

Schätzung von Futtereffizienz und Stoffwechselgesundheit von Milchkühen mit Hilfe von MIR-Spektren

Estimation of feed efficiency and metabolic health of dairy cows using MIR spectroscopy

Stefan Gruber^{1*}, Georg Terler², Andreas Steinwidder², Thomas Guggenberger², Astrid Köck³, Christa Egger-Danner³, Birgit Fürst-Waltl¹ und Johann Sölkner¹

Zusammenfassung

Die Erhebung von Merkmalen für Stoffwechselgesundheit und Futtereffizienz von Milchkühen ist auf Praxisbetrieben schwer umsetzbar. Eine Alternative ist die Vorhersage mit Hilfe von Mittelinfrarot-(MIR-)Spektren der Milch. Diese Studie gibt einen Überblick über Entwicklung und Anwendung von Vorhersagegleichungen für Trockenmasseaufnahme (TMA), Energieaufnahme (EA) und Energiebilanz (EB) bei österreichischen Milchkühen. Die Vorhersagegleichungen wurden basierend auf MIR-Spektren und Routineinformationen aus der Milchleistungsprüfung unter Anwendung verschiedener Algorithmen des Maschinellen Lernens entwickelt, basierend auf 66.959 täglichen Beobachtungen von 34 Fleckvieh- und 91 Holstein Friesian-Kühen erhoben auf zwei Forschungsbetrieben. Im Allgemeinen wurden TMA, EA und EB mit moderater Genauigkeit vorhergesagt, mit Korrelationen zwischen 0,55 und 0,74. Die Vorhersagen erwiesen sich als robust, über Betriebe, Rassen, Laktationen und Kraftfutterniveaus hinweg. Dieser Ansatz würde eine routinemäßige Erfassung neuer Phänotypen für TMA, EA und EB in großem Maßstab für Herdenmanagement und Zuchtwertschätzung ermöglichen.

Schlagwörter: Milch Spektroskopie, Maschinelles Lernen, Energiebilanz, Trockenmasseaufnahme, Energieaufnahme

Summary

On-farm recording of traits for the evaluation of metabolic health and feed efficiency of dairy cows is hardly feasible. A potential alternative, however, is prediction based on milk mid-infrared (MIR) spectra. This study provides an overview on the development and application of prediction equations for dry matter intake (DMI), energy intake (EI), and energy balance (EB) in Austrian dairy cows. Prediction equations were developed from MIR spectra and routine milk recording information, applying different machine learning algorithms, based on a dataset comprising 66,959 daily observations from 34 Fleckvieh and 91 Holstein Friesian cows, collected on two research farms. In general, DMI, EI, and EB were predicted with moderate accuracy, with correlations ranging from 0.55 to 0.74. The prediction equations proved to be robust across farms, breeds, parities, and concentrate levels. This approach would facilitate the routine recording of

¹ BOKU University, Institut für Nutztierwissenschaften, Gregor-Mendel-Straße 33, A-1180 Wien

² HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Raumberg 38, A-8952 Irdning-Donnersbachtal

³ ZuchtData EDV-Dienstleistungen GmbH, Dresdner Straße 89, A-1200 Wien

* Ansprechpartner: DDI Stefan Gruber, email: stefan.gruber@boku.ac.at

novel phenotypes for DMI, EI and EB on a large scale for herd management and genetic evaluation systems.

Keywords: milk spectroscopy, machine learning, energy balance, dry matter intake, energy intake

Einleitung

Gesundheits- und Effizienzmerkmale gewinnen in modernen Zuchtzielen von Milchkühen zunehmend an Bedeutung. Besonders im Fokus steht die Stoffwechselgesundheit, welche vorwiegend in der Früh-laktation beeinträchtigt sein kann. In diesem Laktationsstadium kann der durch hohe Milchleistungen entstehende Energiebedarf oftmals nicht ausreichend durch die tägliche Energieaufnahme gedeckt werden, woraus eine negative Energiebilanz (EB) resultiert (COLLARD et al. 2000). Um dieses Energiedefizit zu kompensieren, werden Körperreserven, hauptsächlich Fettdepots, mobilisiert. Sowohl dieser Mobilisierungsprozess als auch die negative EB belasten den Stoffwechsel, was in weiterer Folge negative Auswirkungen auf Milch- und Reproduktionsleistung sowie Gesundheitszustand und Wohlbefinden hat (DUFFIELD et al. 2009). Die Energiebilanz ist demnach ein wertvolles Merkmal zur Beurteilung der Stoffwechselgesundheit der Milchkuh. Ein weiteres besonders relevantes Merkmal in aktuellen Zuchtstrategien ist die Futtereffizienz. Kühe, die Futter effizienter verwerten, leisten sowohl einen Beitrag zur verbesserten Rentabilität als auch zur ökologischen Nachhaltigkeit der Milchwirtschaft. Um die Futtereffizienz zu quantifizieren, wird häufig die in der Milch umgesetzte Energie der über das Futter aufgenommenen Energie gegenübergestellt, unter Berücksichtigung der Veränderungen von Körperreserven. Nachdem die Milchleistung routinemäßig erhoben wird, wäre zur Beurteilung der Futtereffizienz daher zusätzlich die tägliche Trockenmasseaufnahme (TMA) beziehungsweise Energieaufnahme (EA) notwendig.

Die Erhebung der zuvor genannten Merkmale erfordert auf Praxisbetrieben allerdings hohen Aufwand und verursacht hohe Kosten, was dafür verantwortlich ist, dass jene Merkmale aktuell gar nicht bis nur sehr eingeschränkt für Herdenmanagement und Zuchtwertschätzung verfügbar sind. Eine potenzielle Alternative stellt in diesem Zusammenhang die Schätzung dieser Merkmale über die Nutzung von Mittelinfrarot-(MIR-) Spektren aus der Milch dar. MIR-Spektren fungieren als molekularer Fingerabdruck der Milch und erlauben die Quantifizierung ihrer chemischen Zusammensetzung. In Österreich werden MIR-Spektren routinemäßig in der Milchleistungsprüfung zur Bestimmung von Fett, Eiweiß und Laktose erhoben und sind deshalb in großem Umfang vorhanden. Einige Studien haben mittlerweile nachgewiesen, dass MIR-Spektren auch zur Schätzung verschiedener Merkmale geeignet sind, die im Zusammenhang mit der Milchzusammensetzung stehen, darunter Energiebilanz (McPARLAND et al. 2011, ROVERE et al. 2024) oder Trockenmasseaufnahme (WALLEN et al. 2018). Dieser Beitrag soll einen Überblick über die Entwicklung und Anwendung von Schätzgleichungen auf Basis von MIR-Spektren für die Merkmale Trockenmasseaufnahme, Energieaufnahme und Energiebilanz bei österreichischen Milchkühen geben.

Material und Methoden

Die Grundlage für die Entwicklung der Vorhersagegleichungen bildete ein Datensatz, der zwischen 2014 und 2021 auf den beiden Forschungsbetrieben der HBLFA Raumberg-Gumpenstein erhoben wurde. Der Datensatz umfasste tägliche Aufzeichnungen zu Trockenmasseaufnahme (kg), Energieaufnahme (MJ ME), Milchmenge, Milch Inhaltsstoffen, Körpergewicht sowie MIR-Spektren zwischen dem 5. und 305. Laktationstag. Die tägliche Energiebilanz wurde darauf aufbauend nach GfE (2023) in MJ ME berechnet. Die MIR-Spektren wurden von täglichen Milchproben mittels eines Spektrometers (FOSS Analytical,

Hillerød, Dänemark) analysiert und umfassten 1.060 Absorptionswerte von Infrarotlicht im Wellenzahlbereich von 926 bis 5.010 cm⁻¹. Insgesamt standen Aufzeichnungen von 91 Holstein Friesian- und 34 Fleckvieh-Kühen zur Verfügung, wobei 64.988 Aufzeichnungen auf den Betrieb RG und 1.971 Aufzeichnungen auf den Betrieb MH entfielen.

Zur Entwicklung der Vorhersagegleichungen wurden drei verschiedene Regressionsmethoden des Maschinellen Lernens verglichen: Partial Least Squares, Support Vector Machine und Artificial Neural Network. Als Vorhersagevariablen wurden Kombinationen aus Routineinformationen aus der Milchleistungsprüfung (Milchmenge, Milchhaltsstoffe, Laktation, Laktationstag) und einer Vorselektion der 212 informativsten MIR-Spektralvariablen (GRELET et al. 2016) evaluiert. Die Genauigkeit der Vorhersagegleichungen wurde anhand zweier Validierungsszenarien bewertet: (1) einer 10-fachen externen Validierung nach Kühen innerhalb des RG-Datensatzes, bei der Daten von 70 % der Kühe zur Kalibrierung verwendet wurden und die verbleibenden 30 % zur Validierung, und (2) einer externen Validierung nach Betrieb, indem die Vorhersagegleichungen basierend auf dem RG-Datensatz kalibriert und auf dem MH-Datensatz validiert wurden. Zudem wurde der Einfluss von Laktation, Rasse sowie Fütterungsintensität (Kraftfutteranteil in der Ration) auf die Schätzgenauigkeit der jeweiligen Merkmale evaluiert.

Ergebnisse

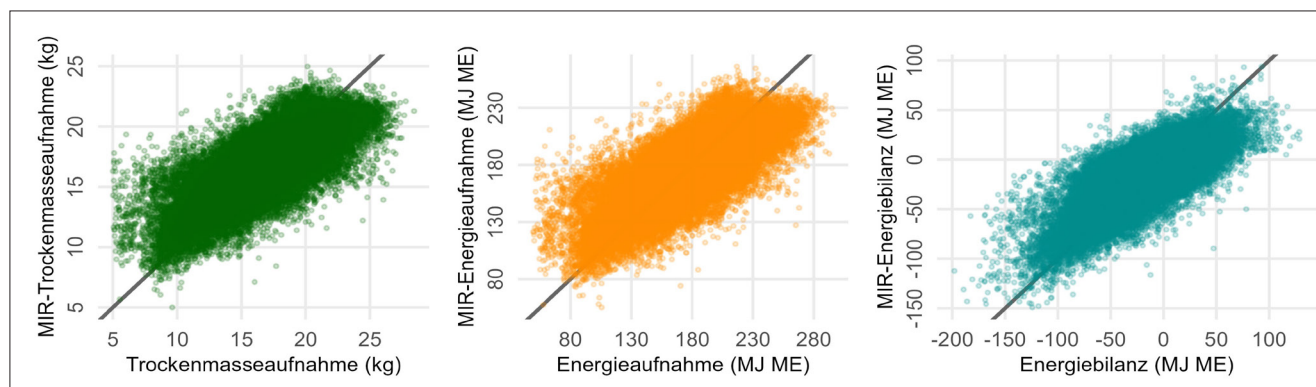
Insgesamt konnten sowohl die Trockenmasseaufnahme, die Energieaufnahme als auch die Energiebilanz mit moderater Genauigkeit mit Hilfe von MIR-Spektren und Routineinformationen aus der Milchleistungsprüfung vorhergesagt werden. Der Vergleich unterschiedlicher Prädiktorvariablen hat gezeigt, dass die höchste Genauigkeit bei der Vorhersage aller Merkmale erzielt wird, wenn die 212 MIR-Spektren mit Milchmenge und Laktation als Prädiktoren kombiniert wurden. Die nachfolgenden Ergebnisse sind entsprechend auch für diese Kombination von Prädiktorvariablen dargestellt. Bei externer Validierung nach Kühen wurden für alle drei Merkmale Korrelationen zwischen 0,68 und 0,74 erzielt, wobei die Energiebilanz am genauesten vorhergesagt wurde (Tabelle 1, Abbildung 1). Die EB wurde mit einer durchschnittlichen Abweichung von 23,0 bis 23,6 MJ

Tabelle 1: Ergebnisse zur Vorhersagegenauigkeit von Trockenmasseaufnahme, Energieaufnahme und Energiebilanz bei externer Validierung nach Kühen

Merkmal	Partial Least Squares		Support Vector Machine		Artificial Neural Network	
	r	RMSE	r	RMSE	r	RMSE
Trockenmasseaufnahme (kg)	0,71	2,4	0,70	2,4	0,71	2,4
Energieaufnahme (MJ ME)	0,73	23,9	0,71	24,3	0,68	25,1
Energiebilanz (MJ ME)	0,74	23,0	0,72	23,6	0,71	23,5

r = Korrelation zwischen tatsächlichem und vorhergesagtem Wert, RMSE = Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers.

Abbildung 1: Vergleich zwischen tatsächlichem und MIR-geschätztem Wert für Trockenmasseaufnahme, Energieaufnahme und Energiebilanz bei externer Validierung nach Kühen



ME vom tatsächlichen Wert geschätzt. Für die TMA ergab sich eine durchschnittliche Abweichung von 2,4 kg und bei der EA von 23,9 bis 25,1 MJ ME.

Bei Anwendung der am RG-Datensatz kalibrierten Gleichungen auf den MH-Datensatz verringerte sich die Genauigkeit der Vorhersagen leicht, die Modelle erwiesen sich aber weiterhin als robust (Tabelle 2). Am besten funktionierte die Vorhersage der EA mit einer Korrelation von 0,68, gefolgt von der TMA mit 0,63, während die EB mit 0,59 die niedrigste Korrelation aufwies.

Tabelle 2: Ergebnisse zur Vorhersagegenauigkeit von Trockenmasseaufnahme, Energieaufnahme und Energiebilanz bei externer Validierung nach Kühen

Merkmal	Partial Least Squares		Support Vector Machine		Artificial Neural Network	
	r	RMSE	r	RMSE	r	RMSE
Trockenmasseaufnahme (kg)	0,63	2,4	0,63	2,4	0,57	2,4
Energieaufnahme (MJ ME)	0,68	25,2	0,68	25,1	0,58	26,0
Energiebilanz (MJ ME)	0,59	26,8	0,58	26,1	0,55	26,5

r = Korrelation zwischen tatsächlichem und vorhergesagtem Wert, RMSE = Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers.

In beiden Validierungsszenarien haben sich zwischen den unterschiedlichen Vorhersagemethoden nur geringe Unterschiede in der Vorhersagegenauigkeit gezeigt, wobei die Partial Least Squares Methode tendenziell die besten Ergebnisse erzielte. Für die Rasse konnte kein Effekt auf die Schätzqualität der Merkmale festgestellt werden, die Prädiktionen erzielten für Holstein Friesian und Fleckvieh dieselben Genauigkeiten. Die Implementierung von rassenspezifischen Vorhersagegleichungen, d.h. die Modellkalibrierung und -validierung ausschließlich innerhalb einer Rasse, führte außerdem zu einem Verlust an Vorhersagegenauigkeit. Auch der Einfluss der Laktation erwies sich als gering und hatte nur minimale Auswirkungen auf die Schätzgenauigkeit von TMA, EA und EB. Einen leichten Einfluss auf die Vorhersagegenauigkeit zeigte hingegen die Fütterungsintensität, auch wenn die Ergebnisse zwischen den Validierungsszenarien und Merkmalen nicht immer konsistent waren. So wurde bei der Validierung nach Kühen eine bessere Schätzgenauigkeit für TMA und EA bei mittlerem Kraftfutteranteil und für EB bei niedrigem Kraftfutteranteil in der Ration beobachtet. Weitere detaillierte Ergebnisse dazu finden sich in GRUBER et al. (2025).

Diskussion

Insgesamt haben die Analysen gezeigt, dass die Trockenmasseaufnahme, Energieaufnahme sowie Energiebilanz einer Milchkuh mit Hilfe von Milch-MIR-Spektren, Milchmenge und Laktation mit moderater Genauigkeit geschätzt werden können. Die entwickelten Vorhersagegleichungen erweisen sich zudem als ziemlich robust. Sie erreichen über Fütterungsniveaus, Laktationen und Rassen hinweg sowie bei Anwendung auf einem anderen Betrieb stabile Schätzgenauigkeiten. Aufgrund der Schwierigkeit der Erhebung von tatsächlichen Phänotypen für diese Merkmale auf Praxisbetrieben stellt die Vorhersage auf Grundlage von Spektral- und Routineinformationen demnach eine vielversprechende Alternative für deren Erhebung dar. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund, dass MIR-vorhergesagte Merkmale routinemäßig zu geringen Kosten an jedem Testtag der Milchleistungsprüfung verfügbar wären. So könnten die geschätzten Merkmale, auch ohne maximale Vorhersagegenauigkeit, im Herdenmanagement von Milchviehbetrieben Anwendung finden. Beispielsweise für das Monitoring der Energiebilanz frischlaktierender Kühe, um jene Tiere frühzeitig zu erkennen, deren Stoffwechselfgesundheit gefährdet sein könnte. Außerdem könnten alle drei Merkmale im Fütterungsmanagement integriert werden, um die Fütterung gezielter an das Einzeltier anzupassen. Darüber hinaus bieten die MIR-geschätzten Merkmale die Möglichkeit, TMA, EA und EB als neue Merkmale in

aktuelle Zuchtwertschätzsysteme zu integrieren. Die umfangreiche Datengrundlage von MIR-geschätzten Merkmalen könnte die moderate Vorhersagegenauigkeit zumindest teilweise kompensieren und dazu beitragen, zuverlässige Zuchtwerte für diese Merkmale zu schätzen. Dem hinzu bestätigen auch erste, bislang unpublizierte Auswertungen von genetischen Parametern das Potenzial der MIR-geschätzten TMA, EA und EB für die Zuchtwertschätzung.

Auch mehrere internationale Studien bestätigen das Potenzial und die Praktikabilität der routinemäßigen Anwendung von MIR-geschätzten Merkmalen bei Milchkühen im Zusammenhang mit Stoffwechselgesundheit und Futtereffizienz (McPARLAND et al. 2011, WALLEN et al. 2018, DALE et al. 2019). Die Anwendbarkeit und Robustheit einer Vorhersagegleichung hängen jedoch wesentlich vom Datensatz ab, der zur Kalibrierung verwendet wurde. Daher ist es entscheidend, Daten aus landwirtschaftlichen Betrieben mit verschiedenen Produktionssystemen oder Fütterungsregimen zu integrieren. Dies sollte auch bei der Interpretation der zuvor dargestellten Ergebnisse bedacht werden, da die Validierung auf Basis zweier Forschungsbetriebe erfolgte und sich die Ergebnisse auf Praxisbetrieben unter Umständen anders ausfallen könnten. Abschließend, lässt sich festhalten, dass mit Hilfe von MIR-Spektren geschätzte Trockenmasseaufnahme, Energieaufnahme und Energiebilanz das Potenzial besitzen, einen praktischen Mehrwert für das Herdenmanagement auf Milchviehbetrieben zu bieten. Außerdem könnten diese Merkmale als Grundlage dienen, um Zuchtstrategien für gesündere und effizientere Kühe zu entwickeln.

Danksagungen

Ein herzlicher Dank gilt der HBLFA Raumberg-Gumpenstein für die Bereitstellung der Phänotypen und der ZuchtData EDV-Dienstleistungen GmbH für die Standardisierung der Spektren. Die Studie wurde im Rahmen des Projekts breed4green (Projekt 101813) durchgeführt, welches finanziell durch das Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft (BMLUK), die Rinderzucht AUSTRIA und andere Partner unterstützt wird.

Literatur

COLLARD, B.L., P.J. BOETTCHER, J.C.M. DEKKERS, D. PETITCLERC und L.R. SCHAEFFER, 2000: Relationships between energy balance and health traits of dairy cattle in early lactation. *J. Dairy Sci.* 83, 2683-2690.

DALE, L., A. WERNER, H. SPIEKERS, P. HERTEL-BOEHNKE, E. STAMER, F. GOLLE-LEIDREITER, M. AU und F. ONKEN, 2019: Prediction of evaluated energy balance (NEL and ME) in dairy cows by milk mid-infrared (MIR) spectra. *ICAR Technical Series no. 24*, 137-142.

DUFFIELD, T.F., K.D. LISSEMORE, B.W. McBRIDE und K.E. LESLIE, 2009: Impact of hyperketonemia in early lactation dairy cows on health and production. *J. Dairy Sci.* 92, 571-580.

GfE (Gesellschaft für Ernährungsphysiologie), 2023: Empfehlungen zur Energie- und Nährstoffversorgung von Milchkühen. DLG-Verlag, Frankfurt am Main, Germany.

GRELET, C., C. BASTIN, M. GELE, J.-B. DAVIERE, M. JOHAN, A. WERNER, R. REDING, J.A. FERNANDEZ PIERNA, F.G. COLINET, P. DARDENNE, N. GENGLER, H. SOYEURT und F. DEHARENG, 2016: Development of Fourier transform mid-infrared calibrations to predict acetone, betahydroxybutyrate, and citrate contents in bovine milk through a European dairy network. *J. Dairy Sci.* 99, 4816-4825.

GRUBER, S., G. TERLER, A. STEINWIDDER, T. GUGGENBERGER, A. KÖCK, C. EGGER-DANNER, M. MAYERHOFER, S.J. BURN, W. ZOLLITSCH, B. FUERST-WALTL und J. SÖLKNER,

2025: Application of milk mid-infrared spectroscopy for prediction of energy balance and associated traits in Fleckvieh and Holstein Friesian dairy cows. *Animal* 19,101645.

McPARLAND, S., G. BANOS, E. WALL, M.P. COFFEY, H. SOYEURT, R.F. VEERKAMPAND und D.P. BERRY, 2011: The use of mid-infrared spectrometry to predict body energy status of Holstein cows. *J. Dairy Sci.* 94, 3651-3661.

ROVERE, G., G. de los CAMPOS, G. GEBREYESUS, R.P. SAVEGNAGO und A.J. BUITENHUIS, 2024: Energy balance of dairy cows predicted by mid-infrared spectra data of milk using Bayesian approaches. *J. Dairy Sci.* 107, 1561-1576.

WALLEN, S.E., E. PRESTLOKKEN, T.H.E. MEUWISSEN, S. McPARLAND und D.P. BERRY, 2018: Milk mid-infrared spectral data as a tool to predict feed intake in lactating Norwegian Red dairy cows. *J. Dairy Sci.* 101, 6232-6243.