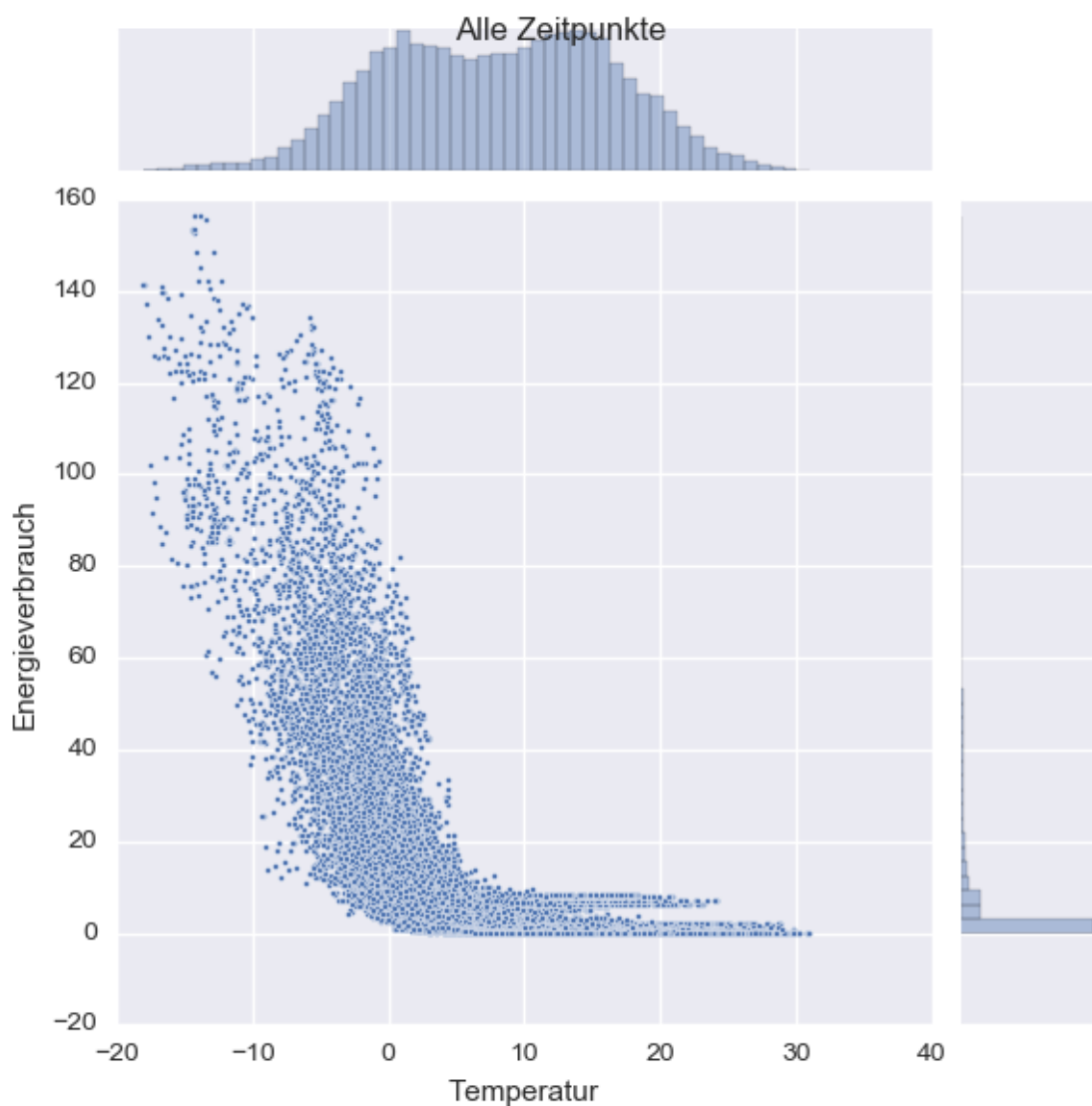


Abbildung 6: Zusammenhang zwischen gemittelter Temperatur und Energieverbrauch aller Weichenheizungsanlagen

Niederschlag

Es wird angenommen dass der Energieverbrauch bei Schneefall steigt. Niederschlag ist aber nur unterhalb einer Grenztemperatur, bei der er als Schnee fällt, relevant. Allerdings ist auch hier zu erwarten, dass ein einfacher linearer Zusammenhang nicht zu optimalen Ergebnissen führt, da einerseits zeitliche Verzögerungseffekte (der Energieverbrauch wird bei Aussetzen des Niederschlags nicht sofort fallen) und andererseits Sättigungseffekte eine Rolle spielen können. Daher haben wir versucht, den Niederschlagseinfluss über ein sehr simples Schneemodell (da das verbesserte Schneemodell für den Untersuchungszeitpunkt noch nicht zur Verfügung stand) zu quantifizieren. Dabei werden für jeden Ort zwei binäre Werte errechnet, die repräsentieren, ob im Moment **Schnee fällt** beziehungsweise **liegt**. Der **Schneefallwert** wird auf Eins gesetzt, sobald die Niederschlagsrate einen Mindestwert überschreitet und dabei die Temperatur unter einem Grenzwert liegt. Danach wird der Wert erst wieder auf Null gesetzt, wenn die Temperatur einen Grenzwert überschreitet, bei dem kein Schnee liegen bleibt (**Schneebedeckung**). Diese beiden Werte werden für jeden Zeitpunkt über alle Orte gemittelt und als Prädiktor verwendet.



Abbildung 7: Scatterplot des Energieverbrauchs aller Weichenheizungsanlagen vs. über alle betrachteten Orte gemittelten binären Schneefallparameter (Schneefall ja = 1, Schneefall nein = 0)

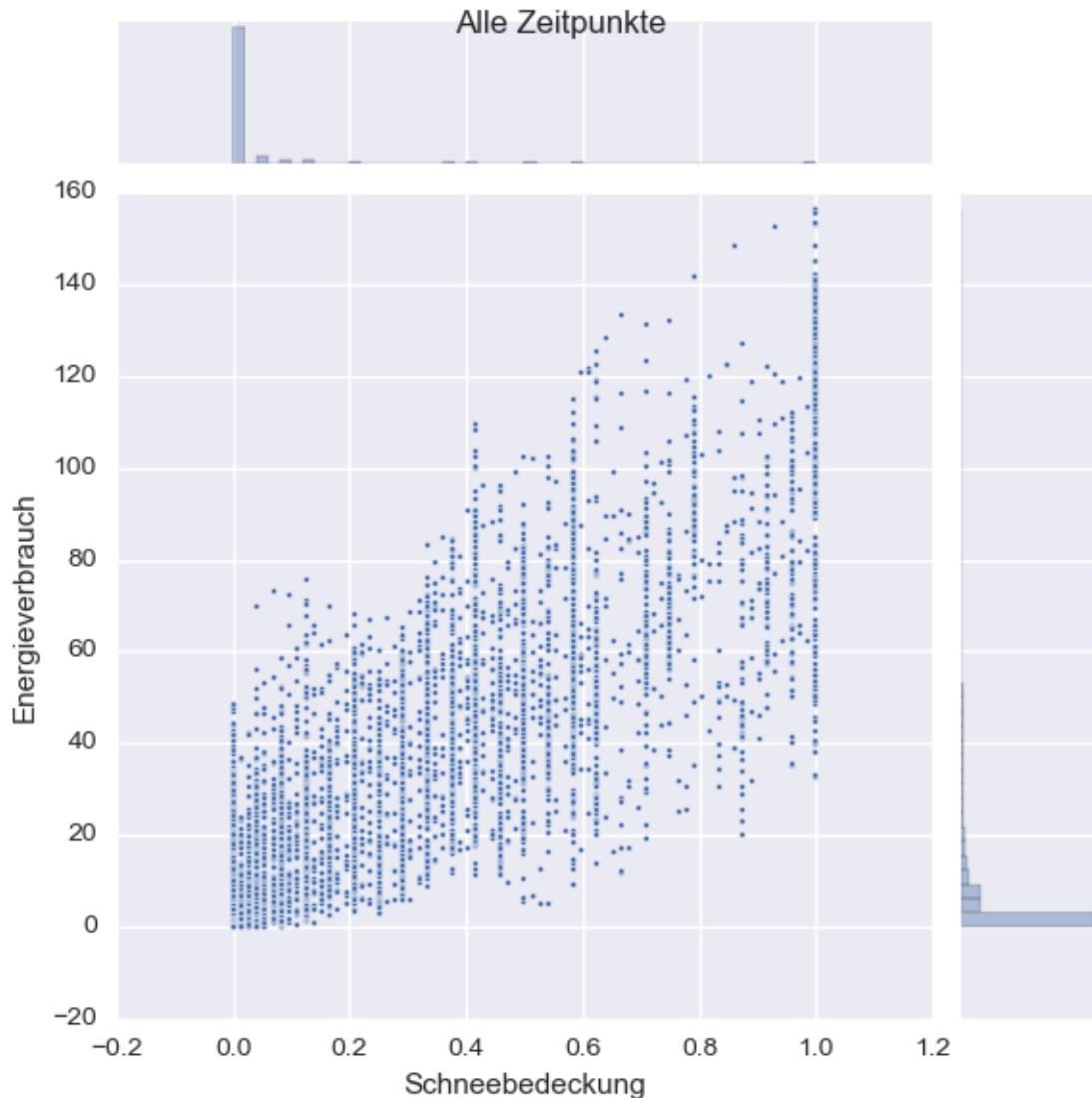


Abbildung 8: Scatterplot des Energieverbrauchs aller Weichenheizungsanlagen vs. über alle betrachteten Orte gemittelten binären Schneebedeckungsparameter (Schneebedeckung ja = 1, Schneebedeckung nein = 0)

Schneehöhe

Ergänzend zum oben beschriebenen Parameter kann auch die gemessene beziehungsweise vom Modell vorhergesagte Schneehöhe als zusätzlicher Prädiktor verwendet werden. Bei Wetterstationen steht dieser Parameter allerdings nicht immer zur Verfügung, außerdem sollten nur Stationen verwendet werden, die auf Seehöhen liegen, die nicht zu stark vom Streckenverlauf abweichen. Bei Vorhersagemodellen sind Schneehöhedaten zwar immer flächendeckend vorhanden, es ist aber zusätzlich darauf zu achten, hier nur Orte zu verwenden, an denen die Modellorographie gut mit der

tatsächlichen Orographie übereinstimmt. In Gebirgstälern ist das oft nicht der Fall und kann zu unrealistisch hohen Werten bei der Schneehöhe führen.

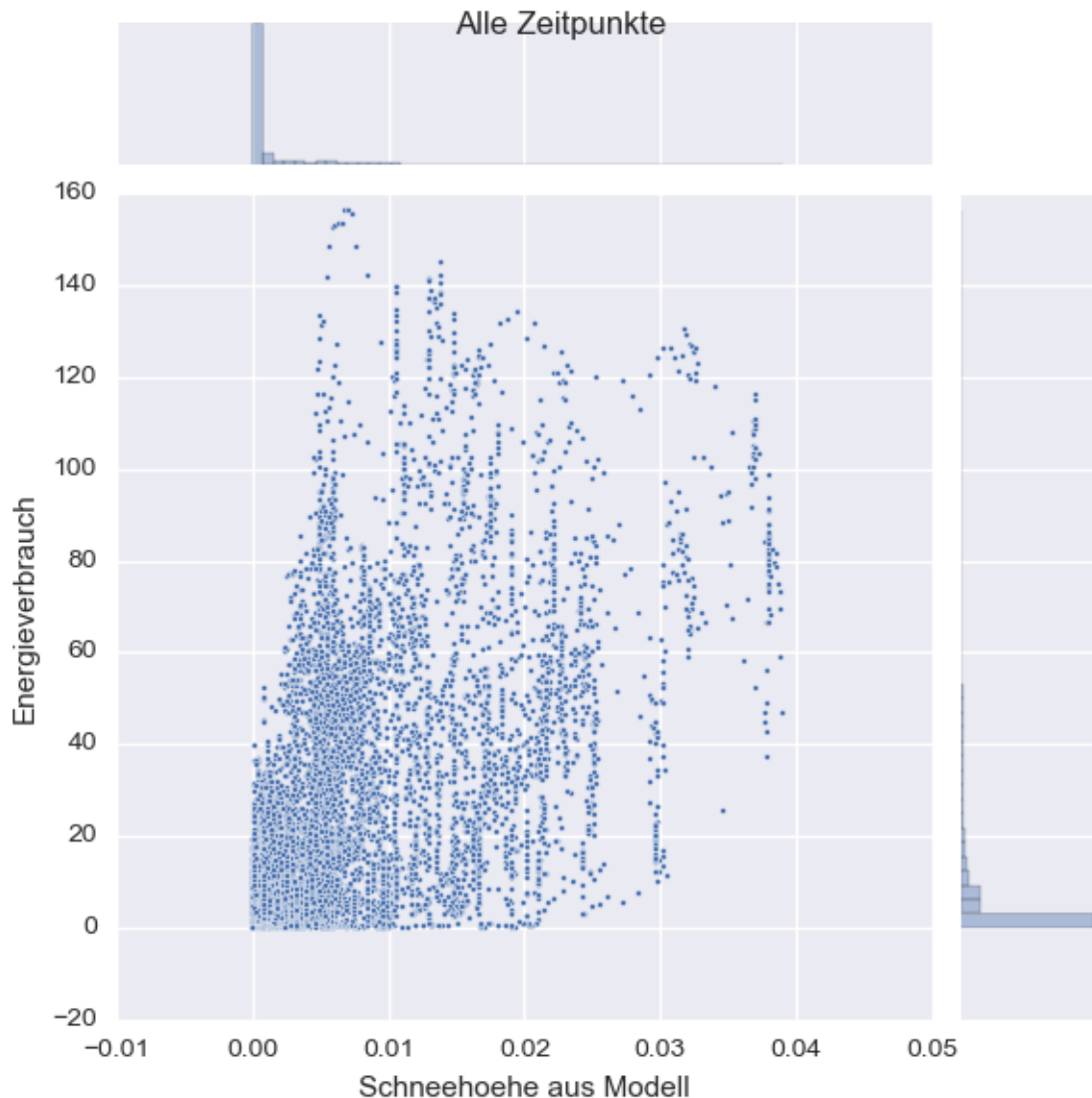


Abbildung 9: Zusammenhang zwischen Schneehöhe aus dem Modell und Energieverbrauch der Weichenheizungsanlagen

Weitere, nicht vom Wetter abhängige Parameter

Tageszeit

Da zu erwarten ist, dass der Energieverbrauch nicht nur aufgrund des Temperatur-Tagesgangs von der Tageszeit abhängt, sondern auch aufgrund des für die jeweilige Tageszeit charakteristischen Verkehrsaufkommens, könnte über eine periodische Funktion der Tageszeit zusätzliche Information in ein Regressionsmodell eingebracht

werden. Wir betrachten zunächst den gemittelten Tagesgang der Energieverbrauchsdaten (dafür mitteln wir die Verbrauchsdaten separat für jede Tageszeit über alle Tage des von den ÖBB übermittelten Datensatzes). Im Vergleich mit dem Verlauf des (invertierten) Temperaturtagesgangs zeigt sich, dass die Minima und Maxima des Verbrauchstagesgangs lediglich etwas verschoben sind und der Verbrauch in der Nacht im Mittel langsamer ansteigt als die Temperatur abfällt (vgl. Abbildung 10).

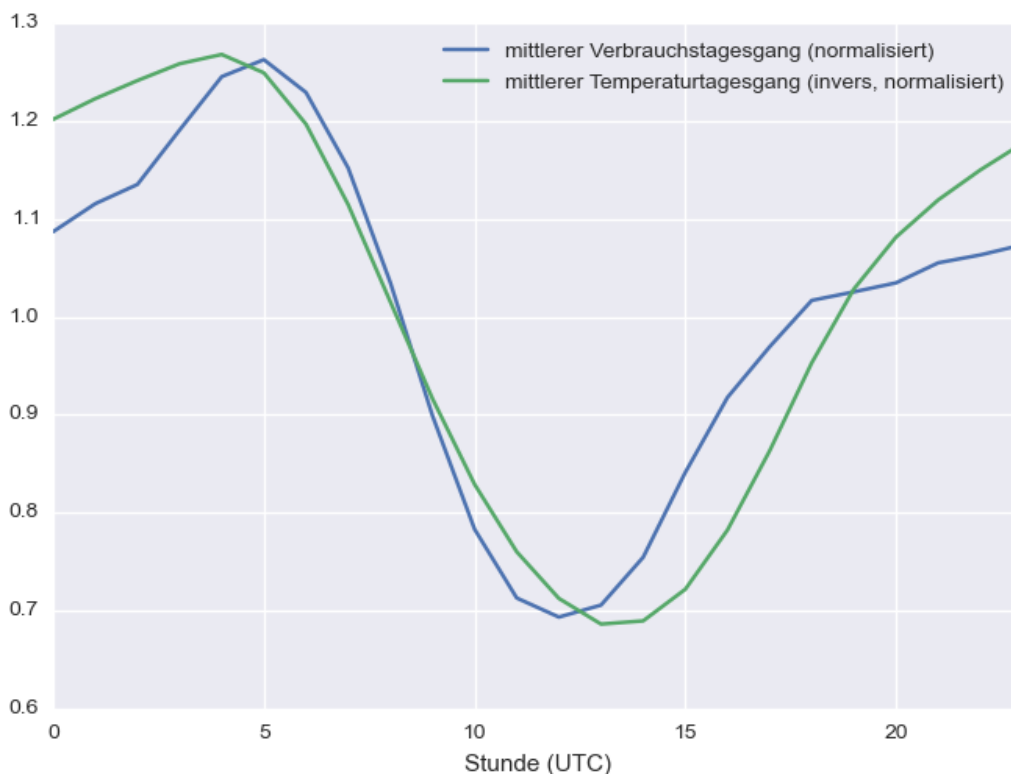


Abbildung 10: Vergleich des mittleren Tagesganges des Energieverbrauchs mit dem invertierten Tagesgang der Temperatur

Da diese Abweichungen - die als Zusatzinformation ins Regressionsmodell eingebracht werden soll - nicht auf einfache Weise als Funktion der Zeit dargestellt werden können, verwenden wir den gemittelten Verbrauchstagesgang selbst als Prädiktor. Falls zu erwarten ist, dass der mittlere Verbrauchstagesgang in Zukunft stark vom Mittelwert aus den übermittelten Daten abweicht, müsste dieser Prädiktor natürlich neu berechnet werden. Außerdem ist noch zu beachten, dass in Perioden, in denen nicht geheizt wird, der Verbrauch natürlich den ganzen Tag über Null ist. Daher multiplizieren wir den

Tagesgangs-Prädiktor noch mit einer Funktion, die Null wird, wenn für den ganzen Tag Energieverbrauch sehr unwahrscheinlich ist.

Tages- und Nachtlänge

Die Tages- bzw. Nachtlänge stellt einen sehr langsam variierenden Prädiktor dar, der Information über den erwarteten mittleren Jahresverlauf des Energieverbrauchs in ein Regressionsmodell einbringen kann. Bei Mittelung der Verbrauchsdaten über alle Messwerte eines jeden Monats zeigt sich, dass die dritte Potenz der Nachtlänge, verschoben um 45 Tage, relativ gut mit dem gemittelten Verbrauch korreliert (vgl. Abbildung 11).

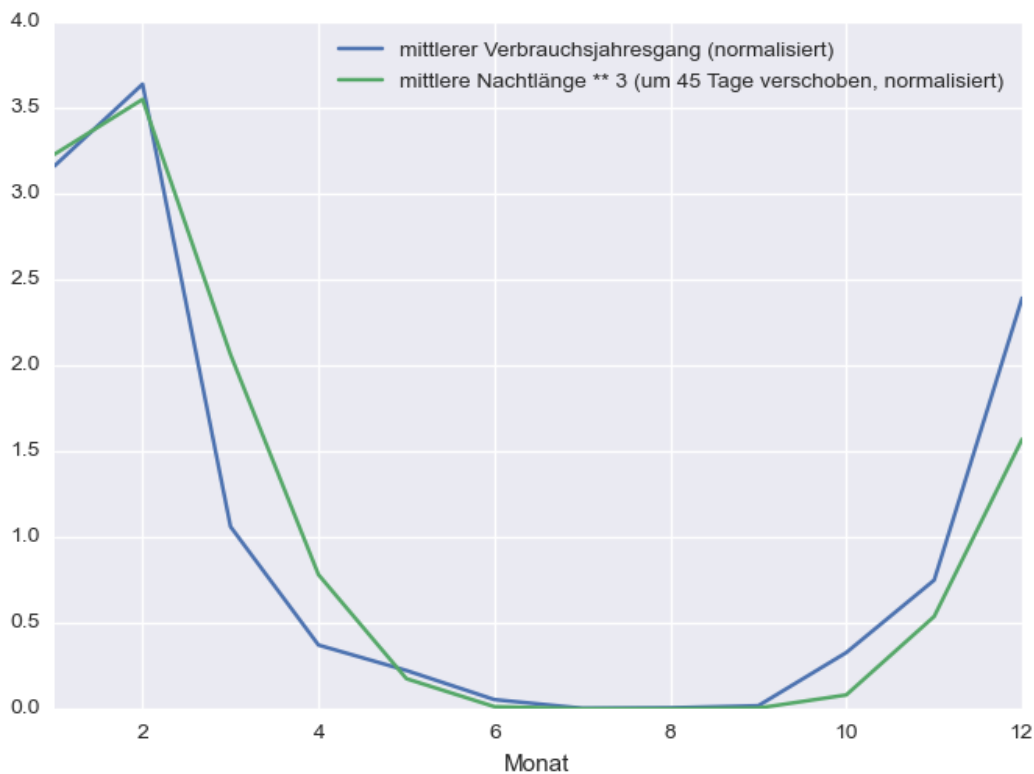


Abbildung 11: Übereinstimmung des mittleren Tagesganges des Energieverbrauchs mit der mittleren Nachtlänge

Anmerkung: Periodizitätsinformationen dieser Art können auch innerhalb eines ARIMA-Modells ausgenutzt werden, was aber nicht Gegenstand dieser Untersuchung war.

4.3.3 Auswahl passender Orte

Bei der Auswahl der Orte, über die die Wetterparameter gemittelt werden, ist das Streckennetz zu berücksichtigen, das heißt die Dichte der gewählten Orte sollte in etwa dem Netz folgen. Es muss aber auch darauf geachtet werden, Orte zu wählen, deren klimatische Verhältnisse repräsentativ sind (zum Beispiel sollte die überwiegende Zahl dieser Orte im Flach- und Hügelland liegen, Orte im Hochgebirge werden sich eher negativ auf die Energieverbrauchsvorhersagen auswirken). Wir haben unsere Tests mit drei Gruppen von jeweils etwa 20 Orten innerhalb Österreichs durchgeführt. Dabei haben wir festgestellt, dass, wenn oben genannte Kriterien erfüllt sind, die Vorhersagen für die unterschiedlichen Gruppen recht ähnliche Qualität aufweisen. Deshalb beschränken wir uns im Folgenden darauf, Ergebnisse, die mit folgender Gruppe (in Abbildung 12 und Tabelle 2) berechnet wurden, zu präsentieren:

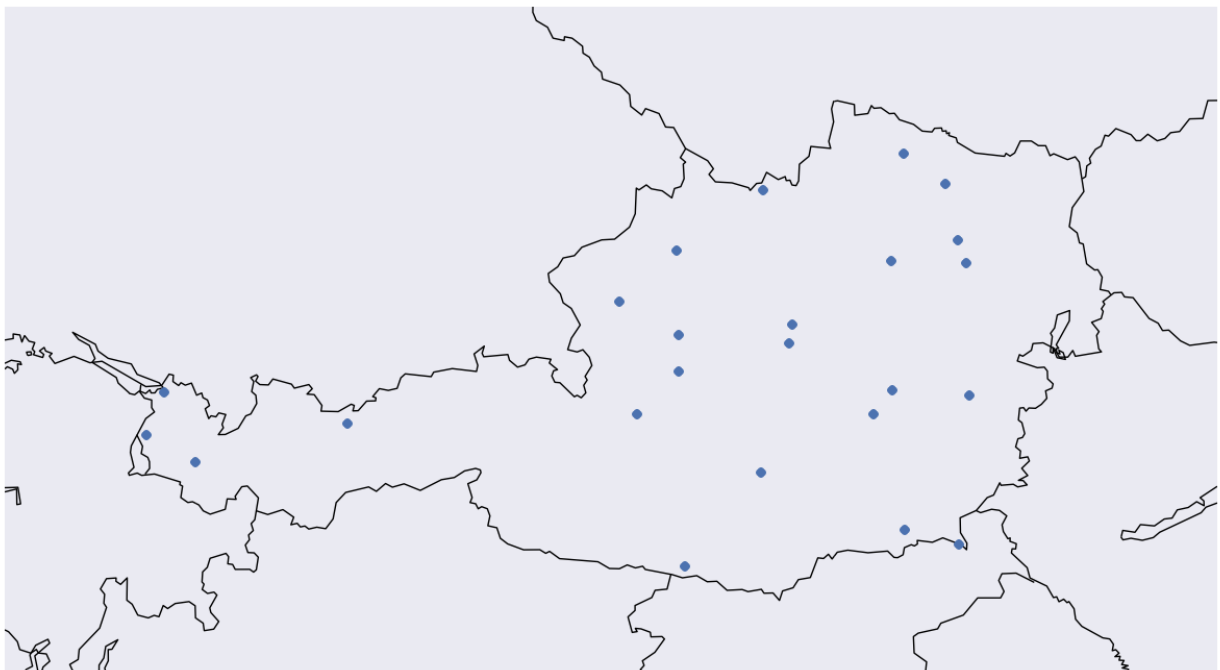


Abbildung 12: ausgewählte ÖBB-Wetterstationen

Tabelle 2: ausgewählte ÖBB-Stationen

| Stationsname | Seehöhe | Schneehöhe aus Modell verwendet |
|-----------------|---------|---------------------------------|
| Bad Aussee | 665 | nein |
| Bad Radkersburg | 208 | ja |
| Bregenz | 424 | ja |
| Dalaas (Bhf) | 930 | nein |
| Ebensee ÖBB | 426 | nein |
| Feldkirch | 440 | nein |

| | | |
|------------------------|------|------|
| Irnfritz ÖBB | 544 | ja |
| Kindberg ÖBB | 569 | ja |
| Leibnitz-Wagna | 267 | ja |
| Limberg ÖBB | 288 | ja |
| Loosdorf | 245 | ja |
| Neumarkt | 870 | nein |
| Obertrattnach ÖBB | 365 | ja |
| Pernegg an der Mur | 420 | ja |
| Radstadt | 858 | nein |
| Rekawinkel | 374 | ja |
| Schönau an der Enns | 407 | nein |
| Seefeld | 1182 | nein |
| Straßwalchen-Ederbauer | 592 | ja |
| Summerau ÖBB | 656 | ja |
| Tauchen-Schauregg ÖBB | 650 | ja |
| Tullnerfeld ÖBB | 185 | ja |
| Villach Süd -Fürnitz | 503 | ja |
| Weyer | 421 | ja |

4.3.4 Vorhersage des gesamten (aufsummierten) Energieverbrauchs der Weichenheizungsanlagen

Anmerkung: alle im Folgenden beschriebenen Tests wurden mit Daten in einstündiger Auflösung durchgeführt. Alle Zeitangaben in den von den ÖBB zur Verfügung gestellten Daten wurden von Lokalzeit auf UTC konvertiert.

Korrelationskoeffizienten

Im Folgenden werden die Absolutbeträge von berechneten Korrelationskoeffizienten des gemessenen Energieverbrauchs jeweils mit untransformierten und transformierten Wetterparametern sowie mit den Zusatzparametern präsentiert. **Es zeigt sich, dass die Anwendung von Transformationsfunktionen sowohl für Temperatur als auch für Niederschlag zu einer starken Steigerung der Korrelation führt.** Die Zusatzparameter weisen (wie erwartet) deutlich geringere Korrelationen mit dem Energieverbrauch auf als die Wetterparameter, könnten aber durchaus Komplementärinformationen in ein Regressionsmodell einbringen. Diese Beobachtungen gelten gleichermaßen für Wettermessdaten wie für Wettervorhersagedaten. Daher beschränken wir uns im Folgenden auf Ergebnisse, die unter Verwendung von Wettervorhersagedaten berechnet wurden.

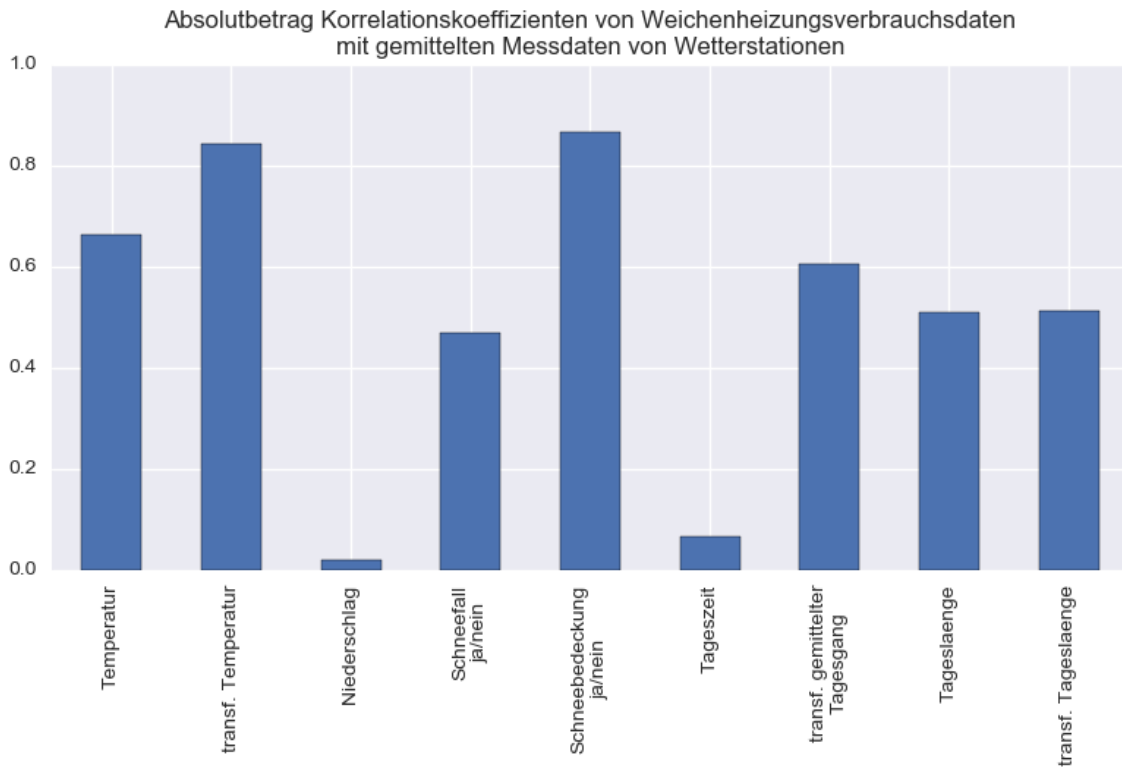


Abbildung 13: Korrelationskoeffizienten von Weichenheizungsverbrauchsdaten mit gemittelten Messdaten von Wetterstationen

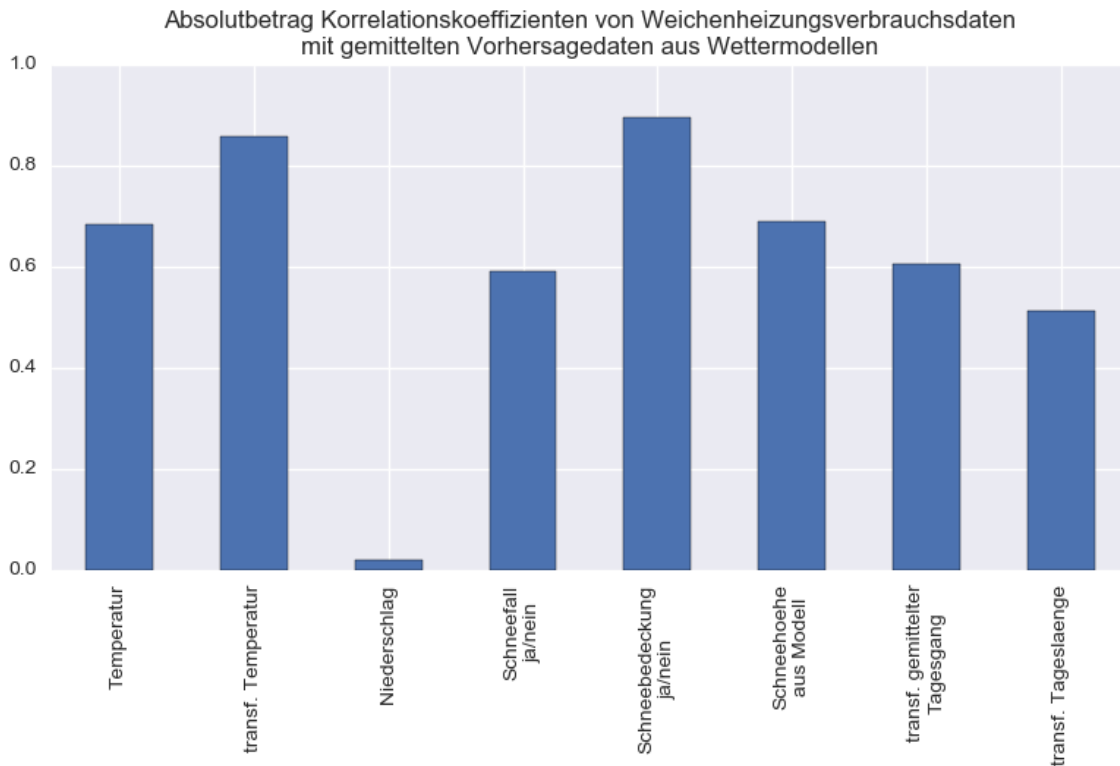


Abbildung 14: Korrelationskoeffizienten von Weichenheizungsverbrauchsdaten mit gemittelten Vorhersagedaten aus Wettermodellen

Regressionsmodell

Beim Training eines Regressionsmodells ist es essenziell, aus allen zur Verfügung stehenden Prädiktoren ein möglichst gutes Subset auszuwählen, mittels dessen möglichst alle zum Prognosezeitpunkt bekannten Informationen ins Regressionsmodell einfließen können. Wenn jedoch zu viele Prädiktoren, die untereinander ebenfalls Korrelationen aufweisen, gewählt werden, kann dies zu "Overfitting" und damit zu einer deutlichen Verschlechterung der Prognosequalität führen.

Wir haben mittels **Kreuzvalidierung** eine Vielzahl der möglichen Prädiktor-Sets getestet. Dabei werden Regressionsmodelle mit einem Teil der historischen Daten trainiert und mit den restlichen historischen Daten getestet, um mögliches Overfitting zu detektieren. Wir haben hier zur Evaluierung lediglich historische Daten aus den Monaten Jänner-April und Oktober-Dezember verwendet, da in den restlichen Monaten kaum Energie für die Weichenheizung verbraucht wurde. Die einzelnen Tage wurden alternierend dem

Trainings- bzw. Testzeitraum zugewiesen. Die geringsten Prognosefehler erreichten wir dabei mit einem Prädiktorset, in dem alle oben beschriebenen Parameter vorkommen:

1. Schneebedeckung ja/nein
2. Schneefall ja/nein
3. transformierte Temperatur ($T_{\text{thresh}} = 5$, $a = 4$)
4. Schneehöhe
5. transformierter gemittelter Tagesgang
6. transformierte Tageslänge

Die Auswertung in **Tabelle 3** und Abbildung 15 zeigt, dass jeder zusätzliche Prädiktor in diesem Set die Prognosequalität (leicht) verbessert. Trotz der besseren Korrelation des um 45 Tage verschobenen Tageslängenparameters führt im Regressionsmodell die Verwendung des Parameters ohne Verschiebung zum geringsten mittleren Vorhersagefehler. Overfitting scheint kaum eine Rolle zu spielen, da die Prognosefehler in den Testdaten nur geringfügig höher als die Fehler in den Trainingsdaten sind.

Tabelle 3: Fehlermaße der verschiedenen Prädiktorsets

| Prädiktorset | Bias Trainingsdaten | Bias Testdaten | RMSE Trainingsdaten | RMSE Testdaten |
|------------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|
| 1 | 0.0 | -0.39 | 12.39 | 12.92 |
| 1, 2 | 0.0 | -0.46 | 12.10 | 12.38 |
| 1, 2, 3 | 0.0 | -0.44 | 10.47 | 10.98 |
| 1, 2, 3, 4 | 0.0 | -0.37 | 9.88 | 10.20 |
| 1, 2, 3, 4, 5 | 0.0 | -0.32 | 9.49 | 9.78 |
| 1, 2, 3, 4, 5, 6 | 0.0 | -0.30 | 9.29 | 9.59 |

Bias ist der Mittelwert der Fehler aller Prognosen, RMSE ist die Wurzel aus dem Mittelwert der quadrierten Fehler aller Prognosen. Alle Fehlermaße sind in Einheiten des (stündlichen) Energieverbrauchs angegeben.

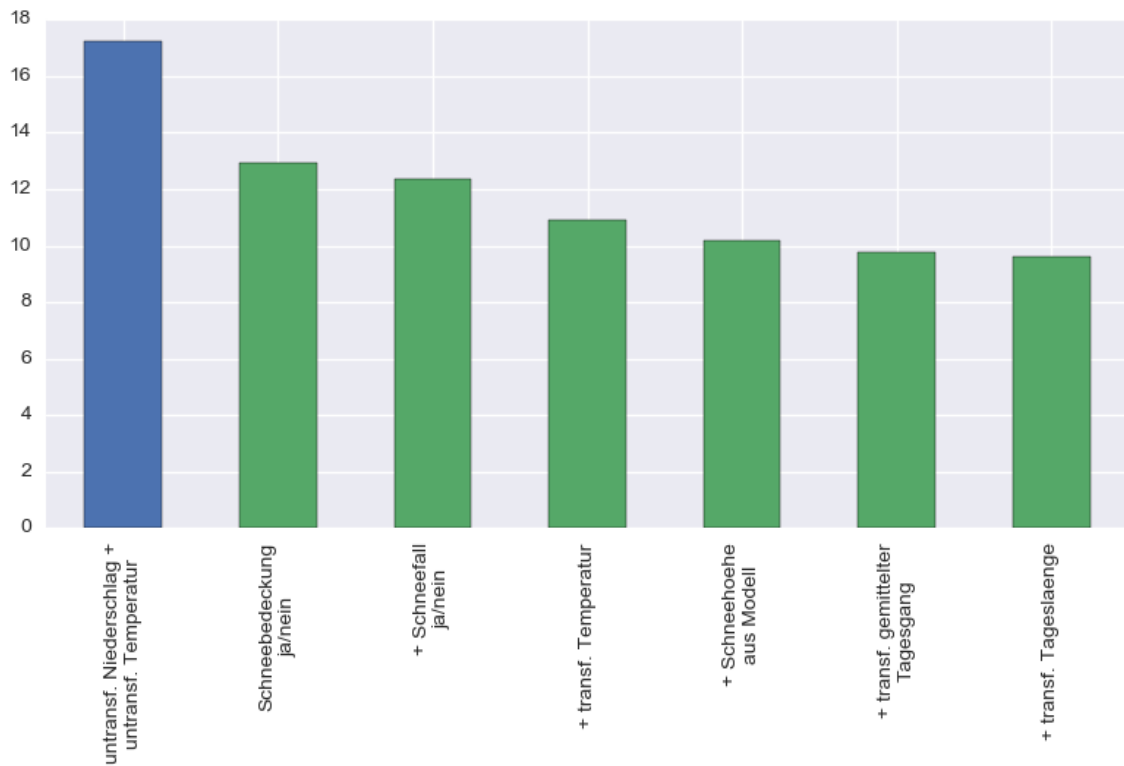


Abbildung 15: Abnahme des RMSE durch Hinzunahme weiterer Parameter

Die Abbildung 16 bis Abbildung 19 zeigen Zeitserien des gemessenen Energieverbrauchs im Vergleich mit Vorhersagen des Regressionsmodells mit allen sechs Prädiktoren für einige typische Zeiträume.



Abbildung 16: Vergleich des gemessenen Energieverbrauchs (rot) mit der Vorhersage des Regressionsmodells mit allen sechs Prädiktoren (blau) , oben im Dezember 2012, unten im Januar 2013

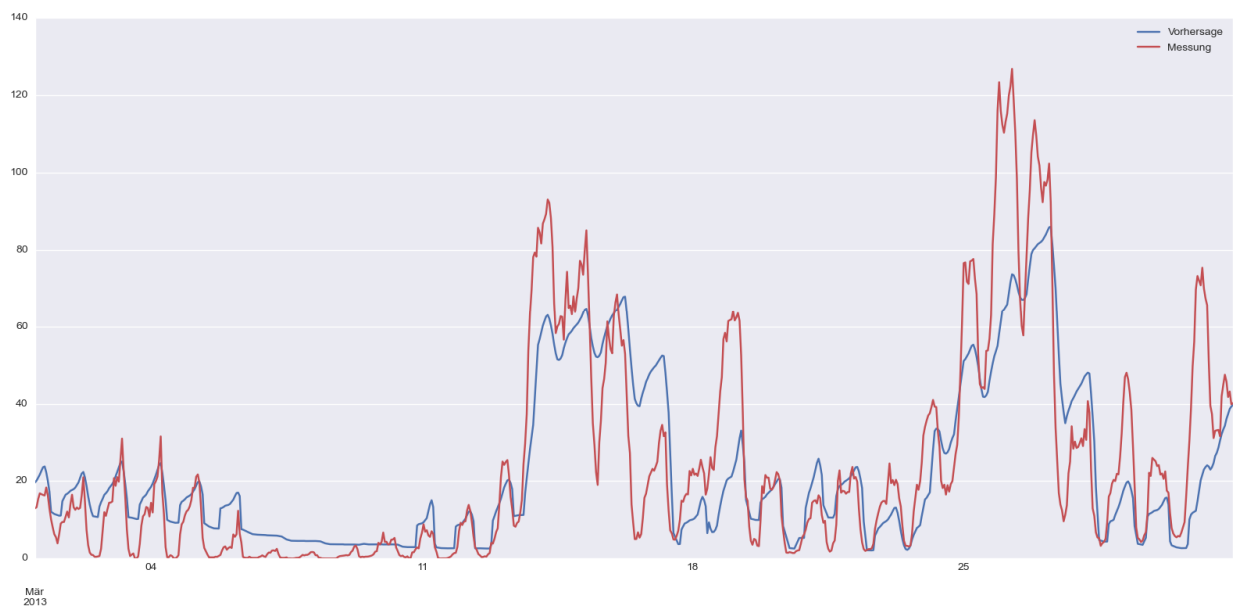
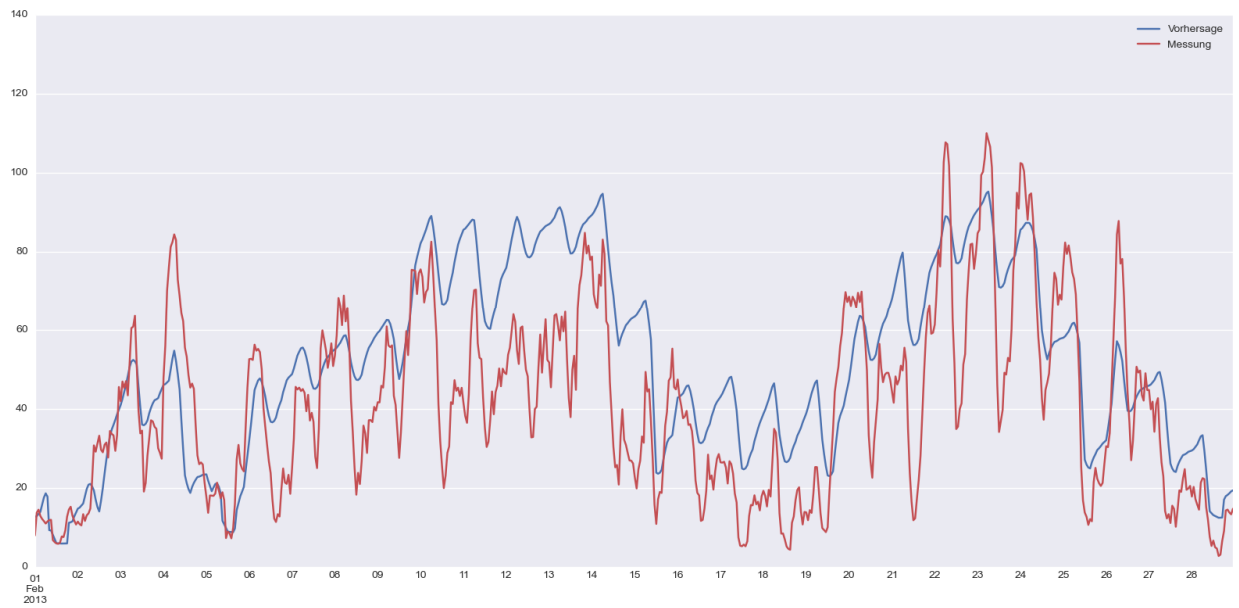


Abbildung 17: Vergleich des gemessenen Energieverbrauchs (rot) mit der Vorhersage des Regressionsmodells mit allen sechs Prädiktoren (blau), oben im Februar 2013, unten im März 2013

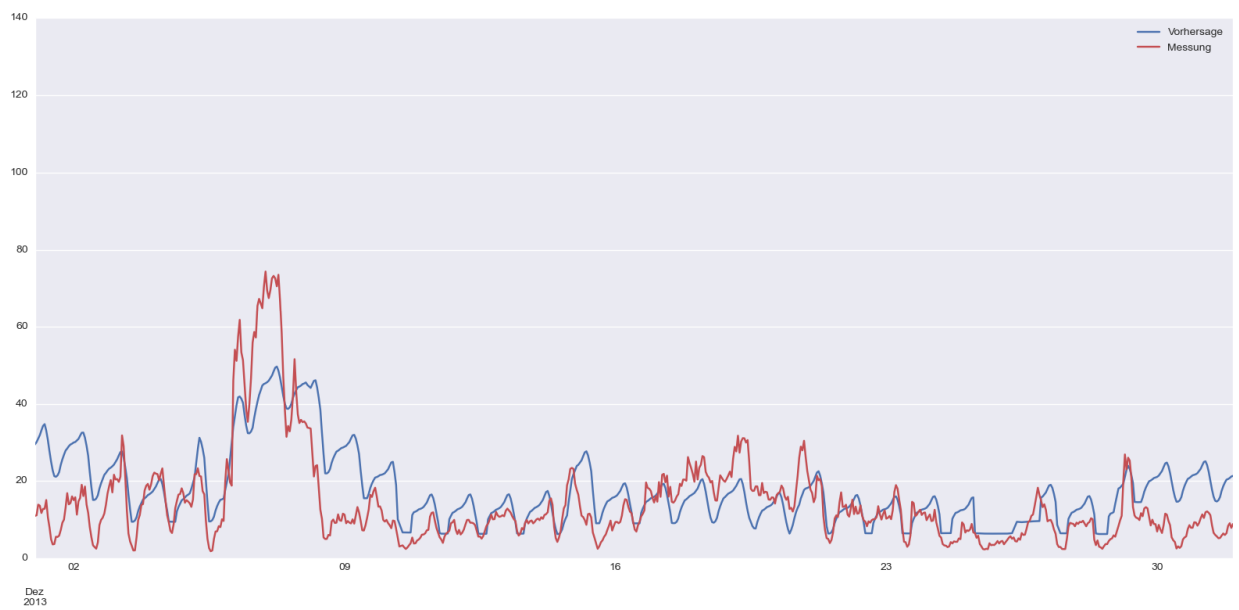
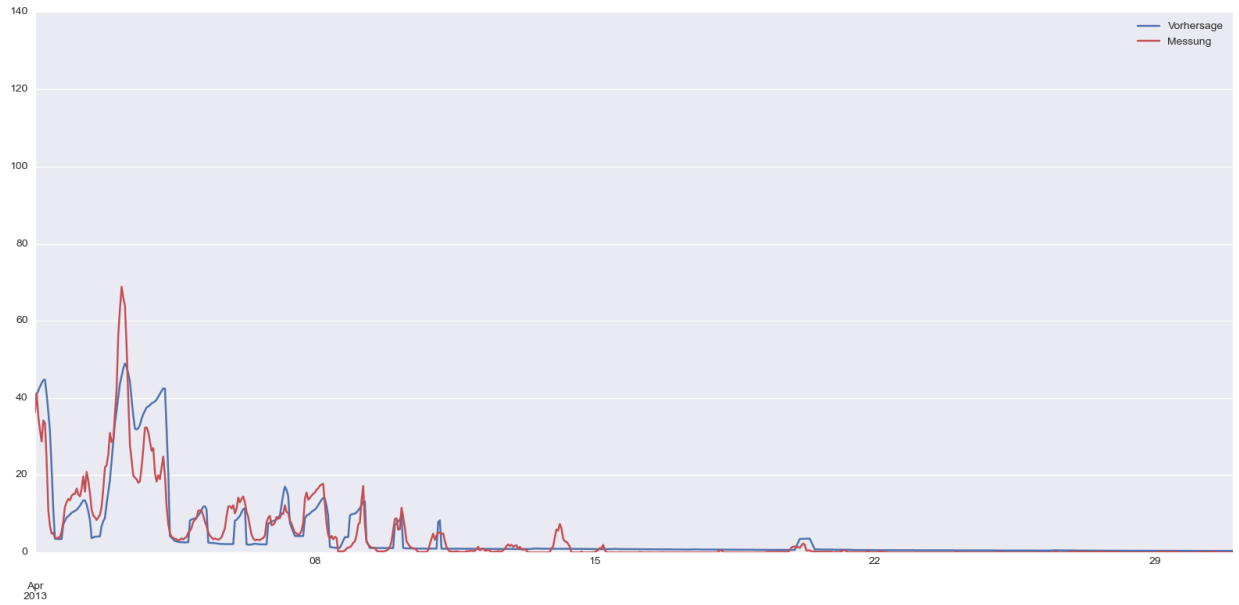


Abbildung 18: Vergleich des gemessenen Energieverbrauchs (rot) mit der Vorhersage des Regressionsmodells mit allen sechs Prädiktoren (blau), oben im April 2013, unten im Dezember 2013

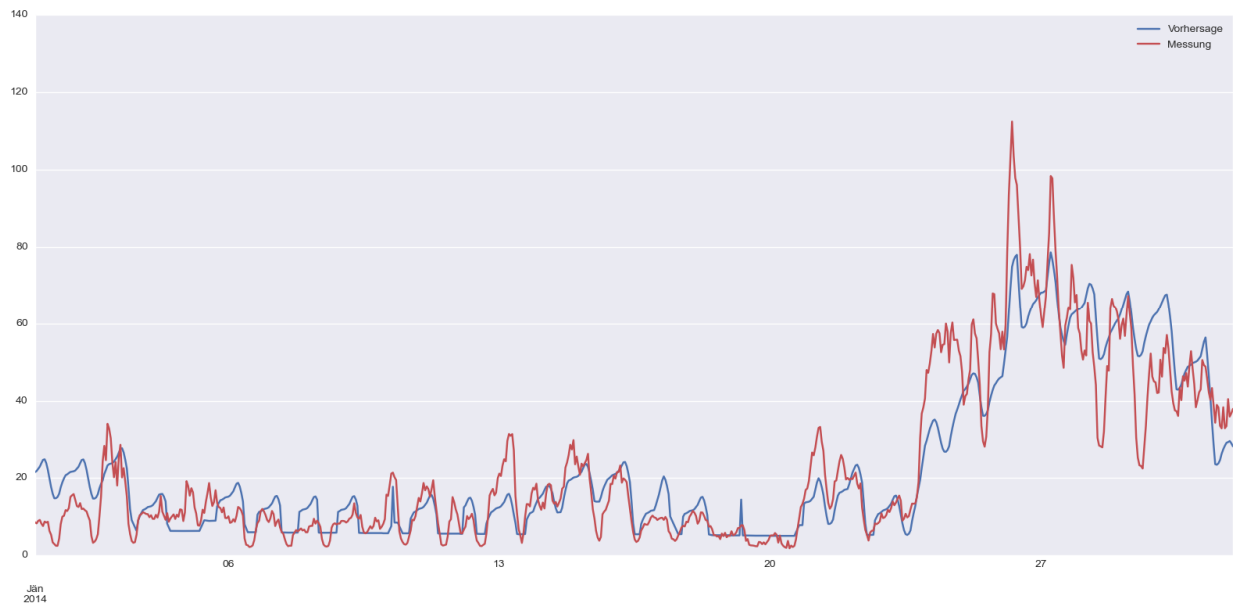


Abbildung 19: Vergleich des gemessenen Energieverbrauchs (rot) mit der Vorhersage des Regressionsmodells mit allen sechs Prädiktoren (blau) im Januar 2014

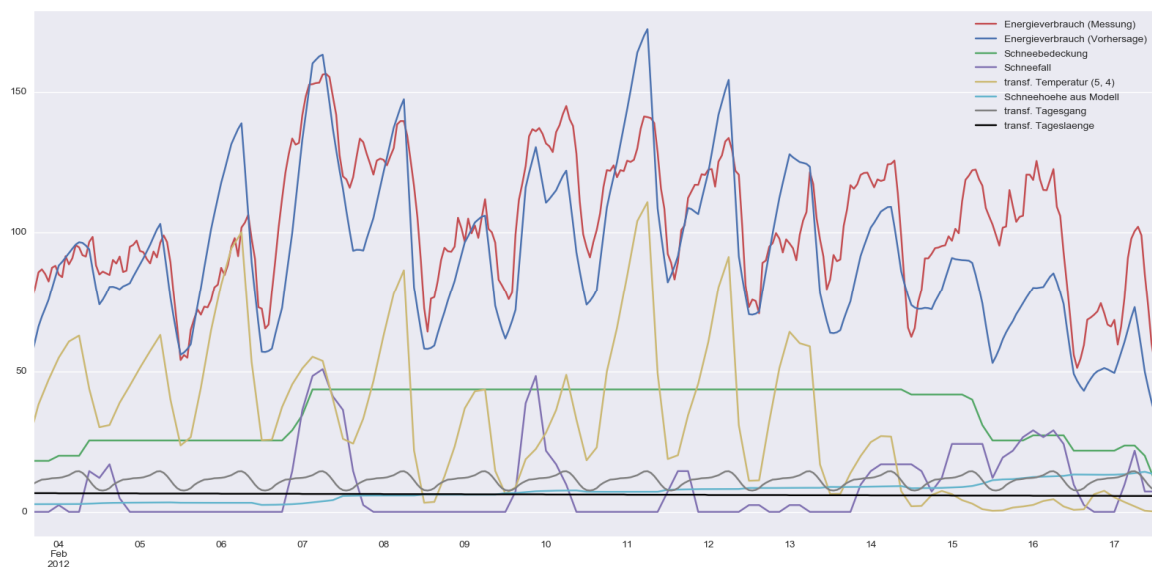


Abbildung 20: Vergleich des gemessenen Energieverbrauchs (rot) mit dem Gesamtmodell des Verbrauchs (blau) und den Beiträgen der einzelnen Prädiktoren (Schneebed. = grün, Schneefall = violett, transf. Temp. = gelb, Schneehöhe aus Modell = hellblau, transf. Tagesgang = grau, transf. Tageslänge = schwarz)

Das Regressionsmodell kann den generellen Verlauf der Verbrauchskurven relativ gut abschätzen, kurzfristige Spitzen beziehungsweise Minimalwerte sind aber teilweise schwer vorherzusagen.

Eignungstest

Um einen Test der Verbrauchsvorhersagen unter realistischen Bedingungen zu ermöglichen, haben wir in einem zweiten Schritt ein Regressionsmodell mit den gleichen Prädiktoren in viertelstündiger Auflösung mit Daten bis November 2013 trainiert. Die Wetterdaten wurden dabei auf diese zeitliche Auflösung interpoliert. Mit den Daten aus der Periode Dezember 2013 bis April 2014, die nicht ins Training eingeflossen sind, konnten wir die Prognosen mittels Kreuzvalidierung verifizieren. Die Ergebnisse der Verifizierung sind in den Abbildung 21 bis Abbildung 22 zu sehen.

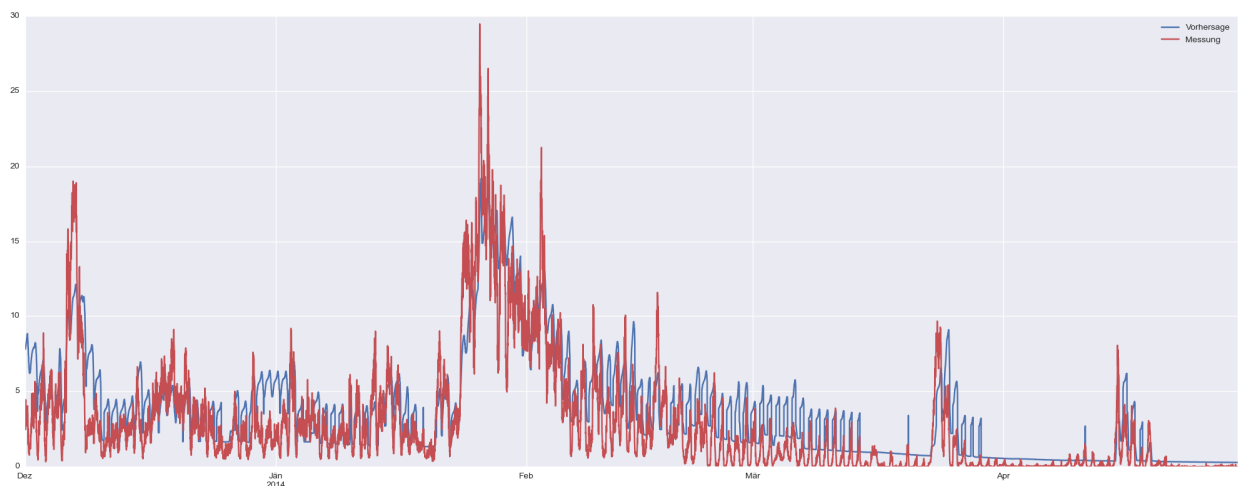


Abbildung 21: Verifikation der Vorhersage des Regressionsmodells (blau) mit Messungen des mittleren Energieverbrauchs aller Weichenheizungsanlagen (rot) mittels Kreuzvalidierung über den gesamten Testzeitraums Dezember 2013 bis April 2014



Abbildung 22: Verifikation im Zeitraum 20.01. - 20.02.2014 (Ausschnitt aus Abbildung 21)

Die Ergebnisse des Regressionsmodells (Vorhersage des historischen Energieverbrauchs aller Weichenheizungsanlagen) wurden in Form von csv-Files (wahlweise mit UTC oder Lokalzeitangaben) zum Test an ÖBB übermittelt.

4.3.5 Vorhersage des Energieverbrauchs einzelner Weichenheizungsanlagen

Zusätzlich zum gesamten Energieverbrauch aller Weichenheizungsanlagen wurden die Korrelationen der Energieverbrauchsdaten von einzelnen Weichenheizungsanlagen mit (transformierten) Messwerten von nahegelegenen Wetterstationen stichprobenartig untersucht. Dabei zeigten sich durchwegs deutlich niedrigere Korrelationskoeffizienten als für die Gesamtverbrauchsdaten, die allerdings von einer Station zur nächsten stark schwanken (z.B. für den transformierten Temperaturprädiktor zwischen 0.16 und 0.68 innerhalb der Stichprobe, 0.85 bei den Gesamtverbrauchsdaten). Das Verhalten ist schon aus den Rohdaten relativ gut ersichtlich. Abbildung 23 zeigt zwei Zeitserien für einen kurzen Zeitraum als Beispiele.

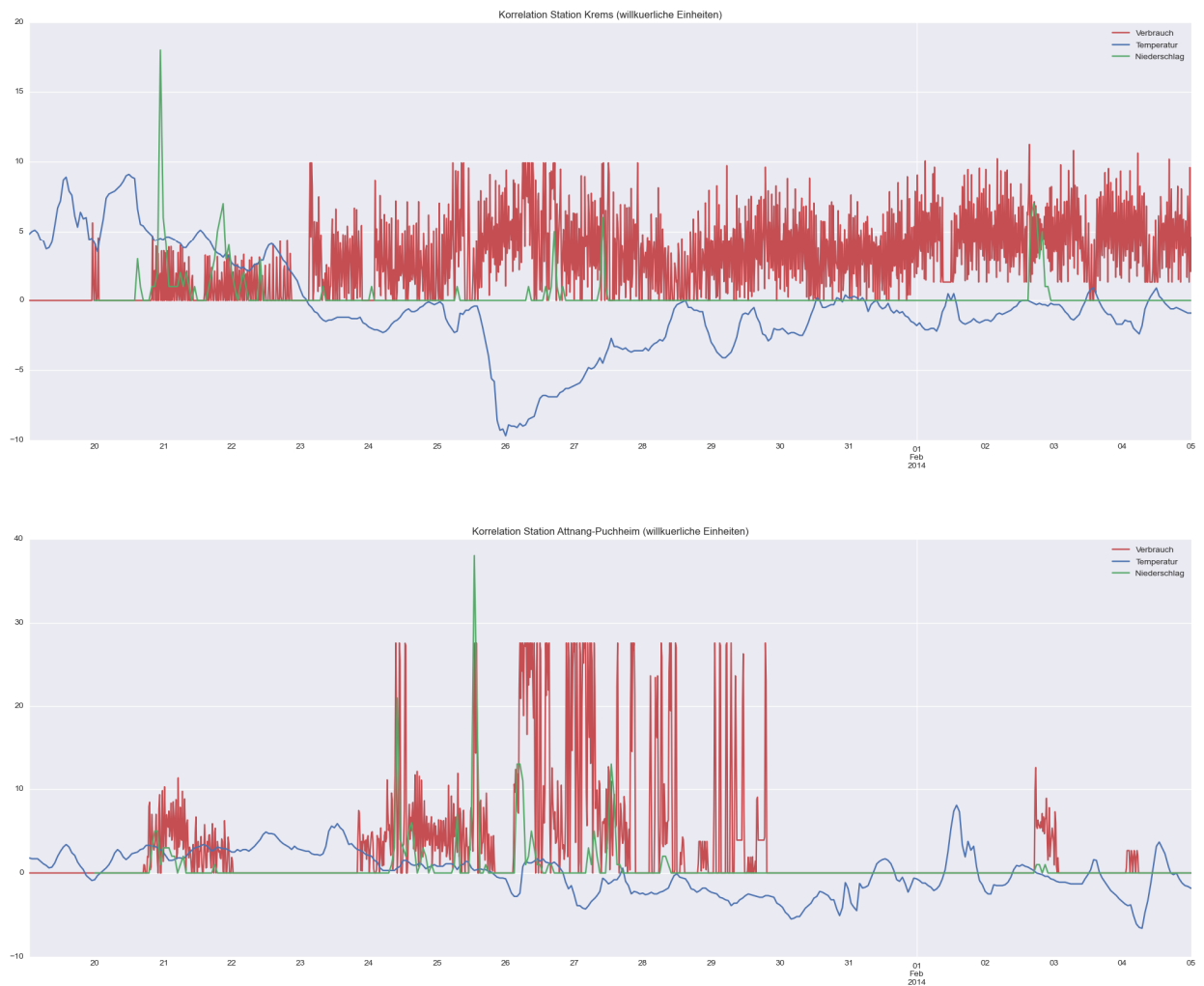


Abbildung 23: Korrelation zwischen transformierter Temperatur (blau) und Niederschlag (grün) und Energieverbrauch einzelner Weichenheizungsanlagen (rot) (2.1. bis 4.2.2014) (oben Station Krems, unten Station Attnang-Puchheim)

Zum Vergleich zeigt Abbildung 24 die Korrelation der transformierten gemittelten Wetterparameter aller ausgewählten Wetterstationen (siehe Tabelle 2) mit den Gesamtenergieverbräuchen aller Weichenheizungen im gleichen Zeitraum. Hier zeigt sich deutlich eine besser Übereinstimmung.

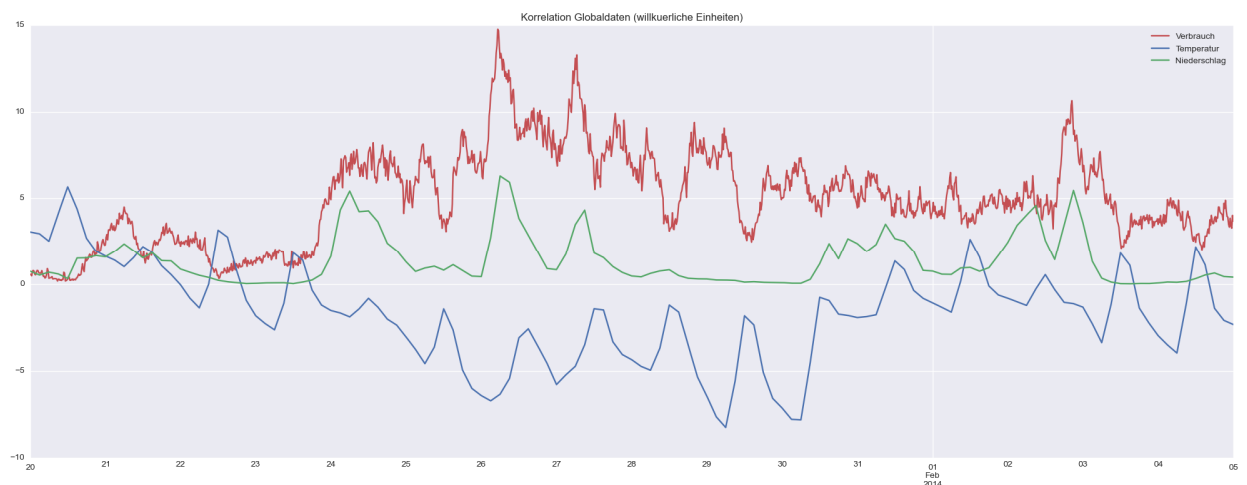


Abbildung 24: Korrelation des Gesamtenergieverbrauchs aller Weichenheizungen (rot) mit den transformierten mittleren Messdaten aller ausgewählten Wetterstationen (blau = Temperatur, grün = Niederschlag)

Wir vermuten, dass bei der Verwendung von aufsummierten Verbrauchsdaten und Aggregation der Wetterparameter über viele Orte lokale Effekte und Fluktuationen sowohl in den Wetterdaten als auch im Energieverbrauch sowohl im Prädiktanden als auch in den Prädiktoren tendenziell "herausgemittelt" werden. Daher ist die Korrelation auf globalem Level deutlicher und die Vorhersage einfacher.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND EMPFEHLUNGEN

Ziel des Projekts war es, die Vorhersage des aufsummierten Energieverbrauchs aller Weichenheizungsanlagen der ÖBB mittels Wetterparametern zu verbessern. Hierfür wurde zum einen das Schneehöhenmodell durch die Berücksichtigung eines Bilanzierungsmodells verbessert. Dieses Modell wird täglich um 6 Uhr UTC mit Stationsmessungen der Schneehöhe neu kalibriert. Daneben wurde ein neuer Parameter – der Schneeverwehungsindex – entwickelt. Dieser basiert auf dem verbesserten Schneehöhenmodell und weiteren meteorologischen Parametern, wie Wind und Temperatur. Der Schneeverwehungsindex nimmt Werte zwischen 0 und 6 an wird in 5 Gefahrenstufen (keine, geringe, mäßige, hohe und extreme Gefahr für Schneeverwehungen) angegeben. Die Berücksichtigung dieses Parameters bei der Prognose des Energieverbrauchs durch Weichenheizung sollte zu einer Erhöhung der Genauigkeit führen, da dadurch auch Situationen berücksichtigt werden, die bisher nicht prognostiziert wurden. Um von den ÖBB als Parameter in die Prognosesoftware

eingebunden werden zu können, wird der Schneeverwehungsindex in „Pseudoniederschlag“ in mm umgerechnet und kann von den ÖBB wie der Parameter „Neuschnee“ verwendet werden. Der Nachteil dieses Parameters ist die modelbedingte Annahme, dass sich nur so viel Schnee ablagern kann, wie in der Umgebung vorhanden ist. Wenn der Schnee durch die Weichenheizung geschmolzen wird, kann sich wieder aber neuer Schnee ablagern. UBIMET empfiehlt daher neben der Verwendung des Pseudoniederschlags auch die direkte Verwendung der fünf Schneeverwehungs-Gefahrenstufen bzw. des Schneeverwehungsindex, da man ihn unabhängig von der vorhandenen Schneehöhe interpretieren kann. Der Index beschreibt die Auswirkungen der Schneeverwehungen besser: Bei Werten von 5 bis 6 muss mit massiven Störungen und erhöhtem Energieverbrauch gerechnet werden.

Eine Datenlieferung der neuen Schneehöhe und des Schneeverwehungs-Pseudoniederschlag wurde für ausgewählte Stationen (siehe Abbildung 12) eingerichtet. Die Auswahl der Stationen erfolgte dabei nach klimatischer Repräsentativität. Eine Erweiterung der Datenlieferung um den direkten Schneeverwehungsindex kann jederzeit eingerichtet werden.

Da die Prognosesoftware der ÖBB lineare Zusammenhänge zwischen Inputwerten und prognostizierten Energieverbrauchswerten voraussetzt, ist die direkte Verwendung von meteorologischen Variablen wie Temperatur, Wind oder Schneefall als Prädiktoren nicht optimal. Daher wurde zusätzlich mittels von den ÖBB zur Verfügung gestellten historischen Energieverbrauchsdaten von Weichenheizungsanlagen deren Vorhersagbarkeit unter Verwendung von Wetterparametern untersucht. Die Qualität von Vorhersagen des gesamten (aufsummierten) Energieverbrauchs über ein Regressionsmodell, das gemittelte und transformierte Wetterparameter als Prädiktoren verwendet, erscheint aus unserer Sicht brauchbar. Auf einer größeren Zeitskala korreliert die Vorhersage im Allgemeinen relativ gut mit den Messungen, kurzfristige Spitzen und Fluktuationen sind aber durch Wetterparameter kaum zu prognostizieren. Den ÖBB wurde ein Testdatensatz historischer Vorhersagen dieses Regressionsmodells für den Energieverbrauch der Weichenheizungsanlagen bereitgestellt. Die Verwendbarkeit dieser Daten als für die Vorhersage des Gesamtenergieverbrauchs in der ÖBB-Prognosesoftware muss durch die ÖBB noch eingehend getestet werden. Kann hierbei eine Verbesserung der Gesamtenergieverbrauchsprognose festgestellt werden, empfehlen wir das bereits bei den ÖBB verwendete Prognosemodell zur Vorhersage des Gesamtenergieverbrauchs (Bahnstrom) um den vom Regressionsmodell für den

Weichenheizungsenergieverbrauch vorhergesagten Parameter zu ergänzen. Dazu müsste das Prognosemodell mit historischen Weichenheizungsverbrauchsvorhersagen kalibriert werden und im Anschluss aktuelle Weichenheizungsverbrauchsvorhersagen zur Verfügung stehen.

Literaturverzeichnis

BAGGALEX, D.G. & J.M. HANESIAK (2005): An Empirical Blowing Snow Forecast Technique for the Canadian Arctic and the Prairie Provinces.- *Weather and Forecasting*, 20: 51 – 62

DÉRY, S.J. & M.K. YAU (2008): Recent Studies on the Climatology and Modeling of Blowing Snow in the Mackenzie River Basin.- in: *Cold Region Atmospheric and Hydrologic Studies. The Mackenzie GEWEX Experience*. Springer Berlin Heidelberg, 2008: 241 - 257

GUYOMARG'G, G. & L. MÉRINDOL (1998): Validation of an application for forecasting blowing snow.- *Annals of Glaciology*, 26: 138 – 143

LANGER & SCHINK (2012): Moderne Regelung für maximale Energieeffizienz bei elektrischer Weichenheizung.- *Signal + Draht* (104) 7 + 8/2012, S. 22 - 27

LI, L. & J.W. POMEROY (1997): Probability of occurrence of blowing snow.- *Journal of Geophysical Research*, 102, D18: 21.955-21.964