

MIR kann mehr: Nutzung des Infrarot-Spektrums der Milch von Kühen für Gesundheitsmanagement und Zucht

More with MIR: use of mid infrared spectra of milk for herd management and genetic improvement of cattle

Lisa Rienesl¹, Andreas Steinwidder², Astrid Köck³,
Christa Egger-Danner³ und Johann Sölkner^{1*}

Zusammenfassung

Die Mid-Infrarot (MIR) Spektroskopie von Milch ist die Methode der Wahl zur Quantifizierung ihrer Hauptinhaltsstoffe wie Fett, Protein und Laktose. In den letzten Jahren wurden zahlreiche Studien zur Bestimmung weiterer Milchkomponenten und -eigenschaften (z. B. Fettsäuremuster, Mineralgehalte) durchgeführt. Da die biochemische Zusammensetzung der Milch mit der Gesundheit und dem Stoffwechsel einer Kuh zusammenhängt, besteht zudem die Möglichkeit, MIR-Spektren zur Vorhersage des Gesundheitszustandes, sowie der Effizienz und Umweltwirkung von Milchkühen zu verwenden. Im Zuge der Milchleistungsprüfung werden routinemäßig Milchproben mit einem Spektrometer analysiert. Verknüpft man die daraus resultierenden kuhindividuellen MIR-Spektren mit Phänotypen (z.B. Krankheitsdiagnosen), können Vorhersagemodelle für die jeweiligen Krankheiten bzw. Merkmale entwickelt werden.

Im vorliegenden Beitrag werden Anwendungen dieser Methoden für Energieaufnahme und Energieeffizienz, Mastitis und Trächtigkeitsstatus von Kühen vorgestellt. Im Rahmen eines recht kleinen Versuchs zur kurzfristigen Energie-restriktion an der HBLFA Raumberg-Gumpenstein wurden diverse Parameter ermittelt. Energieaufnahme und Energiebilanz wurden mit moderater Genauigkeit vorhergesagt, die Ergebnisse waren ähnlich denen aus internationalen Studien. Für das Monitoring der Euterkrankheit Mastitis ist die somatische Zellzahl ein etablierter Indikator. In einer aktuellen Studie entwickelten wir Mastitis-Vorhersagemodelle, basierend auf Zellzahl und MIR-Spektraldaten. Das Modell, welches beide Informationsquellen verwendet, erreichte die höchsten mittleren Genauigkeiten: 65-77 %. Die geschätzten Mastitis-Wahrscheinlichkeiten werden in weitere Folge zur Entwicklung eines Management-Tools und zur züchterischen Verbesserung der Eutergesundheit verwendet. Die Ermittlung des Trächtigkeitsstatus aus MIR-Spektren-Daten wäre besonders interessant für das Herdenmanagement. Leider konnte dieser nicht mit für eine praktische Anwendung ausreichender Genauigkeit ermittelt werden.

Für die Umweltwirkung der Milcherzeugung sind Energieeffizienz und Methanausstoß von Kühen entscheidende Faktoren. Ein großer Datensatz zur Energieeffizienz mit täglichen MIR-Spektren-Daten liegt an der HBLFA Raumberg-Gumpenstein bereits vor, für Methanausstoß gibt es aktuell Projektplanungen der in diesem Bericht involvierten Institutionen. MIR kann mehr, aber nicht alles!

Schlagwörter: Infrarotspektrum, Milch, Rind, Energiebilanz, Mastitis, Trächtigkeit

¹ Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Nutztierwissenschaften, Gregor-Mendel-Straße 33, A-1180 Wien

² HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Institut für Bio-Landwirtschaft und Nutztierbiodiversität, Raumberg 38, A-8952 Irnding-Donnersbachtal

³ ZuchtData EDV-Dienstleistungen GmbH, Dresdner Straße 89/B1/18, A-1200 Wien

* Ansprechpartner: Univ.-Prof. Dr. Johann Sölkner, email: johann.soelkner@boku.ac.at

Summary

Mid-Infrared (MIR) spectroscopy of milk is the method of choice for quantifying its main components such as fat, protein and lactose. In recent years, numerous studies have been carried out to determine other milk components and properties (e.g. fatty acid pattern, mineral content). Since the biochemical composition of the milk is related to the health and metabolism of a cow, there is also the possibility of using MIR spectra to predict the state of health, as well as the efficiency and environmental impact of dairy cows. Milk samples are routinely analyzed with a spectrometer as part of milk recording. If the resulting individual cow MIR spectra are linked to phenotypes (e.g. disease diagnoses), prediction models for the respective diseases or characteristics may be developed.

In the present article, applications of these methods for energy intake and energy efficiency, mastitis and pregnancy status of cows are presented. Various parameters were determined as part of a fairly small experiment on short-term energy restriction at AREC Raumberg-Gumpenstein. Energy intake and energy balance were predicted with moderate accuracy, with results similar to those from international studies. The somatic cell count is an established indicator for monitoring the udder disease mastitis. In a recent study, we developed mastitis prediction models based on somatic cell count and MIR spectral data. The model using both sources of information achieved the highest mean accuracies: 65-77%. The estimated mastitis probabilities will be used to develop a management tool and to improve udder health through breeding. Determining the pregnancy status from MIR spectra data would be particularly interesting for herd management. Unfortunately, this could not be determined with sufficient accuracy for a practical application.

Energy efficiency and methane emissions from cows are decisive factors for the environmental impact of milk production. A large data set on energy efficiency with daily MIR spectra data is already available at AREC Raumberg-Gumpenstein, and the institutions involved in this report are currently planning projects for methane emissions. MIR can do more, but not everything!

Keywords: Mid infrared spectra, milk, cattle, energy balance, mastitis, pregnancy

Einleitung

Die Fett-, Eiweiß-, Laktose- und Harnstoffgehalte der Milch von Kontrollkühen werden in Milchlabors, aus während der Milchleistungskontrolle gesammelten Milchproben, ermittelt. Diese Gehalte der Inhaltsstoffe werden nicht nass-chemisch ermittelt, sondern aus den Infrarotspektren der Milch. Diese Infrarotspektren wurden von den Herstellerfirmen der Milchanalysegeräte (in Österreich ist das in allen Milchlabors die Firma FOSS Analytics, DK) mit nass-chemischen Analyseergebnissen in Beziehung gesetzt und daraus Schätzformeln ermittelt, die laufend intern kontrolliert und aktualisiert werden. Die Milchanalysegeräte speicherten traditionell nur die Gehalte, nicht aber die Spektren selbst. Auf Anregung von Prof. Johann Sölkner von der Universität für Bodenkultur Wien (BOKU) werden seit dem Jahr 2014 auch die jeweils 1060 Mid-Infrared (MIR) Spektren-Werte routinemäßig im Rinderdatenverbund (RDV) gespeichert. Der Hintergrund zu dieser Anregung waren internationale wissenschaftliche Arbeiten, welche zeigten, dass Fettsäuremuster oder andere Inhaltsstoffe der Milch mit entsprechenden Schätzformeln gut approximiert werden können (SOYEURT et al. 2006). Wissenschaftler stellten sich als Nächstes die Frage, ob nicht auch physiologische Zustände der Kuh, welche als Folgewirkung auch die Milchinhaltsstoffe verändern, mit Schätzformeln aus den MIR-Spektren der Milch (oder auch des Bluts) ermittelt werden können. Die Energiebilanz und auch die Futteraufnahme waren hier erste Zielgrößen (McPARLAND et al. 2014).

Man versuchte auch die Rationszusammensetzung zu ermitteln (KLAFFENBÖCK et al. 2017, STEINWIDDER et al. 2017). Die Wahrscheinlichkeiten von Ketose und Mastitis sind weitere Zielgrößen, die man aus MIR-Spektren vorherzusagen versucht (DRÖSSLER et al. 2018, WERNER et al. 2019). Diese Werte können, wenn entsprechend transparent in Milchkontrollberichte einbezogen, wesentliche Hilfen für das Herdenmanagement sein. Information zum Trächtigkeitsstatus von Kühen aus MIR-Spektren, wenn hinreichend sicher geschätzt, wäre ein weiteres extrem wichtiges Management-Tool, das sozusagen gratis aus den im Rahmen der Milchanalyse verwendeten MIR-Spektren anfallen könnte. Erste Analysen (LAINE et al. 2014) waren vielversprechend, aktuelle Ergebnisse (RIENESL et al. 2020, KHANAL und TEMPELMAN 2022, TIPLADY et al. 2022) zeigen eine zu geringe Genauigkeit, um in die Praxis umgesetzt zu werden.

In diesem Bericht werden Analysen vorgestellt, in denen MIR-Spektraldaten der Milch herangezogen wurden, um Energieaufnahme und Energiebilanz, tierärztliche klinische Mastitis-Diagnosen sowie den Trächtigkeitsstatus von Kühen vorherzusagen. Diese Analysen stammen aus Forschungsprojekten der Arbeitsgruppe Tierzucht am Institut für Nutztierwissenschaften der Universität für Bodenkultur Wien in Kooperation mit Forschungspartnern der ZuchtData EDV-Dienstleistungen GmbH und der HBLFA Raumberg-Gumpenstein, sowie internationalen Partner*innen.

Energieaufnahme und Energiebilanz, Versuch Moarhof (HBLFA Raumberg-Gumpenstein)

In einem Experiment aus dem Jahr 2014 am Bio-Lehr- und Forschungsbetrieb „Moarhof“ der HBLFA Raumberg-Gumpenstein wurden die Effekte einer kurzfristigen energetischen Unterversorgung auf biologische Parameter von Milchkühen untersucht. Es wurden 20 Kühe der Rassen Brown Swiss und Holstein Friesian für diese Studie verwendet. Der Versuch wurde in drei Durchgängen von Mai bis Juli 2014 bei Stallhaltung durchgeführt, der Beobachtungszeitraum betrug jeweils 8 Wochen, wobei die Tiere in der dritten Versuchswoche durch Futterrestriktion energetisch unterversorgt (-20 bzw. -30 MJ NEL/Tag) wurden. Insgesamt standen 635 vollständige Datensätze inklusive MIR-Spektren zur Verfügung.

Das Ziel der hier vorgestellten Analysen war es, die Tauglichkeit der Vorhersage von Energiebilanz, Futteraufnahme sowie den damit in Zusammenhang stehenden Gehalten der Beta-Hydroxy-Buttersäure im Blut und der Freien Fettsäuren in der Milch aus MIR-Spektren zu untersuchen (PRINZ 2015).

Wie in *Tabelle 1* dargestellt ist die Vorhersagequalität von Futteraufnahme und Energieeffizienz aus MIR-Spektraldaten mit Korrelationen von 0.57 bzw. 0.59 in der Validierung moderat. Die Vorhersagequalität lässt sich durch Einbezug der Milchmenge in das Vor-

Tabelle 1: Qualität der MIR-Vorhersage (Korrelation von vorhergesagtem mit gemessenem Wert) im Datensatz zur Formelentwicklung (Training) und einem unabhängigen Validierungsdatensatz (Test)

Parameter	Korrelation	
	Training	Test
Energiebilanz, MJ NEL/Tag	0.81	0.59
Energiebilanz, MJ NEL/Tag (mit Milchleistung im Modell)	0.83	0.60
Energieaufnahme, MJ NEL/Tag	0.84	0.57
Energieaufnahme, MJ NEL/Tag (mit Milchleistung im Modell)	0.89	0.72
Energieaufnahme, MJ NEL/Tag (mit Milchleistung und Lebendmasse im Modell)	0.90	0.75
Beta-Hydroxy-Buttersäure (BHB) im Blut, mmol/l	0.95	0.28
Freie Fettsäuren (FFS) in der Milch, mmol/l	0.93	0.15
Fettgehalt der Milch, %	0.999	0.997

hersagemodell für Futteraufnahme wesentlich erhöhen ($r=0.75$), für die Energiebilanz jedoch nur unwesentlich ($r=0.60$). Die Ergebnisse für Beta-Hydroxy-Buttersäure und Freie Fettsäuren in der Milch in Trainings- und Test-Datensätzen zeigen deutlich das Problem des „Overfittings“ bei vielen Variablen (1060 MIR-Werte) bei wenigen Beobachtungen (635, von 20 Tieren) auf. Im Trainings-Datensatz zeigt sich eine scheinbar sehr gute Vorhersagequalität ($r=0.95$ bzw. 0.93) in der Validierung sinken die Korrelationen auf 0.28 bzw. 0.15 . Der Fettgehalt der Milch, der ja mit einer MIR-Formel der Gerätehersteller-Firma FOSS Inc. ermittelt wurde, kann mit der eigenen MIR-Vorhersage extrem exakt und robust ($r=0.999$ bzw. 0.997) vorhergesagt werden.

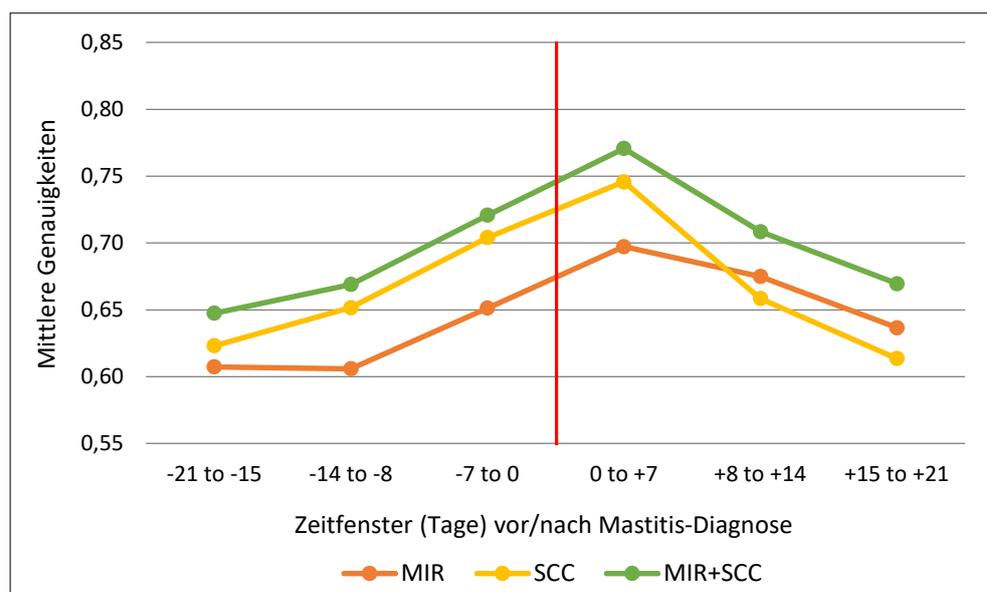
Die hier aus den Daten eines recht kleinen Versuchs vorgestellten Genauigkeiten von MIR-Vorhersage von Futteraufnahme und Futterverwertung decken sich mit Studien aus der Literatur mit größeren Datensätzen (McPARLAND et al. 2014, WALLÉN et al. 2018).

Mastitis

Die somatische Zellzahl der Milch wird im Rahmen der Milchleistungsprüfung routinemäßig als Indikator für die Eutergesundheit verwendet und fließt auch in die Zuchtwertschätzung für das Merkmal Eutergesundheit ein. Da der Gesundheits- und Stoffwechselzustand einer Kuh mit der Zusammensetzung der Milch zusammenhängen, kann das MIR-Spektrum potentiell für die Vorhersage von Krankheiten verwendet werden. Bei einer Studie, die im Rahmen des Comet-Projekts D4Dairy (d4dairy.com) durchgeführt wurde, zeigten erste Untersuchungen mit rund 600.000 Testtags-Ergebnissen und 8.000 klinischen Mastitis-Fällen (RIENESL et al. 2019) durchaus vielversprechende Ergebnisse. Mastitis-Fälle wurden zu rund 60 % korrekt zugeordnet, was angesichts einer klinischen Mastitis-Rate von 1,2 % durchaus sehr gut ist. Allerdings waren auch sehr viele Fälle, rund 20 %, falsch positiv, also als Mastitis klassifiziert, obwohl keine Mastitis-Diagnose vorlag.

Die hier vorgestellten Ergebnisse stammen aus aktuellen Analysen mit rund 800.000 Testtags-Ergebnissen. Es wurde geprüft, ob Vorhersage von klinischer Mastitis aus MIR-Spektren vergleichbar ist mit jener aus Zellzahl (SCS) und ob die Kombination von Zellzahl und MIR-Spektren eine bessere Vorhersagequalität für Mastitis hat als jeder dieser beiden Indikatoren alleine. *Abbildung 1* bestätigt letztere Hypothese, die Vorhersagegenauigkeit ist am besten bei Kombination von MIR und SCS, mit Vorhersageformeln auf Basis der Partial Least Squares Diskriminanz-Analyse (PLS-DA). Weil der Tag der Mastitis-Diagnose und der Testtag, an dem die Milchproben erhoben werden, selten zusammenfallen, wurde in dieser Studie auch geprüft, wie sich die Vorhersagequalität

Abbildung 1: Mittlere Genauigkeiten zur Vorhersage von klinischer Mastitis der verschiedenen Modelle (MIR, SCS, MIR+SCS) für einzelne Zeitfenster von Testtagen vor bzw. nach einer Mastitis-Diagnose; Mastitis-Diagnose = Tag 0 (rote Linie)



in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Diagnose und Testtag verhält. Es zeigte sich, dass Mastitis-Ereignisse bis zu 3 Wochen davor und 3 Wochen danach vorhergesagt werden können, wobei die Genauigkeiten bei geringem Abstand zwischen Testtag und Diagnose am höchsten sind. Auffällig ist, dass mit MIR Mastitis-Ereignisse in den Wochen nach der Diagnose besser vorhergesagt werden können als mit SCS, was auf die veränderte Zusammensetzung der Milch als Folge der Mastitis und möglicherweise einer antibiotischen Behandlung zurückzuführen ist.

Trächtigkeitsstatus

Der biologische Status einer Kuh ändert sich mit der Konzeption und die Zygote sendet biologische Signale aus (SPENCER 2013). Mit zunehmendem Alter des Embryos wird mehr Energie für das Wachstum desselben kanalisiert. Es steht zu vermuten, dass sich mit der Trächtigkeit die Zusammensetzung der Milch ändert und dass dies im MIR-Spektrum der Milch reflektiert wird. Erste Studien schienen diese Vermutung zu bestätigen (LAINE et al. 2014). Auch erste eigene Analysen zeigten gute Sensitivitäten und Spezifitäten der MIR-Vorhersage des Trächtigkeitsstatus (Tabelle 2).

Tabelle 2: Qualität der MIR-Vorhersage des Trächtigkeitsstatus (trächtig/nicht trächtig) bei Anwendung einer Vorhersageformel über die gesamte Laktation. Ergebnisse in Training und Test: Sensitivität (Anteil korrekt vorhergesagter trächtiger Tiere); Spezifität (Anteil korrekt vorhergesagter nicht trächtiger Tiere); Mittlere Genauigkeit (Mittel aus Sensitivität und Spezifität)

	Sensitivität	Spezifität	Mittlere Genauigkeit
Training	0,857	0,837	0,847
Test	0,856	0,836	0,846

Eine vertiefte Analyse zeigte jedoch, dass sich eine tatsächlich vorliegende Trächtigkeit in den ersten drei Laktationsmonaten nicht vorhersagen ließ, und nicht trächtige Kühe nach dem 4 Laktationsmonat fälschlicherweise fast immer als trächtig eingestuft wurden (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Sensitivität und Spezifität der Vorhersageformel für Trächtigkeit, aufgesplittet nach Laktationsmonaten

Laktationsmonat	Sensitivität	Spezifität	Laktationsmonat	Sensitivität	Spezifität
1	0,000	0,999	6	0,997	0,008
2	0,000	1,000	7	0,999	0,003
3	0,011	0,997	8	0,999	0,000
4	0,466	0,722	9	0,999	0,000
5	0,949	0,131	10	0,999	0,000

Die Ergebnisse zeigten also, dass mit den MIR-Formeln weniger der Trächtigkeitstatus als vielmehr das Laktationsstadium vorhergesagt wurde. Dies bestätigte sich durch eine Analyse, in der die Vorhersage der Trächtigkeit ausschließlich anhand des Laktations-tages durchgeführt wurde und die ähnliche Sensitivitäten und Spezifitäten aufwies, wie jene aus der Vorhersageformel mit MIR-Spektren. Um den störenden Effekt des Laktationsstadiums auszuschalten, wurden individuelle Vorhersage-Formeln für jedes Laktationsmonat entwickelt. Die mittleren Genauigkeiten lagen hierbei zwischen 0,50 und 0,60 und sind für eine Implementierung der Trächtigkeit-Vorhersage aus MIR-Spektren in der Praxis nicht ausreichend (RIENESL et al. 2020). Diese wird auch durch aktuelle internationale Studien bestätigt (DELHEZ et al. 2020, KHANAL und TEMPELMAN 2022, TIPLADY et al. 2022).

Diskussion

Die 1060 MIR-Spektralwerde der Milch, wie sie im Rahmen der Milchleistungsprüfung routinemäßig anfallen, können zu minimalen Kosten digital gespeichert und für diverse Analysen herangezogen werden. Die hier vorgestellten Untersuchungen liefern Hinweise auf potentiell erfolgreiche (Futtermittelaufnahme, Futtermittelnutzung, Mastitis) und wenig erfolgreiche (Trächtigkeitsstatus) Anwendungen von Vorhersageformeln basierend auf MIR-Spektren der Milch für Herdenmanagement und Zucht.

Aktuell steht den Landwirt*innen in Österreich die Vorhersage von Ketose aufgrund von MIR-Spektren, KetoMIR, entwickelt vom LKV Baden-Württemberg, zur Verfügung (DRÖSSLER et al. 2018, WERNER et al. 2019, KÖCK et al. 2020). Die eigenen Untersuchungen zu klinischer Mastitis ermutigen zur Implementierung eines ähnlichen Warnsystems mit den Farben grün/gelb/rot in den Tagesberichten der Milchleistungsprüfung. Auch die Einbeziehung der MIR-basierten Vorhersage von Mastitis in der Zuchtwertschätzung für Eutergesundheit, derzeit ein Index aus Zellzahl und klinischer Mastitis-Diagnosen, ist in Prüfung. Testtage, die zeitlich ganz nahe bei Diagnosen sind, ergeben bessere Schätzgenauigkeiten. Ob und wie die MIR-Spektren-Technologie im Rahmen von automatischen Melksystemen implementiert wird, ist derzeit unklar. Die hier verwendeten Methoden der Klassifizierung von Ereignissen (PLS-DA) oder Schätzung von quantitativen Werten (PLS) bieten sich auch für Sensor-Daten an und werden dort auch eingesetzt.

Die Analyse sehr komplexer, großer Datensätze (big data) birgt aber auch Fallen, wie uns die Ermittlung des Trächtigkeitsstatus von Kühen zeigte. Hier wiesen erste Ergebnisse auf gute Sensitivität und Spezifität hin, bis klar wurde, dass die ursprünglich eingesetzten Schätzformeln in erster Linie das Laktationsstadium ermittelten und daraus den Trächtigkeitsstatus ableiteten. Viele weitere Zielgrößen, wie jene der Umweltwirkung durch Ermittlung des Methanausstoßes der Milch, warten noch auf die Erstellung von MIR-basierten Schätzformeln und die darauffolgende Anwendung in Herdenmanagement und Zucht.

Danksagung

Die hier vorgestellten Arbeiten im Zusammenhang mit Trächtigkeiten und Mastitis wurden im Rahmen des Projektes D4Dairy (Digitalisation, Data integration, Detection and Decision support in Dairying, Projektnummer: 872039) durchgeführt. Das COMET-Projekt D4Dairy wird vom BMK, BMDW und den Ländern Niederösterreich und Wien im Rahmen von COMET Kompetenzzentren für exzellente Technologien unterstützt und wird von der FFG abgewickelt.

Literatur

DELHEZ, P., P. HO, N. GENGLER, H. SOYEURT und J. PRYCE, 2020: Diagnosing the pregnancy status of dairy cows: How useful is milk mid-infrared spectroscopy? *J. Dairy Sci.* 103, 3264-3274.

DRÖSSLER, K., A. WERNER und L. DALE, 2018: KetoMIR-a new tool for LKV member farms. 45. Viehwirtschaftliche Fachtagung, Bericht HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Irdning-Donnersbachtal, 57-63.

KHANAL, P. und R.J. TEMPELMAN, 2022: The use of milk Fourier-transform mid-infrared spectroscopy to diagnose pregnancy and determine spectral regional associations with pregnancy in US dairy cows. *J. Dairy Sci.*

KLAFFENBÖCK, M., A. STEINWIDDER, C. FASCHING, G. TERLER, L. GRUBER, G. MÉSZÁROS und J. SÖLKNER, 2017: The use of mid-infrared spectrometry to estimate the ration composition of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 100, 5411-5421.

KÖCK, A., M. MAYERHOFER und C. EGGER-DANNER, 2020: Anwendung von MIR-Daten aus der Milch – was ist praxisreif? 47. Viehwirtschaftliche Fachtagung, Bericht HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Irdning-Donnersbachtal, 7-14.

LAINE, A., H. BEL MABROUK, L.-M. DALE, C. BASTIN und N. GENGLER, 2014: How to use mid-infrared spectral information from milk recording system to detect the pregnancy status of dairy cows. *Communication on Applied Biological Science*.

McPARLAND, S., E. LEWIS, E. KENNEDY, S. MOORE, B. McCARTHY, M. O'DONOVAN, S.T. BUTLER, J. PRYCE und D.P. BERRY, 2014: Mid-infrared spectrometry of milk as a predictor of energy intake and efficiency in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 97, 5863-5871.

PRINZ, M., 2015: Einfluss einer kurzfristigen Energieunterversorgung auf Milchleistung, physiologische Parameter und das Mid-Infrarot-Spektrum der Milch von Kühen im ersten Laktationsdrittel (Masterarbeit). Universität für Bodenkultur Wien.

RIENESL, L., N. KHAYATZADEH, A. KÖCK, L. DALE, A. WERNER, C. GRELET, N. GENGLER, F.-J. AUER, C. EGGER-DANNER und X. MASSART, 2019: Mastitis detection from milk mid-infrared (MIR) spectroscopy in dairy cows. *Acta Univ. Agric. Silvic. Mendel. Brun* 67, 1221-1226.

RIENESL, L., P. PFEIFFER, N. KHAYATZADEH, A. KÖCK, L. DALE, A. WERNER, C. GRELET, N. GENGLER, F.-J. AUER und C. EGGER-DANNER, 2020: Prediction of pregnancy state from milk mid-infrared (MIR) spectroscopy in dairy cows. *Acta Fytotechnica et Zootechnica* 23.

SOYEURT, H., P. DARDENNE, F. DEHARENG, G. LOGNAY, D. VESELKO, M. MARLIER, C. BERTOZZI, P. MAYERES und N. GENGLER, 2006: Estimating fatty acid content in cow milk using mid-infrared spectrometry. *J. Dairy Sci.* 89, 3690-3695.

SPENCER, T.E., 2013: Early pregnancy: concepts, challenges, and potential solutions. *Animal frontiers* 3, 48-55.

STEINWIDDER, A., M. KLAFENBÖCK, C. FASCHING, G. TERLER, L. GRUBER, D. MÉSZÁROS und J. SÖLKNER, 2017: Potenzial der Mid-Infrarot-Spektrometrie bei Kuhmilchproben zur Abschätzung der Rationszusammensetzung.

TIPLADY, K., M.-H. TRINH, S. DAVIS, R. SHERLOCK, R. SPELMAN, D. GARRICK und B. HARRIS, 2022: Pregnancy status predicted using milk mid-infrared spectra from dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 105, 3615-3632.

WALLÉN, S., E. PRESTLØKKEN, T. MEUWISSEN, S. McPARLAND und D. 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.

WERNER, A., F. GOLLÉ-LEIDREITER, K. DROESSLER, F.J. AUER, M. MAYERHOFER, A. KÖCK, C. EGGER-DANNER und L.M. DALE, 2019: „KetoMIR2“-modellierung von Ketose-Risiko unter Verwendung von veterinärmedizinischer Diagnose und MIR-Spektren für Milchkuh im frühen Laktationsstadium. *ICAR Technical Series*, 303-307.