Journal für Kulturpflanzen, 70 (2). S. 45–55, 2018, ISSN 1867-0911, DOI: 10.1399/JfK.2018.02.01 Verlag Eugen Ulmer KG, Stuttgart

Originalarbeit

Elisabeth Vollmer, Katharine Michaelis, Oliver Mußhoff

Vorernte-Vorhersage des Proteingehalts im Weizen in Nordost-Deutschland für Marktakteure anhand von Wetterinformationen

Pre-harvest prediction of wheat's protein content in Northeast Germany for market players based on weather information

Zusammenfassung

Auf dem Weizenmarkt sind Schwankungen des Qualitätsmerkmals „Proteingehalt" für Marktakteure eine große Herausforderung, da vom Handel und nachgelagerten Bereichen eine gleichbleibende Qualität verlangt wird. Als bestimmende Faktoren für die Variabilität des Proteingehalts gelten auch meteorologische Faktoren, weshalb dem Verständnis ihrer Wirkungsweise eine große Bedeutung zukommt. In diesem Beitrag wird daher der Einfluss der Wetterparameter „Temperatur", „Niederschlag" und „Sonnenscheindauer" auf den Proteingehalt des Weizens untersucht und ein Vorernte-Vorhersagemodell für den Proteingehalt von Weizen im Nordosten Deutschlands entwickelt. Dazu wird ein Random Intercept Modell auf Basis von Wetterinformationen von 16 Wetterstationen des Bundeslandes Mecklenburg-Vorpommern und dazugehörigen Mittelwerten von Proteindaten aus 148.800 Weizenproben aus den Jahren 2004 bis 2015, die von umliegenden Landwirten an den Landhändler geliefert wurden, geschätzt. Das marginale R^2 beträgt 0,523 und das konditionale R^2 liegt bei 0,540. Folglich können 52,3% der jährlichen Varianz im Proteingehalt durch die im Modell enthaltenen Variablen erklärt werden. Die Temperatur im Juni hat den höchsten, positiven Einfluss auf den Proteingehalt des Weizens. Die Wirkung der Niederschläge ist negativ. Die Sonnenscheindauer hat einen statistisch signifikanten Einfluss auf die Proteinbildung. Allerdings kann keine einheitliche Wirkungsrichtung der Sonnenscheindauer über alle Frühjahrsmonate ermittelt werden.

Stichwörter: Proteingehalt im Weizen, Vorhersage, Wetterinformationen, Random Intercept Modell

Abstract

On the wheat market, fluctuations in the quality characteristic protein content are a major challenge for market operators since trade requires constant protein content. The determining factors for the annual variability of the protein content are meteorological factors. For this reason, understanding of the factors' mode of action is of importance. In this article, the influence of weather parameters, such as temperature, precipitation and sunshine duration, on the wheat's protein content is investigated and a pre-harvest prediction model for the protein content of wheat in north-east Germany is developed. For this purpose, a random intercept model based on weather information from 16 weather stations of the German federal state of Mecklenburg-Western Pomerania and protein data from the corresponding mean protein contents of 148,800 protein samples over the years 2004 to 2015 supplied by the surrounding farmers to the land trader, is estimated. The marginal R^2 is 0.523 and the conditional R^2 amounts to 0.540. Thus, 52.3% of the annual variance in the protein content can be explained by the variables

Institut
Arbeitsbereich für Landwirtschaftliche Betriebslehre der Georg-August-Universität Göttingen

Kontaktanschrift
Dr. Elisabeth Vollmer, Georg-August-Universität Göttingen, Department für Agrarökonomie und Rurale Entwicklung, Arbeitsbereich Landwirtschaftliche Betriebslehre, Platz der Göttinger Sieben 5, 37073 Göttingen, E-Mail: elisabeth.vollmer@agr.uni-goettingen.de

Zur Veröffentlichung angenommen
09. Januar 2018

contained in the model. Temperature in June has the highest positive effect on the protein content of wheat. The effect of precipitation is negative. The sunshine duration has a significant influence on protein formation. However, no uniform direction of action of the sunshine duration can be determined over all spring months.

Key words: wheat protein content, forecasting, weather information, random intercept model

Einleitung

Mit einer Erntemenge von 26,5 Mio. t und 54% der Getreideanbaufläche im Jahr 2015 ist Weizen die bedeutendste Getreideart in Deutschland (Statistisches Bundesamt, 2016). Hinsichtlich des Ertrags und der Qualität des Weizens ist jedoch eine starke Variabilität zu beobachten (Strategie Grains, 2014; IGC, 2016). Sowohl für Erzeuger und Händler als auch für Mühlen und weitere Abnehmer stellen diese Qualitätsschwankungen eine bedeutende Herausforderung im Markt dar, auf dem für den Handel und die Backindustrie eine gleichbleibende Qualität der Ware verlangt wird (Jarvis et al., 2008). Daher ist eine Prognose des Hauptqualitätsparameters „Proteingehalt“ für unterschiedliche Marktakteure von großem Nutzen. Landwirte können so ihre produktionstechnischen Maßnahmen wie Beregnung, Düngung und Pflanzenschutz zum Ende der Wachstumsperiode zielgerichtet optimieren und durch die gezielte Steuerung der Proteingehalte gegebenenfalls Preisaufschläge generieren (Smith und Gooding, 1999). Da der Proteingehalt ausschlaggebend für die Preisgestaltung und die Exportmöglichkeiten des Weizens ist, kann eine Vorernte-Vorhersage auch Kauf- und Risikoabsicherungsentscheidungen von Händlern erleichtern. Insbesondere für Forward-Kontrakte, Prämienhandel und Futures- oder Optionsgeschäfte an der Börse ist ein Prognosemodell eine große Unterstützung (Woolfolk et al., 2002).

Neben Faktoren wie beispielsweise die Sorte oder die Stickstoffdüngung wird der Proteingehalt von Weizen von den klimatischen Bedingungen während des Wachstums beeinflusst (Campell et al., 1981; Rao et al., 1993; Uhlen et al., 1998; Rharrabti et al., 2001). Für den Proteingehalt entscheidend ist besonders die Phase der Kornfüllung und Abreife (FAO, 2002). Laut Stone und Savin (1999) werden 70–80% des Proteins während der Kornfüllung gebildet. Meteorologische Parameter wie die Temperatur (Benzian und Lane, 1986; Blumenthal et al., 1993; Daniel und Triboi, 2000), der Niederschlag (Correll et al., 1994; Smith und Gooding, 1999; Flagella et al., 2010) und die Sonnenstunden (Spiertz, 1977; Johansson und Svensson, 1998) zeigen im Zeitraum der Kornfüllung deutliche Effekte auf den Proteingehalt des Ernteguts.

In der Literatur werden zur Vorhersage des Proteingehalts vielfach Regressionsmodelle angewendet. Beispielsweise entwickeln Pan et al. (2006), Jarvis et al. (2008) und Lee et al. (2013) Prognosemodelle und zeigen, dass Wettereffekte einen starken Einfluss auf die Höhe des Proteingehalts haben. Wie Smith und Gooding (1999) nachweisen, haben Regressionsmodelle einen sehr hohen Erklärungsgehalt in Bezug auf die Vorernte-Vorhersage des Proteingehalts.

Die Prognosemodelle der genannten Studien sind meist nur für bestimmte Weizensorten oder unter vorgegebenen Wachstumsbedingungen gültig, so dass eine Vorernte-Vorhersage des Proteingehalts für abweichende Produktionsgegebenheiten nicht möglich ist. Auch sind Vorhersagemodelle bisheriger Forschungen überwiegend für Regionen in Kanada, Australien, China oder den USA entwickelt worden. Klimatische Einflüsse auf den Proteingehalt von Weizen in Europa werden einzig von Benzian und Lane (1986) und Gooding et al. (1997) in Großbritannien, von Johansson und Svensson (1998) in Schweden sowie (für Hartweizen) von Guasconi et al. (2011) und Dalla Marta et al. (2011) in Italien untersucht. Die Ergebnisse dieser Schätzungen sind jedoch aufgrund des andersartigen Klimas und Unterschieden in der Länge der Vegetationsperiode nicht auf den deutschen Raum übertragbar. Bezüglich der Auswirkungen des Wetters auf den Proteingehalt im Weizen existieren in Deutschland trotz der Relevanz des Themas bislang keine Studien.

Ziel dieses Beitrags ist es daher, den Einfluss der meteorologischen Parameter „Temperatur“, „Niederschlag“ und „Sonnenscheindauer“ auf den Proteingehalt von Weizen zu untersuchen und anhand dieser Wetterinformationen ein Vorernte-Vorhersagemodell für den Proteingehalt für Nordost-Deutschland als eine der bedeutendsten Ackerbauregionen in Deutschland zu entwickeln. Dazu wird ein Random Intercept Modell auf Basis von Daten von 16 Wetterstationen des Bundeslandes Mecklenburg-Vorpommern und Proteindaten der Jahre 2004 bis 2015 geschätzt. Die Proteindaten beziehen sich auf insgesamt 148.800 Weizenproben, die nach Postleitzahlen den Wetterstationen zugeordnet werden. Um den Nutzen des Vorernte-Vorhersagemodells für die Praxis zu erhöhen, wird auf ein breit anwendbares Modell ohne Einschränkung nach spezifischen Weizensorten, Bodenarten und Düngevarianten gesetzt. Das Prognosemodell wird unter anderem für Marktakteure wie Landhändler entwickelt. Diese Marktakteure verfügen – im Gegensatz zu den Landwirten – nicht über Informationen zu den produktionstechnischen und betriebsspezifischen Gegebenheiten. Anhand der vom Deutschen Wetterdienst online zur Verfügung gestellten Daten können Landhändler etc. mit vergleichsweise geringem Aufwand die zu erwartenden Proteingehalte mit dem entwickelten Modell ermitteln. Das Random Intercept Modell wird als Vorernte-Vorhersage über monatliche Wetterparameter der Frühjahrsmonate März bis Juni für den 1. Juli terminiert. Auf diese Weise sind die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung sowohl für die produktionstechnischen Entscheidungen (z.B. Fungizidapplikationen) als auch für die Vorverkaufsentscheidungen des Landwirts von Bedeutung. Daneben hat die Vorernte-Vorhersage des Proteingehalts für Landhändler etc. hinsichtlich ihrer Kauf-, Risikoabsicherungs- und Planungsentscheidungen einen hohen Stellenwert.

Der vorliegende Beitrag erweitert damit die bisherige Literatur um drei entscheidende Aspekte: Erstens ist er der Erste, der Auswirkungen des Wetters auf den Proteingehalt von Weizen im Nordosten Deutschlands analysiert und ein diesbezügliches Prognoseverfahren ermittelt. Zweitens wird erstmals ein Protein-Vorhersagemodell auf einer breiten Grundlage von Proteindaten einer gesamten Region bestimmt, welches die drei Wetterparameter „Temperatur", „Niederschlag" und „Sonnenscheindauer" berücksichtigt. Drittens ist dies der erste Beitrag, der monatliche Wettervariablen in einem Random Intercept Modell analysiert.

Theoretischer Hintergrund und Hypothesengenerierung

In der Literatur beziehen sich die meisten Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses von Temperatur, Niederschlag und Sonnenscheindauer auf den Proteingehalt des Weizens auf die Analyse von Zusammenhängen einzelner Wetterparameter mit dem Proteingehalt (Campell et al., 1981; Correll et al., 1994; Ciaffi et al., 1996; Daniel und Triboi, 2000; Haberle et al., 2008; Flagella et al., 2010). Umfassende Vorernte-Vorhersagemodelle für den Proteingehalt im Weizen auf Basis der Temperatur, des Niederschlags und der Sonnenscheindauer sind nicht vorhanden. Daher werden für jeden Parameter einzeln Hypothesen aus den Ergebnissen bisheriger Forschungen abgeleitet.

Zum Einfluss der Temperatur auf den Proteingehalt sind in der Literatur im Vergleich zu anderen Wetterparametern die meisten Untersuchungen zu finden. Laut Campell et al. (1981) sowie Randall und Moss (1990) hat die Temperatur die größten, positiven Auswirkungen auf die Bildung des Proteins. Des Weiteren haben Temperaturvariablen in Regressionsanalysen wie beispielsweise bei Johansson und Svensson (1998) häufig den höchsten Erklärungsgehalt. Für die Wachstumsperiode über das gesamte Frühjahr stellen Guasconi et al. (2011) und Dalla Marta et al. (2011) einen positiven Einfluss der Temperatur auf den Proteingehalt fest. Blumenthal et al. (1993), Rao et al. (1993), Johansson und Svensson (1998), Smith und Gooding (1999), Daniel und Triboi (2000), Pan et al. (2006) und Lee et al. (2013) beschreiben die positive Wirkung der Temperatur explizit für die Kornfüllungsphase. Dieser Zeitraum zwischen der Blüte und Abreife des Weizens ist nach Benzian und Lane (1986) sowie Johansson und Svensson (1998) die für die Proteinbildung entscheidende Entwicklungsstufe des Weizens. 70% bis 80% des Proteins werden während der Kornfüllung gebildet (Stone und Savin, 1999).[1] Außerdem ermitteln Uhlen et al. (1998) einen positiven Einfluss der Temperatur insbesondere bei niedriger Grunddurchschnittstemperatur in Norwegen. Aber auch Tage mit hohen Temperaturen von mehr als 35 °C in Australien erhöhen den Proteingehalt (Correll et al., 1994). Dabei zeigen überdurchschnittlich hohe Temperaturen (Hitzestress) zu einem späteren Zeitpunkt in der Vegetation deutlichere, positive Effekte als zu Beginn des Frühjahrs, wo die Weizenpflanze den Stress noch kompensieren kann (Campell und Davidson, 1979). Aus den genannten Studien geht hervor, dass die Temperatur bei der Bildung des Proteins eine sehr wichtige Rolle spielt. Bei höheren Temperaturen, insbesondere während der Kornfüllungsphase, steigt der Proteingehalt im Erntegut an. Hypothese 1 lautet daher:

H1 „Temperatur": Die Höhe der Temperatur hat sowohl im Frühjahr als auch in der Kornfüllungsphase einen positiven Einfluss auf den Proteingehalt.

Der Einfluss von Niederschlägen auf den Proteingehalt ist laut Campell und Davidson (1979) weniger bedeutend als die Auswirkungen der Höhe der Durchschnittstemperatur. Dennoch sind deutliche Effekte der gefallenen Niederschlagsmengen auf die Entwicklung des Proteins festgestellt worden. Smith und Gooding (1999), Alaru et al. (2003), Guasconi et al. (2011) and Dalla Marta et al. (2011) beschreiben einen negativen Zusammenhang von Niederschlägen im Winter und im frühen Frühjahr mit dem Proteingehalt. Bezüglich der Phase der Kornfüllung werden unterschiedliche Ergebnisse erzielt. Pan et al. (2006) ermitteln einen ebenfalls negativen Einfluss von Niederschlägen von der Blüte bis zur Abreife des Weizens in China. Flagella et al. (2010) und Lee et al. (2013) hingegen messen einen höheren Proteingehalt bei Niederschlägen zu Beginn der Kornfüllungsphase in Italien beziehungsweise in den USA.[2] Hypothese 2 geht daher von folgendem Zusammenhang aus:

H2 „Niederschlag": Die Niederschlagsmenge hat im Frühjahr und in der Abreifephase einen negativen Einfluss und zu Beginn der Kornfüllungsphase einen positiven Einfluss auf den Proteingehalt.

Die Wirkung der Sonnenscheindauer auf den Proteingehalt ist bisher nur in sehr geringem Ausmaß untersucht worden, obwohl die Sonneneinstrahlung physiologisch für die Weizenpflanze eine hohe Bedeutung hat (Pan et al., 2006). Johansson und Svensson (1998) stellen einen positiven Einfluss der Summe der Sonnenscheinstunden

[1] Physiologisch betrachtet beschleunigen höhere Temperaturen nach der Blüte das Wachstum und reduzieren gleichzeitig die Länge der Kornfüllungsphase (Graybosch et al., 1995; Wheeler et al., 1996). Dieser Effekt ist von Nachteil für die Anreicherung von Stärke im Weizenkorn und fördert so die Stickstoffakkumulierung, so dass der Proteingehalt unter wärmeren Bedingungen steigt. Die endgültige Korngröße und somit der Verdünnungsgrad des gespeicherten Proteins hängen daher unmittelbar zusammen mit der Dauer der Zeit, die die Weizenpflanze im Anschluss an die Blüte grün bleibt (Ciaffi et al., 1996; Smith und Gooding, 1999; Spiertz, 1977).

[2] Pflanzenphysiologisch lassen sich beide Einflüsse erklären. Vor der Kornfüllungsphase haben höhere Niederschläge eine verringernde Wirkung auf den Proteingehalt, da sie die Verdünnung von frühen Stickstoffreserven durch vegetatives Wachstum fördern sowie Auswaschung und andere Formen von Stickstoffverlusten verstärken. Die Wasservorratsspeicher des Bodens werden aufgefüllt, so dass während der Kornentwicklung das Grünbleiben der Blätter verlängert wird. So wird die Kohlenhydratassimilation auf Kosten der Proteinbildung gestärkt und der Effekt höherer Niederschläge ist nachteilig für den Proteingehalt (Hopkins, 1968; Schlehuber und Tucker, 1959; Smith und Gooding, 1999; Taylor und Gilmour, 1971). Für die Bildung des Proteins in der Kornfüllungsphase spielt die Stickstoffaufnahme aus dem Boden in diesem Zeitraum eine wichtige Rolle. Die so genannte Ährengabe der Stickstoffdüngung erfolgt in Deutschland in der Regel vor dem Ährenschieben (Alsing und Fleischmann, 2002). Da für die Aufnahme des gedüngten Stickstoffs eine gute Bodenfeuchtigkeit nötig ist, fördern Niederschläge zu Beginn der Kornfüllungsphase die Stickstoffaufnahme und können so den Proteingehalt des Ernteguts erhöhen (Gooding et al., 2003).

im Juni auf den Proteingehalt fest. Da die Kornfüllungsphase durch eine spätere Vegetation in Schweden erst im Juli stattfindet, entspricht der positive Effekt aus dem Juni etwa einem positiven Effekt für Deutschland im Mai. Für den gesamten Zeitraum der Kornfüllung von der Blüte bis zur Abreife stellen Pan et al. (2006) ebenfalls eine positive Relation fest. Lee et al. (2013) beschreiben die Zusammenhänge zwischen der Sonnenstrahlung im März und dem Proteingehalt als negativ und für April und Mai als positiv. Aus der Literatur kann also keine eindeutige Wirkungsrichtung abgeleitet werden. Allerdings gibt es zahlreiche Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen der Sonnenscheindauer und dem Proteingehalt, sodass Hypothese 3 wie folgt lautet:

H3 „Sonnenscheindauer": Die Sonnenscheindauer hat einen Einfluss auf den Proteingehalt.

Material und Methodik

Datengrundlage und Beschreibung der Untersuchungsregion

Zur Schätzung des Vorernte-Vorhersagemodells für den Proteingehalt im Weizen werden Wetterinformationen und Proteindaten aus Mecklenburg-Vorpommern verwendet. Die Untersuchungsregion liegt im Nordosten Deutschlands im Zentrum des südlichen Ostseeraums und erstreckt sich über eine Fläche von 23.400 km^2. Das Klima ist geprägt durch den Übergang vom maritimen Einfluss des Seeklimas im Küstenbereich der Ostsee zu einem kontinentalen Klima im Binnenland. Die jährliche Durchschnittstemperatur beträgt 8,3 °C. Die durchschnittliche Niederschlagssumme eines Jahres liegt zwischen 550 und 610 mm, wobei die Niederschläge von der Küste ins Binnenland hin abnehmen (Climate Data, 2016). In Mecklenburg-Vorpommern wird Winterweizen angebaut, der zum größten Teil zwischen Mitte September und Anfang Oktober gesät wird. In den letzten 10 Jahren begann die Weizenernte im Durchschnitt Ende Juli. Die für die Proteinbildung entscheidende Phase der Kornfüllung startet 8 bis 10 Wochen vor der Ernte im Anschluss an die Blüte, was einem Zeitraum um Mitte/Ende Mai entspricht. Für die Analyse werden die Monate März bis Juni herangezogen, da das Frühjahr und die Phasen der Kornfüllung und Abreife, in denen aus der Literatur ein Einfluss von Wetterparametern auf den Proteingehalt zu finden ist, in diesen Zeitraum fallen.

Für den Untersuchungszeitraum der Erntejahre 2004 bis 2015 werden Daten des Deutschen Wetterdienstes für die tägliche Durchschnittstemperatur, täglichen Niederschläge und täglichen Sonnenscheinstunden von 16 Wetterstationen in Mecklenburg-Vorpommern genutzt. Aus der Karte Mecklenburg-Vorpommerns in Abb. 1 ist die Lage der einzelnen Wetterstationen sowie ihre gleichmäßige Verteilung über die gesamte Untersuchungsregion ersichtlich.

Bei fehlenden Wetterdaten für einzelne Tageswerte wurden diese mit den entsprechenden Werten der nächstgelegenen Wetterstation ersetzt.[1] Für jede Station wurden die täglich gemessenen Werte zu monatlichen Summen aggregiert.[2]

Daten zu den Qualitäten des geernteten Weizens wurden vom Unternehmen ATR Landhandel GmbH und

[1] Dieses Verfahren ist in der Literatur üblich und wird unter anderem von Qian et al. (2009) vorgeschlagen.

[2] Auch wenn die Entwicklungsstadien des Weizens nicht exakt mit den Kalendermonaten übereinstimmen, ist die Verwendung von monatlichen Summen oder Mittelwerten von Wettervariablen anstelle der exakten biologischen Wachstumsabschnitte weit verbreitet. Dixon et al. (1994) vergleichen beispielsweise Wettervariablen nach Entwicklungsstadien mit Variablen nach Kalendermonaten und stellen nur geringe Abweichungen zwischen den Modellen hinsichtlich der Vorhersagegüte fest. Gooding et al. (1997), Johansson und Svensson (1998), Dalla Marta et al. (2011) und Lee et al. (2013) schätzen ihre Regressionen ebenfalls über Wettervariablen nach Kalendermonaten.

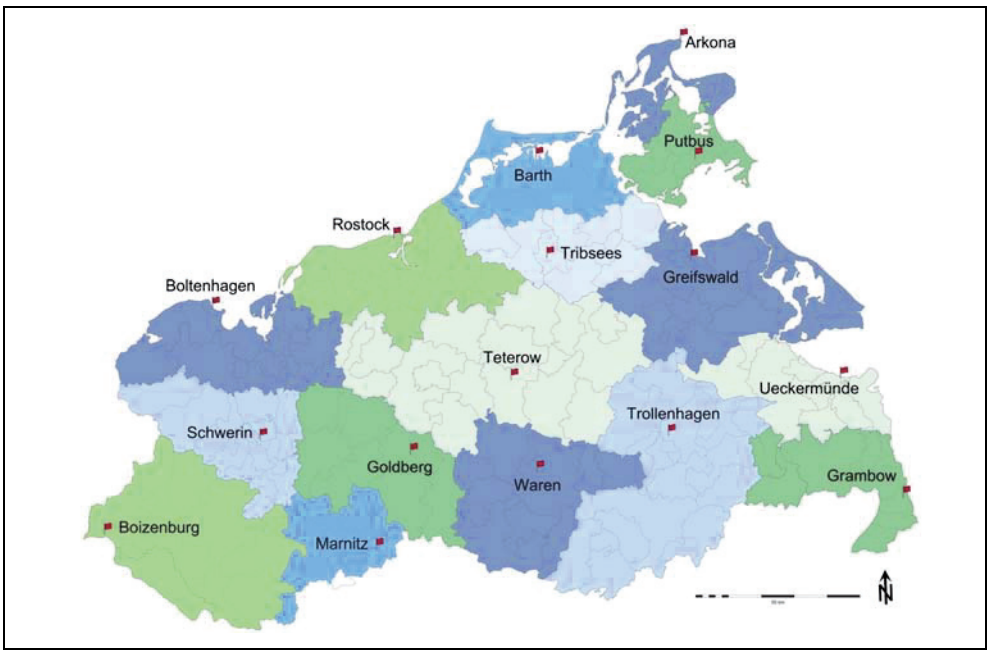

Abb. 1. Wetterstation-Regionen in Mecklenburg-Vorpommern. Rote Fahne: Lage der Wetterstation; Der Name einer Region entspricht dem Ort der Wetterstation; Linien: Grenzen der Postleitzahlenbezirke; Farblich gekennzeichnete Regionen: Zuteilung der Proteindaten aus den Postleitzahlenbezirken zu einer Wetterstation.

Co. KG zur Verfügung gestellt und bestehen aus 148.800 Proteinwerten aus Mecklenburg-Vorpommern für den Untersuchungszeitraum der Erntejahre 2004 bis 2015. Jede Anlieferung von Weizen eines Kunden aus der Landwirtschaft wird bei der Annahme an einem Lager des Landhandels hinsichtlich des Proteingehalts beprobt. Im vorliegenden Datensatz ist jede Proteinprobe der Postleitzahl des landwirtschaftlichen Betriebes zugeordnet, von dem der Weizen erzeugt wurde. Außerdem sind die Qualitätsstufe der Sorte (A- oder B-Weizen) und die angelieferte Weizenmenge jeder Probe im Datensatz dokumentiert. Von A-Weizen sind 78.350 Proben vorhanden, die sich auf eine Weizenmenge von 1,88 Mio. t beziehen und von B-Weizen 70.450 Proben, hinter denen 1,85 Mio. t Weizen stehen. Im Folgenden werden die zur Datenaufbereitung durchgeführten Schritte beschrieben:

1.) Es wurden für jeden Postleitzahlenbezirk nach der beprobten Menge gewichtete Mittelwerte für den Proteingehalt jedes Erntejahres ermittelt.
2.) Die 150 Postleitzahlenbezirke wurden zu 16 Regionen in Mecklenburg-Vorpommern zusammengefasst. Dabei wurden, angelehnt an das Verfahren bei LEE et al. (2013), jeweils die einer Wetterstation nächstgelegenen Postleitzahlenbezirke zur Region dieser Wetterstation gebündelt. Als Grenzziehung zwischen den Regionen wurde sich an den Landkreisgrenzen vor der Gebietsreform von 2011 orientiert. Sind in einem Landkreis mehrere Wetterstationen vorhanden, so wurde dieser Landkreis geteilt nach kürzester Entfernung jedes Postleitzahlenbezirks zur Wetterstation.[1] Die genaue Zuordnung der Postleitzahlenbezirke zu den 16 Wetterstation-Regionen wird in Abb. 1 ersichtlich.
3.) Schließlich wurden für jede der 16 Wetterstation-Regionen mengengewichtete Mittelwerte des Proteingehalts für jedes Jahr berechnet. Es ergeben sich insgesamt 352 Beobachtungen (Proteingehalte der 12 Erntejahre für 16 Wetterstationen für A- und B-Weizen abzüglich 32 zufällig fehlender Messwerte für einzelne Wetterparameter).

Ökonometrisches Modell

Bei den zugrunde liegenden Daten handelt es sich um wiederholte Beobachtungen über 12 Jahre an 16 Wetterstation-Regionen. In einem klassischen linearen Regressionsmodell wird diese besondere Struktur der wiederkehrenden Messungen in einer Region nicht berücksichtigt. Daher wird zur Vorernte-Vorhersage des Proteingehalts anhand von Wetterinformationen ein Random Intercept Modell verwendet, welches eine spezifische Form des gemischten Modells darstellt. Die Idee des Random Intercept Modells ist es, zur Berücksichtigung und Darstellung der besonderen Datenstruktur einen regionsspezifischen Random Intercept einzuführen (FAHRMEIR et al., 2013):

$$y_{it} = \gamma_{0i} + \beta_0 + \beta_1 x_{1it} + \beta_2 x_{2it} + \ldots + \beta_k x_{kit} + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

Dabei bezeichnet die abhängige Variable y_{it} den Proteingehalt für die Wetterstation-Region i im Jahr t. Die erklärenden Variablen x_{1it}, x_{2it} bis x_{kit} stellen die unterschiedlichen Wetterparameter für die Region i im Jahr t dar. Jede Monatssumme eines Wetterparameters (Temperatur, Niederschlag, Sonnenscheindauer) bildet eine eigene erklärende Variable, so dass sich 12 x_{it}-Variablen ergeben (k = 12). $\varepsilon_{it} \sim N(0, \sigma^2)$ ist der unabhängige Fehlerterm. Der regionsspezifische Random Intercept γ_{0i} bildet die spezifischen, zufälligen Abweichungen der unterschiedlichen Regionen i vom fixen allgemeinen Achsenabschnitt β_0 ab. $\beta_0 + \gamma_{0i}$ beschreibt den (zufälligen) Achsenabschnitt für eine Wetterstation-Region i. Die Vektoren β_1 bis β_k stellen die fixen Steigungsparameter der erklärenden Variablen dar, die für alle Regionen identisch sind (FAHRMEIR et al., 2013).

Für den regionsspezifischen Random Intercept wird eine wechselseitige Unabhängigkeit des regionsspezifischen Random Intercepts γ_{0i} und des Fehlerterms ε_{it} angenommen. Die regionsspezifischen Achsenabschnitte $\beta_0 + \gamma_{0i}$ können als Einflüsse von nicht verfügbaren, regionsspezifischen Variablen interpretiert werden. Sie berücksichtigen die nicht beobachtete Heterogenität zwischen den Regionen. Eine alternative Betrachtung der regionsspezifischen Random Intercepts ist ihre Interpretation als einen zusätzlichen Fehlerterm. Hierbei erscheint das Random Intercept Modell als ein lineares Regressionsmodell mit zwei Fehlertermen, bei dem γ_{0i} einen regionsspezifischen Fehler darstellt, der bei allen Beobachtungen derselben Region auftaucht. ε_{it} bildet dann den beobachteten Fehler der Region i und dem Jahr t ab (FAHRMEIR et al., 2013). Zur Schätzung des Random Intercept Modells wird das „lme4"-Paket des Statistikprogramms R genutzt (BATES et al., 2015).

Ergebnisse und Diskussion

Deskriptive Statistik

Tab. 1 enthält die deskriptive Statistik der Variablen, die für die Auswertung und Bestimmung der Vorhersagemodelle relevant sind. Im Durchschnitt der 16 verschiedenen Wetterstation-Regionen (vgl. Abb. 1) und den 12 Jahren im Untersuchungszeitraum liegt der Proteingehalt bei 12,9%.

Aus den Mittelwerten der Wetterparameter ist ersichtlich, dass die monatlich aggregierten Summen von März bis Juni im Mittel der Jahre sowohl für die Durchschnittstemperatur als auch für die Sonnenscheinstunden ansteigen. Die Spannweite der Daten eines Monats ist für die Sonnenscheinstunden im Mai mit einem Unterschied zwischen Minimum und Maximum von 283 h am größten und bezogen auf die Wetterparameter bei den Niederschlägen im März mit 75 mm am geringsten.

[1] Die möglichst genaue Zuordnung der Proteindaten zu den Stationen ist von Bedeutung, da mit zunehmender Entfernung vom Messpunkt insbesondere die Übertragbarkeit der an der Station gemessenen Höhe der Niederschläge auf das umliegende Gebiet abnimmt (WITTCHEN et al., 2011).

Tab. 1. Deskriptive Statistik [a)]

Variable	Minimum	Mittelwert	Std. Abweichung	Maximum
Proteingehalt (%)	11,0	12,9	0,7	14,7
Temperatur März (°C)	−48,6	122,1	70,9	226,3
Temperatur April (°C)	167,4	257,1	43,4	367,4
Temperatur Mai (°C)	265,9	381,4	37,2	458,5
Temperatur Juni (°C)	401,3	464,0	30,2	535,5
Niederschlag März (mm)	5,4	35,4	18,1	80,8
Niederschlag April (mm)	0,9	27,9	19,8	104,5
Niederschlag Mai (mm)	7,1	56,5	28,6	131,7
Niederschlag Juni (mm)	16,6	58,7	30,5	162,0
Sonnenscheindauer März (h)	84,2	138,6	27,8	197,9
Sonnenscheindauer April (h)	89,3	212,4	54,2	342,4
Sonnenscheindauer Mai (h)	112,1	229,8	57,9	395,5
Sonnenscheindauer Juni (h)	142,0	237,2	44,3	318,6

Temperatur: Summe der täglichen Durchschnittstemperaturen in einem Kalendermonat
Niederschlag: Summe der täglichen Niederschläge in einem Kalendermonat
Sonnenscheindauer: Summe der täglichen Sonnenscheinstunden in einen Kalendermonat
[a)] 16 Wetterstation-Regionen über 12 Jahre mit n = 352 Beobachtungen

Vorernte-Vorhersagemodell

Für die Prognose des Proteingehalts des Weizens anhand von Wetterinformationen wird ein gemischtes Modell mit regionsspezifischen Random Intercepts geschätzt. Im Anfangsmodell wurden die Wetterinformationen „Temperatur", „Niederschlag" und „Sonnenscheindauer" jeweils für die Frühjahrsmonate „März" bis „Juni" aufgenommen. Die Variablenselektion erfolgte im Anschluss auf Grundlage des Akaike-Informationskriteriums (AIC). Die Ergebnisse des reduzierten Modells sind in Tab. 2 dargestellt.

Das marginale R^2 des Vorernte-Vorhersagemodells beträgt 0,523 und das konditionale R^2 liegt bei 0,540. Folglich können 52,3% der jährlichen Varianz im Pro-

Tab. 2. Reduziertes Vorernte-Vorhersagemodell für Weizen [a)]

Variable	Koeffizient	Std. Fehler	t-Wert	p-Wert	
Intercept	8,993	0,475	18,930	< 0,001	***
Temperatur März	−0,003	0,000	−5,968	< 0,001	***
Temperatur Mai	−0,009	0,001	−9,813	< 0,001	***
Temperatur Juni	0,019	0,001	14,737	< 0,001	***
Niederschlag März	−0,008	0,002	−4,090	< 0,001	***
Sonnenscheindauer März	−0,005	0,001	−3,631	< 0,001	***
Sonnenscheindauer April	0,005	0,001	9,213	< 0,001	***
Sonnenscheindauer Juni	−0,006	0,001	−7,404	< 0,001	***
Dummy A-Weizen [b)]	0,518	0,048	10,718	< 0,001	***

Temperatur: Summe der täglichen Durchschnittstemperaturen in einem Kalendermonat
Niederschlag: Summe der täglichen Niederschläge in einem Kalendermonat
Sonnenscheindauer: Summe der täglichen Sonnenscheinstunden in einen Kalendermonat
Im Zuge der Variablenselektion wurden die folgenden Variablen nicht in das Modell aufgenommen: Temperatur April, Niederschlag April, Niederschlag Mai, Niederschlag Juni, Sonnenscheindauer Mai
Die Random Intercepts sind nicht statistisch signifikant von Null verschieden (p = 0,200)
Marginales R^2 = 0,523, konditionales R^2 = 0,540, berechnet gemäß NAKAGAWA und SCHIELZETH (2013);
AIC des Startmodells = 615; AIC des reduzierten Modells = 563
[a)] 16 Wetterstation-Regionen über 12 Jahre mit n = 352 Beobachtungen; * p < 0,05, ** p < 0,01, *** p < 0,001
[b)] 1 = A-Weizen, 0 = B-Weizen

teingehalt durch die im Modell enthaltenen Variablen erklärt werden. Weitere 1,7% können durch den regionensspezifischen Random Intercept erklärt werden, der nicht statistisch signifikant von Null verschieden ist.[1] Die Dummy-Variable „A-Weizen“ ist, wie zu erwarten, signifikant positiv.

Das Modell wurde weiterführend validiert. Die Nullhypothese der Normalverteilung der Residuen kann in einem Shapiro-Wilk Test ($p = 0{,}400$) und einem Anderson-Darling Test ($p = 0{,}700$) nicht abgelehnt werden. Zudem kann in einem Breusch-Pagan Test die Nullhypothese homoskedastischer Residuen ebenfalls nicht abgelehnt werden ($p = 0{,}300$). Darüber hinaus wurden die Varianzinflationsfaktoren (VIF) der im Modell enthaltenen Variablen berechnet, die in Tab. 3 angezeigt sind.

Die VIF weisen einen Maximalwert von 2,47 auf, was nur auf eine mäßige Korrelation der Wettervariablen untereinander hindeutet. Gemäß KLEINBAUM et al. (1988:210) beträgt der kritische Wert für den VIF, ab dem ein Multikollinearitätsproblem erwartet werden kann, 10. Folglich kann davon ausgegangen werden, dass die Schätzer nicht durch Multikollinearität verzerrt sind.

Der Zusammenhang zwischen den beobachteten Proteinwerten und den mit dem Vorhersagemodell berechneten Werten ist in Abb. 2 graphisch dargestellt. Die geschätzten Proteingehalte wurden anhand der Random Intercepts und der fixen Effekte berechnet. Eine starke Korrelation der beobachteten und der geschätzten Proteingehalte ist zu erkennen. Dies wird durch den Korrelationskoeffizienten zwischen den beobachteten und prognostizierten Proteingehalten unterstrichen, der 0,740 ($p < 0{,}001$) beträgt. Hieraus wird auf eine gute Performance des Vorernte-Vorhersagemodells geschlossen.

Darüber hinaus wird das Modell auf Grundlage von mehreren Testdatensätzen evaluiert. Zur Erstellung dieser Testdatensätze wurde jeweils ein Jahr aus dem Gesamtdatensatz ausgeschlossen. Anschließend wurde das Modell auf Basis der Daten der verbleibenden Jahre geschätzt und die Variablen nach AIC selektiert. Mit diesen Schätzergebnissen wurden die Proteingehalte anhand der Wetterdaten des Jahres, das im Vorfeld aus dem Datensatz herausgenommen wurde, berechnet und mit den in eben diesem Jahr beobachteten Proteingehalten verglichen. Dieses Verfahren wurde für jedes Jahr wiederholt, sodass jedes Jahr einmal aus den Schätzungen herausgenommen wurde. Die auf diese Weise für jedes Jahr basierend auf den Random Intercepts und den fixen Effekten berechneten Porteingehalte und die beobachteten Proteingehalte für die einzelnen Stationen des jeweiligen Jahres sind in Abb. 3 dargestellt.

Die Korrelationskoeffizienten, die für die prognostizierten und beobachteten Proteingehalte der einzelnen Jahre berechnet wurden (Tab. 4), unterstreichen die gute Prognosegüte der Vorernte-Vorhersagemodelle. Ein-

Tab. 3. Varianzinflationsfaktoren der im reduzierten Vorernte-Vorhersagemodell für Weizen enthaltenen Wettervariablen

Variablen	VIF
Temperatur März	1,54
Temperatur Mai	2,12
Temperatur Juni	2,47
Niederschlag März	2,08
Sonnenscheindauer März	2,20
Sonnenscheindauer April	1,32
Sonnenscheindauer Juni	2,05

[1] Für einen weiteren Robustheitstest der gemischten Modelle wurden zusätzlich verschiedene Paneldatenmodelle geschätzt (Fixed Effects Modelle, Random Effects Modelle sowie gepoolte Modelle). Die Ergebnisse weisen hinsichtlich der Vorzeichen, Koeffizienten und Signifikanzen nur quantitative Unterschiede auf. Dieses zeigt die Robustheit der Ergebnisse des Random Intercept Modells. Im Vergleich mit den Paneldatenmodellen bietet das Random Intercept Modell den Vorteil, dass die zufälligen Effekte der unterschiedlichen Wetterstation-Regionen direkt ausgewiesen werden können.

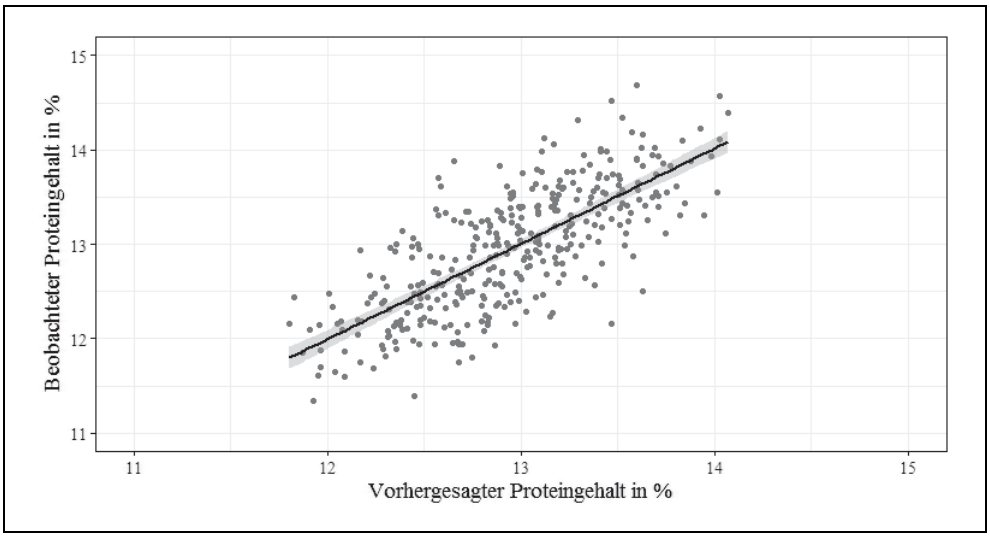

Abb. 2. Beziehung der beobachteten und vorhergesagten Proteinwerte mit einem 95%-Konfidenzintervall.

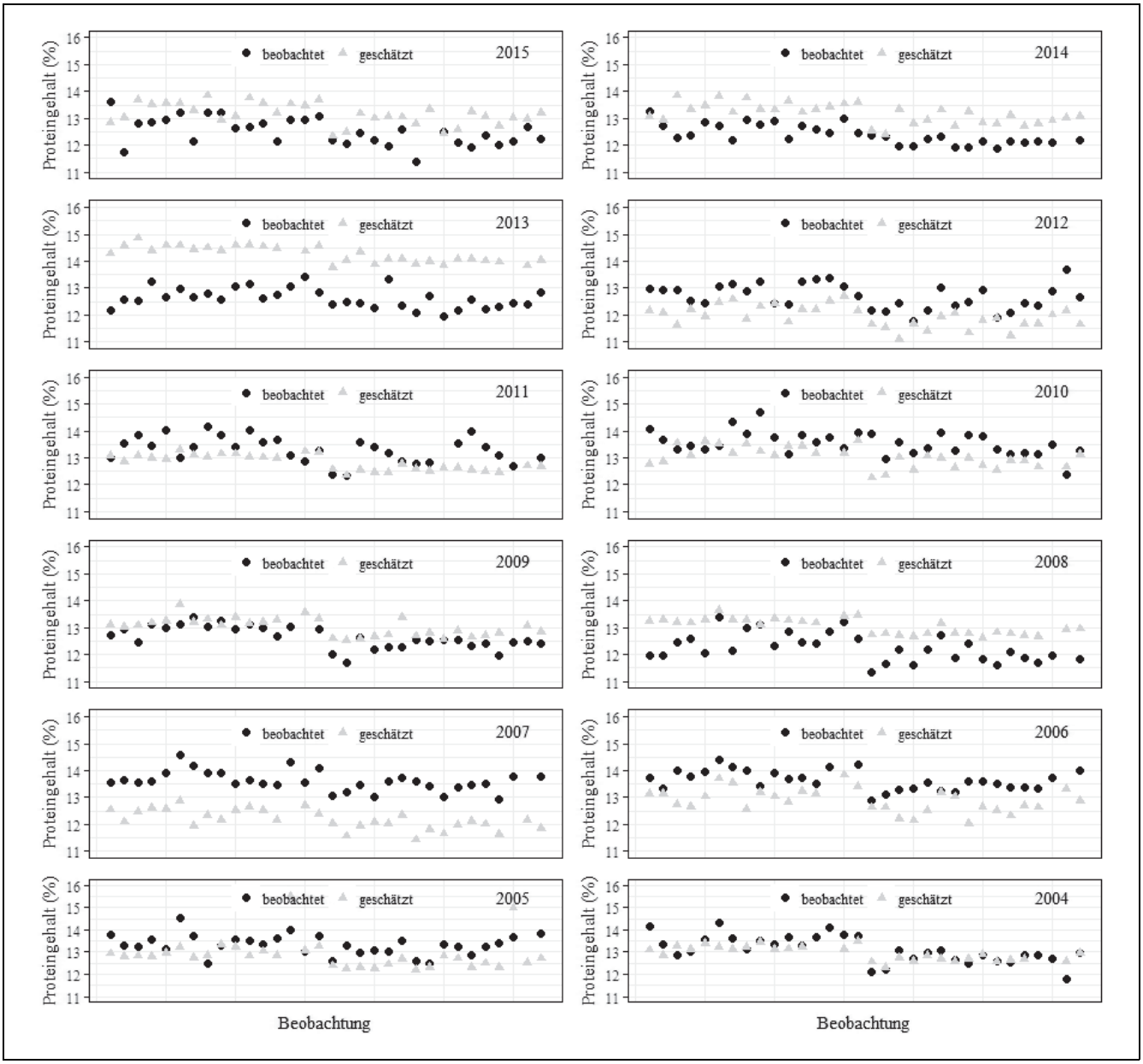

Abb. 3. **Vergleich der auf Grundlage der Testdatensätze kalkulierten Proteingehalte mit den tatsächlichen Proteingehalten.**

zig die Korrelationskoeffizienten der geschätzten und beobachteten Proteingehalte der Jahre 2010 (p = 0,159) und 2011 (p = 0,075) sind nicht auf dem 95% Niveau signifikant.

Hypothesenüberprüfung

Im Folgenden werden die aus der Literatur hergeleiteten Hypothesen anhand der Ergebnisse der Vorernte-Vorhersagemodelle überprüft.

H1 „Temperatur". Für die Hypothese 1 wurde aus der Literatur herausgearbeitet, dass für die Temperatur ein positiver Einfluss auf den Proteingehalt im Weizen zu erwarten ist. Das hier geschätzte Prognosemodell zeigt negative, signifikante Effekte der Temperatursummen von März und Mai auf den Proteingehalt. Für Juni ist der Koeffizient positiv und vom Wert her deutlich größer. Der Einfluss der Temperatur auf den Proteingehalt ist demnach im Juni, dem Monat der Kornfüllungsphase des Weizens, am stärksten. Je wärmer es zu dieser Zeit ist, umso höher ist der Proteingehalt im Erntegut. Dieser Zusammenhang ist aus der Literatur gut bekannt. Auch BLUMENTHAL et al. (1993), RAO et al. (1993), JOHANSSON und SVENSSON (1998), SMITH und GOODING (1999), DANIEL und TRIBOI (2000), PAN et al. (2006) und LEE et al. (2013) ermitteln eine positive Wirkung der Temperatur auf den Proteingehalt explizit für die Phase der Kornfüllung.

Der negative Einfluss der Temperatur in den Wachstumsmonaten März und Mai ist in bisherigen Studien zum Proteingehalt im Weizen nicht zu finden. Einzig für

Tab. 4. Korrelationskoeffizienten der auf Basis der Testdatensätze kalkulierten und der tatsächlichen Proteingehalte [a)]

Jahr	Korrelationskoeffizient	p-Wert	
2015	0,400	0,022	*
2014	0,430	0,017	*
2013	0,510	0,004	**
2012	0,620	< 0,001	***
2011	0,340	0,075	
2010	0,260	0,159	
2009	0,680	< 0,001	***
2008	0,720	< 0,001	***
2007	0,520	0,004	**
2006	0,480	0,009	**
2005	0,510	0,003	**
2004	0,770	< 0,001	***

[a)] * p < 0,05, ** p < 0,01, *** p < 0,001

Tritikale beschreiben ALARU et al. (2003) eine negative Wirkung der Temperatur auf den Proteingehalt nach der Winterruhe. RHARRABTI et al. (2001) untersuchen die Beziehung des Weizenertrags und des Proteingehalts und stellen einen starken, negativen Zusammenhang fest. Vermutlich wirken höhere Temperaturen zu Beginn des Frühjahrs positiv auf die Ertragsentwicklung und durch den Verdünnungseffekt höherer Erträge negativ auf den Proteingehalt (PARTRIDGE und SHAYKEWICH, 1972; CAMPELL et al., 1981). Aufgrund dieser Ergebnisse kann die Gültigkeit von H1 nur eingeschränkt, d.h. nur für die Phase der Kornfüllung im Juni, nachgewiesen werden.

H2 „Niederschlag". Für die monatlichen Niederschlagssummen ergibt sich in dem Prognosemodell für den Monat März ein signifikanter, negativer Koeffizient. Die übrigen Monate wurden in der Variablenselektion nach AIC nicht in das Modell aufgenommen. Der Zusammenhang zwischen der Niederschlagssumme und dem Proteingehalt lässt sich demnach folgendermaßen beschreiben: Je mehr Niederschläge fallen, umso geringer ist der Proteingehalt im Erntegut. Auch aus der Literatur ist bekannt, dass Niederschläge im Frühjahr sich negativ auf den Proteingehalt auswirken (SMITH und GOODING, 1999; ALARU et al., 2003; DALLA MARTA et al., 2011; GUASCONI et al., 2011). Zusammenfassend kann Hypothese 2 somit angenommen werden.

H3 „Sonnenscheindauer". Hypothese 3 beschreibt, dass die Sonnenscheindauer im Frühjahr einen negativen und während der Kornfüllungsphase einen positiven Einfluss auf den Proteingehalt hat. Wie aus den Ergebnissen der Vorhersagemodelle hervorgeht, hat die Summe der Sonnenscheinstunden für die Prognose des Proteingehalts im Weizen anhand von Wetterinformationen eine große Bedeutung. Der Einfluss der Sonnenscheindauer auf den Proteingehalt ist im März und Juni negativ, im April dagegen positiv. Eine über alle Frühjahrsmonate einheitliche Wirkungsrichtung der Sonnenscheindauer auf den Proteingehalt kann nicht bestimmt werden, was aus der bereits bestehenden Literatur auch nicht möglich ist. Allerdings stimmen die wenigen Aussagen, die zum Zusammenhang der Sonnenscheindauer und dem Proteingehalt in der Literatur zu finden sind, mit den hier ermittelten Ergebnissen überein (JOHANSSON und SVENSSON, 1998; LEE et al., 2013).

Schlussfolgerungen

Auf dem Weizenmarkt stehen die kontraktlichen Forderungen nach einer gleichbleibenden Weizenqualität gemessen am Proteingehalt einer Variabilität des Proteingehalts gegenüber. Diese Variabilität ist neben unterschiedlicher Düngung oder verschiedenen Sorten vor allem durch das Wetter bedingt, wobei die genauen Auswirkungen des Wetters auf den Proteingehalt von Weizen in Deutschland bislang nicht bekannt sind. Der vorliegende Beitrag untersucht daher den Einfluss der meteorologischen Parameter „Temperatur", „Niederschlag" und „Sonnenscheindauer" auf den Proteingehalt von Weizen im Nordosten Deutschlands und entwickelt anhand dieser Wetterinformationen ein Vorernte-Vorhersagemodell für den Proteingehalt. Dazu wird ein gemischtes Regressionsmodell (Random Intercept Modell) auf der Basis von Wetterinformationen von 16 Wetterstationen des Bundeslandes Mecklenburg-Vorpommern und Proteindaten von 148.800 Weizenproben aus den Jahren 2004 bis 2015 geschätzt. Das Random Intercept Modell wird als Vorernte-Vorhersage über die Wetterparameter der Frühjahrsmonate März bis Juni für den 1. Juli terminiert.

Die Ergebnisse des Prognosemodells zeigen eine gute Vorhersageperformance. Anhand der Parameter der Temperatursumme, der Niederschlagsmengen und der Sonnenscheindauer können 52,3% der jährlichen Varianz des Proteingehalts erklärt werden. Zudem ist das geschätzte Random Intercept Modell von hoher Robustheit. Der bedeutendste Wetterparameter für den Proteingehalt des Weizens ist die Temperatur. Je höher die Temperatursumme in der Kornfüllungsphase ist, umso höher ist der Proteingehalt im Weizen. Während der Wachstumsperiode von März und Mai ist die Wirkung der Temperatur auf den Proteingehalt jedoch negativ. Für die Niederschlagsmengen verdeutlichen die Vorernte-Vorhersagemodelle einen negativen Zusammenhang zum Proteingehalt. Des Weiteren hat die Sonnenscheindauer einen signifikanten Einfluss auf die Proteinbildung des Weizens. Eine Wirkungsrichtung der Höhe der Sonnenscheindauer auf den Proteingehalt kann jedoch nicht einheitlich über alle Frühjahrsmonate bestimmt werden.

Für das entwickelte Prognosemodell ergibt sich ein sehr hohes Anwendungspotenzial. Landwirte können ihre produktionstechnischen Entscheidungen zum Ende der Wachstumsperiode auf den zu erwartenden Proteingehalt anpassen. Außerdem können sie ihre Vermark-

tungsstrategie bestimmen. Ist der zu erwartende Proteingehalt bekannt, kann die Qualität beispielsweise beim Abschluss von Forwardkontrakten fixiert werden, was zum Beispiel auch zu erwartende Deckungsbeiträge absichert. Somit resultiert aus Informationen über den zu erwartenden Proteingehalt im Weizen eine höhere Planungssicherheit für den Landwirt. Der Landhandel kann die Vorernte-Vorhersage nutzen, um bereits vor der Ernte Verkaufskontrakte und Risikoabsicherungsmöglichkeiten strategisch fundiert zu planen (Lee et al., 2013). Beispiele sind hier der Auf- beziehungsweise Abbau von Lagerbeständen. Auch können die Ergebnisse für die Entwicklung eines lokalen Qualitäts-Prognosesystems verwendet werden, um Erzeuger, Händler und die Weizenverarbeiter mit Informationen hinsichtlich der zu erwartenden Weizenqualität der kommenden Ernte zu versorgen (Dalla Marta et al., 2011).

Ausblick

Für weiterführende Forschung ist es interessant, den Einfluss der Wetterparameter „Temperatur", „Niederschlag" und „Sonnenscheindauer" auf andere Qualitätsparameter wie beispielsweise die Fallzahl oder den Stärkegehalt zu untersuchen. Außerdem sollten Vorhersagemodelle für weitere wichtige Ackerbauregionen in Deutschland geschätzt werden, um die Generalisierbarkeit der Modellergebnisse zu analysieren. Zusätzlicher Forschungsbedarf besteht insbesondere hinsichtlich des Einflusses der Sonnenscheindauer auf den Proteingehalt, um die Validität der nur in geringem Ausmaß vorhandenen Informationen aus der Literatur sowie der vorliegenden Ergebnisse zu überprüfen. Zudem könnte der Einfluss weiterer Wetterparameter wie Globalstrahlung oder das Bodenwasserpotential analysiert werden, die nur eingeschränkt verfügbar sind. Darüber hinaus könnte eine gezieltere Analyse des Einflusses der Wettervariablen auf die physiologischen Prozesse in der Pflanze erfolgen, anhand derer der Einfluss auf den Proteingehalt genauer erklärt werden kann. Schließlich könnte in nachfolgenden Untersuchungen auch die Verwendung von Wetterversicherungen auf Basis der Resultate aus den Vorernte-Vorhersagemodellen zur Risikoabsicherung der Schwankungen im Proteingehalt analysiert werden.

Literatur

Alaru, M., Ü. Laur, E. Jaama, 2003: Influence of nitrogen and weather conditions on the grain quality of winter triticale. Agronomy Research **1** (1), 3-10.

Alsing, I., A. Fleischmann, 2002: Lexikon Landwirtschaft. [pflanzliche Erzeugung, tierische Erzeugung, Landtechnik/Bauwesen, ökologischer Landbau, Betriebslehre, landwirtschaftliches Recht], 4. Auflage. Stuttgart (Hohenheim), Ulmer, 909 S.

Bates, D., M. Mächler, B. Bolker, S. Walker, 2015: Fitting linear mixed-effects models using lme4. Journal of Statistical Software **67** (1), 1-48.

Benzian, B., P.W. Lane, 1986: Protein concentration of grain in relation to some weather and soil factors during 17 years of English winter-wheat experiments. Journal of the Science of Food and Agriculture **37** (5), 435-444.

Blumenthal, C.S., E.W.R. Barlow, C.W. Wrigley, 1993: Growth environment and wheat quality: The effect of heat stress on dough properties an gluten proteins. Journal of Cereal Science **18** (1), 3-21.

Campell, C.A., H.R. Davidson, 1979: Effect of temperatur, nitrogen fertilization and moisture stress on yield, yield components, protein content and moisture use efficiency of Manitou spring wheat. Canadian Journal of Plant Science **59** (4), 963-974.

Campell, C.A., H.R. Davidson, G.E. Winkelman, 1981: Effect of nitrogen, temperature, growth stage, and duration of moisture stress on yield components and protein content of Manitou spring wheat. Canadian Journal of Plant Science **61** (3), 549-563.

Ciaffi, M., L. Tozzi, B. Borghi, M. Corbellini, D. Lafiandra, 1996: Effect of heat shock during grain filling on the gluten protein composition of bread wheat. Journal of Cereal Science **24** (2), 91-100.

Climate Data, 2016: Klima Mecklenburg-Vorpommern [Climate Mecklenburg-Western Pomerania]. http://de.climate-data.org/region/423 (15. September 2016).

Correll, R., J. Butler, L. Spouncer, C. Wrigley, 1994: The relationship between grain protein content of wheat and barley and temperatures during grain filling. Australian Journal of Plant Physiology **21** (6), 869-873.

Dalla Marta, A., D. Grifoni, M. Mancini, G. Zipoli, S. Orlandini, 2011: The influence of climate on durum wheat quality in Tuscany, Central Italy. Int. J. Biometeorol **55** (1), 87-96.

Daniel, C., E. Triboi, 2000: Effects of temperature and nitrogen nutrition on the grain composition of winter wheat: Effects on gliadin content and composition. J. Cereal Sci. **32** (1), 45-56.

Dixon, B.L., S.E. Hollinger, P. Garcia, V. Tirupattur, 1994: Estimating corn yield response models to predict impact of climate change. J. Agr. Resour. Econ. **19** (1), 58-68.

Fahrmeir, L., T. Kneib, S. Lang, B. Marx, 2013: Regression. Models, methods and applications. Dordrecht, Springer.

FAO, 2002: Bread wheat improvement and production. Roma, Italy.

Flagella, Z., M.M. Giuliani, L. Giuzio, C. Volpi, S. Masci, 2010: Influence of water deficit on durum wheat storage protein composition and technological quality. Eur. J. Agron. **33** (3), 197-207.

Gooding, M.J., R.H. Ellis, P.R. Shewry, J.D. Schofield, 2003: Effects of restricted water availability and increased temperature on the grain filling, drying and quality of winter wheat. J. Cereal Sci. **37** (3), 295-309.

Gooding, M.J., G. Smith, W.P. Davies, P.S. Kettlewell, 1997: The use of residual maximum likelihood to model grain quality characters of wheat with variety, climatic and nitrogen fertilizer effects. J. Agric. Sci. **128** (2), 135-142.

Graybosch, R.A., C.J. Peterson, P.S. Baenziger, D.R. Shelton, 1995: Environmental modification of hard red winter wheat flour protein composition. J. Cereal Sci. **22** (1), 45-51.

Guasconi, F., A.D. Marta, D. Grifoni, M. Mancini, F. Orlando, S. Orlandini, 2011: Influence of climate on durum wheat production and use of remote sensing and weather data to predict quality and quantity of harvests. Italian Journal of Agrometeorology **3** (1), 21-28.

Haberle, J., P. Svoboda, I. Raimanova, 2008: The effect of post-anthesis water supply on grain nitrogen concentration and grain nitrogen yield of winter wheat. Plant, Soil and Environment **54** (7), 304-312.

Hopkins, J.W., 1968: Protein content of western Canadian hard red spring wheat in relation to some environmental factors. Agricultural Meteorology **5** (6), 411-431.

IGC, 2016: Grain Market Report 469 des International Grains Council vom 25. August 2016. London.

Jarvis, C.K., H.D. Sapirstein, P.R. Bullock, H.A. Naeem, S.V. Angadi, A. Hussain, 2008: Models of growing season weather impacts on breadmaking quality of spring wheat from producer fields in Western Canada. Journal of the Science of Food and Agriculture **88** (13), 2357-2370.

Johansson, E., G. Svensson, 1998: Variation in bread-making quality. Effects of weather parameters on protein concentration and quality in some Swedish wheat cultivars grown during the period 1975-1996. Journal of the Science of Food and Agriculture **78** (1), 109-118.

Kleinbaum, D.G., L.L. Kupper, K.E. Muller, 1988: Applied Regression Analysis and other Multivariate Methods, 2d ed., PWS-Kent, Boston, Mass.

Lee, B.-H., P. Kenkel, B.W. Brorsen, 2013: Pre-harvest forecasting of county wheat yield and wheat quality using weather information. Agric. For. Meteorol. **168** (1), 26-35.

Nakagawa, S., H. Schielzeth, 2013: A general and simple method for obtaining R^2 from generalized linear mixed-effects models. Methods in Ecology and Evolution **4**, 133-142.

PAN, J., Y. ZHU, W. CAO, T. DAI, D. JIANG, 2006: Predicting the protein content of grain in winter wheat with meteorological and genotypic factors. Plant Prod. Sci. **9** (3), 323-333.
PARTRIDGE, J.R.D., C.F. SHAYKEWICH, 1972: Effects of nitrogen, temperature, and moisture regime on the yield and protein content of Neepawa wheat. Canadian Journal of Soil Science **52** (2), 179-185.
QIAN, B., R. DE JONG, R. WARREN, A. CHIPANSHI, H. HILL, 2009: Statistical spring wheat yield forecasting for the Canadian prairie provinces. Agric. For. Meteorol. **149** (6-7), 1022-1031.
RANDALL, P.J., H.J. MOSS, 1990: Some effects of temperature regime during grain filling on wheat quality. Australian Journal of Agricultural Research **41** (4), 603-617.
RAO, A.C.S., J.L. SMITH, V.K. JANDHYALA, R.I. PAPENDICK, J.F. PARR, 1993: Cultivar and climatic effects on the protein content of soft white winter wheat. Agron. J. **85** (5), 1023-1028.
RHARRABTI, Y., D. VILLEGAS, L.F.G. DEL MORAL, N. APARICIO, S. ELHANI, C. ROYO, 2001: Environmental and genetic determination of protein content and grain yield in durum wheat under Mediterranean conditions. Plant Breed. **120** (5), 381-388.
SCHLEHUBER, A.M., B.B. TUCKER, 1959: Factors affecting the protein content of wheat. Cereal Science Today **4** (1), 240-242.
SMITH, G.P., M.J. GOODING, 1999: Models of wheat grain quality considering climate, cultivar and nitrogen effects. Agric. For. Meteorol. **94** (3-4), 159-170.
SPIERTZ, J.H.J., 1977: The influence of temperature and light intensity on grain growth in relation to the carbohydrate and nitrogen economy of the wheat plant. Netherlands Journal of Agricultural Science **25** (1), 182-197.
STATISTISCHES BUNDESAMT, 2016: Land- und Forstwirtschaft, Fischerei: Wachstum und Ernte – Feldfrüchte – Juli/August 2016. Wiesbaden.
STONE, P.J., R. SAVIN, 1999: Grain quality and its physiological determinants. In: E. H. SATORRE, G. A. SLAFER (Hrsg.): Wheat. Ecology and physiology of yield determination. New York, Food Products Press, 503 S., 114-122.
STRATEGIE GRAINS, 2014: Grain Report 257 vom 15. Mai 2014. Moret-Sur-Loing, France.
TAYLOR, A.C., A.R. GILMOUR, 1971: Wheat protein prediction from climatic factors in southern NSW. Australian Journal of Experimental Agriculture **11** (52), 546-549.
UHLEN, A.K., R. HAFSKJOLD, A.-H. KALHOVD, S. SAHLSTRÖM, Å. LONGVA, E.M. MAGNUS, 1998: Effects of cultivar and temperature during grain filling on wheat protein content, composition and dough mixing properties. Cereal Chemistry. Cereal Chemistry **75** (4), 460-465.
WHEELER, T.R., G.R. BATTS, R.H. ELLIS, P. HADLEY, J.I.L. MORISON, 1996: Growth and yield of winter wheat (Triticum aestivum) crops in response to CO2 and temperature. The Journal of Agricultural Science **127** (01), 37-48.
WITTCHEN, U., J. SCHWARZ, E. MOLL, 2011: Agrarmeteorologische Stationen: Vergleich der „vor Ort" gewonnenen Wetterdaten mit denen umliegender offizieller Wetterstationen. Journal für Kulturpflanzen **63** (8), 259-269.
WOOLFOLK, C.W., W.R. RAUN, G.V. JOHNSON, W.E. THOMASON, R.W. MULLEN, K.J. WYNN, K.W. FREEMAN, 2002: Influence of late-season foliar nitrogen applications on yield and grain nitrogen in winter wheat. Agronomy Journal **94** (3), 429-434.